

**OTIMIZAÇÃO DE ROTAS DE COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS,
UTILIZANDO TÉCNICAS DE PESQUISA OPERACIONAL**

THOBER CORADI DETOFENO

CURITIBA
2009

THOBER CORADI DETOFENO

**OTIMIZAÇÃO DE ROTAS DE COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS,
UTILIZANDO TÉCNICAS DE PEQUISA OPERACIONAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, área de concentração em Programação Matemática, Setor de Tecnologia, Departamento de Construção Civil e Setor de Ciências Exatas, Departamento de Matemática da Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Teresinha Arns Steiner

CURITIBA

2009

TERMO DE APROVAÇÃO

THOBER CORADI DETOFENO

OTIMIZAÇÃO DE ROTAS DE COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS, UTILIZANDO TÉCNICAS DE PEQUISA OPERACIONAL

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção de grau de Mestre em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos de Engenharia, área de concentração em Programação Matemática, Setor de Tecnologia, Departamento de Construção Civil e Setor de Ciências Exatas, Departamento de Matemática da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientadora:

Maria Teresinha Arns Steiner, D. Eng.
PPGMNE e Coordenação do Curso de Engenharia de Produção,
UFPR

Heitor Silvério Lopes, D. Eng.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática
Industrial, UTFPR

Eduardo Dell'avanzi, D. Eng.
Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, UFPR

Deise Maria Bertholdi Costa, D. Eng.
PPGMNE e Departamento de Expressão Gráfica, UFPR

Curitiba

2009

AGRADECIMENTOS

A Deus, onde pude buscar forças nos momentos de desânimo e luz nos momentos obscuros.

Aos meus pais Nelson e Inézia Detofeno, meus maiores mestres, cujos ensinamentos guardo com grande carinho e consideração para toda vida. Se hoje tenho este título, dedico a vocês.

Aos meus irmãos Thercia e Thiago Detofeno, unidos e torcendo um pelos outros vamos longe.

A minha esposa que soube conduzir por meio da compreensão e carinho esta caminhada, estando ao meu lado em todos os momentos.

A minha orientadora, Prof^a. Dr^a. Maria Teresinha Arns Steiner, pela sua dedicação e uma orientação precisa durante todo o período do trabalho; mas não apenas por isso, ainda mais, pelo exemplo que me deixou como uma professora com elevadas qualidades intelectuais e morais.

Aos meus amigos e colegas de mestrado, em especial aos meus grandes incentivadores Carlos Smaka, Clodoaldo José Figueiredo, Edson Rovina e Edson Citadin. Muito obrigado pela força!

A família de Ivo Farias de Souza pelo apoio, amizade e carinho.

E a todos aqueles que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Olhe grato para trás, corajosamente
para frente e confiante para cima.

GÊNESIS 32. 11-13

RESUMO

O trabalho apresenta uma metodologia para a obtenção de uma solução otimizada para o problema de geração de rotas na coleta de resíduos sólidos urbanos. Este problema se caracteriza como sendo de cobertura de arcos e, para o seu desenvolvimento, foi utilizada uma combinação de técnicas da área de Pesquisa Operacional. Entre elas, está a utilização da heurística de Teitz e Bart, 1968, para a obtenção das p -medianas necessárias para o problema. A partir da definição das p -medianas determina-se os grupos (*clusters*) de pontos a serem designados a cada mediana através do algoritmo de Gillett e Johnson (Bodin *et al.*, 1983), o qual foi aqui adaptado. O algoritmo do carteiro chinês (Bodin *et al.*, 1983) foi utilizado para se obter, a partir da definição dos grupos, o roteamento em cada um dos grupos de atendimento. São apresentados os resultados obtidos para um estudo de caso na cidade de Joinville, SC, utilizando dados reais. A utilização destes algoritmos forneceu uma solução satisfatória para o problema de geração de rotas na coleta de resíduos sólidos urbanos. Na área onde o Algoritmo do Carteiro Chinês foi aplicado, obteve-se um ganho aproximado de 7,83 %.

ABSTRACT

This work presents a methodology developed for optimizing the routes for urban solid waste collection. The problem is approached as an arc coverage type-problem and its solution is based on some Operational Research techniques. The Teitz and Bart heuristic approach, 1968, was used to get the p -medians for the problem, and subsequently, the Gillett and Johnson algorithm (Bodin *et al.*, 1983) for determining the clusters of demand points to be assigned to each p -median. The Chinese Postman algorithm (Bodin *et al.*, 1983) was used on the clusters, to get the routing definition in each cluster of the studied area. It was presented the results obtained from a case study to the city of Joinville, Brazil, using real data. The algorithms used provided a satisfactory solution for the optimization problem the routes for urban solid waste collection. In the area where the Chinese Postman algorithm was implemented, there was a gain of, approximately, 7.83%.

ABREVIATURAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AMUNESC – Associação dos Municípios do Nordeste de Santa Catarina
- API* – *Application Programming Interface*, em português Interface de Programação de Aplicativos
- DBA* – *DataBase Administrator*, em português Administrador de Banco de Dados
- GPS* – *Global Positioning System*, em português Sistema de Posicionamento Global
- HTML* - *HyperText Markup Language*, em português Linguagem de Marcação de Hipertexto
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IDH – Índices de Desenvolvimento Humano
- IPTU – Imposto sobre a Propriedade predial e Territorial Urbana
- KML* – *Keyhole Markup Language*, em português Linguagem de Marcação de *Keyhole*
- NBR – Norma Brasileira de Regulamentação
- PCC – Problema do Carteiro Chinês
- PCCD – Problema do Carteiro Chinês Direcionado
- PCCM – Problema do Carteiro Chinês Misto
- PCCND – Problema do Carteiro Chinês Não Direcionado
- PCR – Problema do Carteiro Rural
- PL/SQL* – *Procedural Language/Structured Query Language*, em português linguagem procedural/linguagem de consulta estruturada
- PNSB – Pesquisa Nacional sobre o Saneamento Básico
- URL* – *Uniform Resource Locator*, em português Localizador de Recursos Universal
- WEB* – ou *WWW (World Wide Web)*, em português rede de alcance mundial
- XE* - *Express Edition*, uma edição do Oracle com recursos limitados
- XML* - *EXtensible Markup Language*, em português Linguagem Extensível de Formatação

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Produção per capita de resíduos sólidos Kg/dia	1
Figura 2.1 - Percentual do volume de lixo coletado, por tipo de destino final, segundo os estratos populacionais dos municípios	6
Figura 2.2 – Produção per capita de lixo domiciliar em kg/dia, por existência de balança, segundo os extratos populacionais dos municípios.....	7
Figura 2.3 – O processo da coleta de resíduos sólidos e suas interrelações.....	9
Figura 2.4 – Localização de Joinville dentro do estado de Santa Catarina	12
Figura 2.5 – Mapa da região analisada de Joinville, dividida em cinco setores	15
Figura 2.6 – Trajeto percorrido pelo caminhão no setor 08.....	17
Figura 4.1 – Metodologia do trabalho.....	27
Figura 4.2 – Fases para a resolução do problema	29
Figura 4.3 – Exemplo de uma combinação inválida para geração das 5-medianas..	39
Figura 4.4 – Detalhamento do Setor 08, da figura 2.1, bairro Aventureiro	40
Figura 4.5 – Exemplo do arquivo <i>KML</i> gerado pelo <i>Google Earth</i>	42
Figura 5.1 – Primeiro método utilizado para cadastrar os pontos geográficos no <i>Google Earth</i>	45
Figura 5.2 – Segundo método utilizado para cadastrar os pontos geográficos no <i>Google Earth</i>	46
Figura 5.3 – Distância entre dois pontos utilizando o cálculo da distância Euclidiana.....	47
Figura 5.4 – Distância entre dois pontos utilizando o cálculo do menor trajeto entre as ruas	48
Figura 5.5 – Resultado do Algoritmo de Teitz e Bart com o cálculo das distâncias Euclidianas.....	49
Figura 5.6 – Resultado do Algoritmo de Teitz e Bart considerando as distâncias reais	50
Figura 5.7 – Resultado do Algoritmo de Gillett e Johnson	51
Figura 5.8 – Trajeto obtido pelo Algoritmo do Carteiro Chinês para a rota 08	52
Figura 5.9 – Mapa de Joinville com os pontos de inicio e fim da coleta para a Rota 08.....	53

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1. TIPOS DE COLETA DE RESÍDUOS	2
TABELA 2.1. CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS, SEGUNDO SUA ORIGEM.....	5
TABELA 2.2. TOTAL DE MUNICÍPIOS QUE CONTRATAM EMPRESAS DE SERVIÇOS DE LIMPEZA URBANA E COLETA DE LIXO.....	10
TABELA 2.3. PERCENTUAL DO ORÇAMENTO DESTINADO AOS SERVIÇOS DE LIMPEZA URBANA E COLETA DE LIXO	11
TABELA 2.4. CRESCIMENTO POPULACIONAL EM JOINVILLE, ENTRE 1960 E 2004	12
TABELA 2.6. LOCAL DE TRATAMENTO E DESTINO DOS RESÍDUOS EM JOINVILLE	14
TABELA 2.7. INFORMAÇÕES SOBRE BAIRRO AVENTUREIRO DE JOINVILLE ..	16
TABELA 2.8. PRODUÇÃO DA COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS DO SETOR 0818	
TABELA 5.1 - COMPARATIVO ENTRE OS DESEMPENHOS DOS ALGORITMOS (TEITZ E BART CLÁSSICO E TEITZ E BART MODIFICADO).....	49
TABELA 5.2 - COMPARATIVO ENTRE A MÉDIA ATUAL PARA A COLETA DE RESÍDUOS COM O RESULTADO ALCANÇADO PELO ALGORITMO DO CARTEIRO CHINÊS PARA A ROTA 08	54

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	OBJETIVO DO TRABALHO.....	2
1.2.	ESTRUTURA DO TRABALHO	3
2	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	4
2.1	RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	4
2.1.1	Gerenciamento dos Resíduos Sólidos Urbanos	7
2.1.2	Sistema de Coleta e Transporte de Resíduos Sólidos Urbanos.....	9
2.2	COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO MUNICÍPIO DE JOINVILLE	11
2.3	ÁREA ANALISADA NESTE TRABALHO	14
3	TRABALHOS CORRELATOS.....	20
4	METODOLOGIA UTILIZADA.....	26
4.1.	ESTUDO EXPLORATÓRIO DO PROBLEMA DE COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	27
4.2.	DESENVOLVIMENTO DA SOLUÇÃO.....	28
4.2.1	Problema das p -Medianas.....	29
4.2.2	Formação dos Grupos de Atendimento	34
4.2.3	Problema do Carteiro Chinês (PCC).....	35
4.3.	DESENVOLVIMENTO COMPUTACIONAL.....	37
4.3.1	Fases do desenvolvimento computacional	38
4.3.2	Tecnologias utilizadas para o desenvolvimento computacional.....	41
5	OBTENÇÃO DOS DADOS E DOS RESULTADOS	44
5.1	OBTENÇÃO DOS DADOS PARA O ESTUDO DE CASO	44
5.1.1.	Cadastramento dos pontos geográficos no <i>Google Earth</i>	44
5.1.2.	Obtenção das distâncias entre os pontos geográficos	46
5.2	OBTENÇÃO DOS RESULTADOS PARA O ESTUDO DE CASO	48
5.3	ROTEAMENTO DO GRUPO 08	51
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	55
6.1	CONCLUSÕES DO TRABALHO	55
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	56
	REFERÊNCIAS.....	57
	ANEXO.....	62

1 INTRODUÇÃO

Os serviços de limpeza absorvem entre 7% e 15% dos recursos de um orçamento municipal, dos quais 50% são destinados exclusivamente à coleta e ao transporte de resíduos. Certamente, a sua otimização leva a uma economia significativa dos recursos públicos (Carvalho, 2001).

Conforme mostrado na Figura 1.1, há uma grande tendência de aumento da geração de lixo domiciliar per capita em proporção direta ao número de habitantes. Nas cidades com até 200.000 habitantes pode-se estimar a quantidade coletada variando entre 450 e 800 gramas por habitante/dia; acima de 200.000 habitantes, esta quantidade aumenta para a faixa entre 800 e 1.300 gramas por habitante/dia.

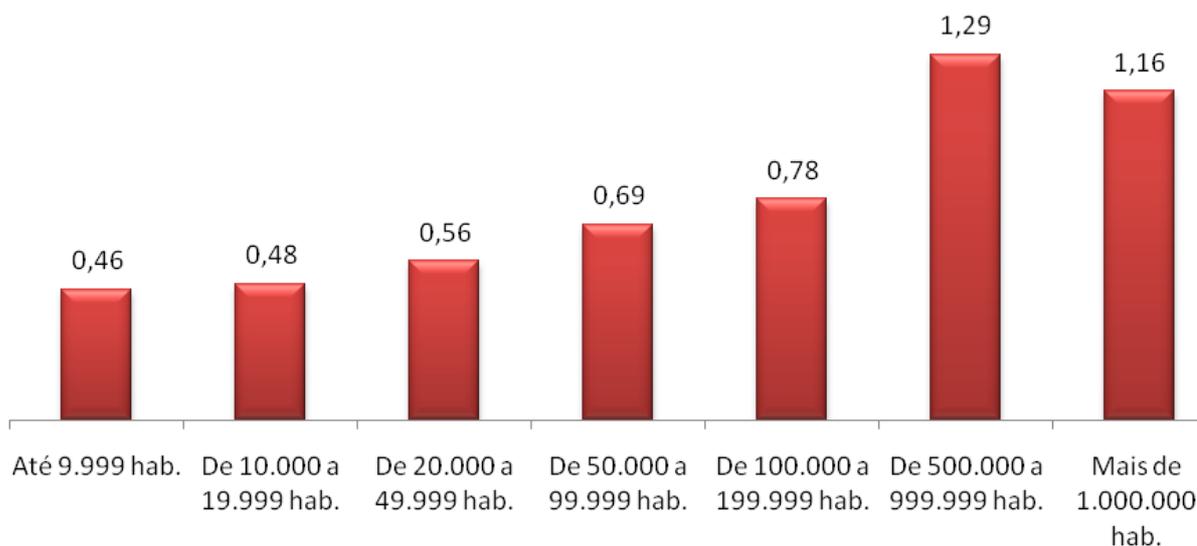


Figura 1.1 – Produção per capita de resíduos sólidos Kg/dia

FONTE: IBGE, Diretoria de Pesquisa, Departamento de População e Indicadores Sociais, PNSB 2000

Com o crescimento da população, o conseqüente acréscimo do consumo de alimentos per capita e de acordo com o Censo de Demográfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2000), 81% da população brasileira concentra-se em áreas urbanas, ocasionando um crescente aumento do volume de resíduos produzido, apresentando assim a importância do gerenciamento de resíduos em áreas urbanas.

De uma forma geral, em um município existem três tipos principais de coletas utilizadas para a captação de resíduos: a dos resíduos urbanos, a dos resíduos hospitalares e a coleta seletiva, sendo que a forma de recolhimento está

explanada na tabela 1.1, a seguir. Vale salientar que o presente trabalho se atém à coleta de resíduos sólidos urbanos na cidade de Joinville, SC.

TABELA 1.1. TIPOS DE COLETA DE RESÍDUOS

Tipo de Coleta	Forma de Recolhimento
Coleta de Resíduos Urbanos	Recolhimento e transporte do lixo doméstico e urbano produzido em residências, condomínios, instituições públicas, estabelecimentos comerciais, industriais e de serviços.
Coleta Hospitalar	Recolhimento e transporte diferenciados de resíduos gerados em estabelecimentos prestadores de serviços de saúde.
Coleta Seletiva	Recolhimento e transporte de resíduos recicláveis previamente triados na fonte e entregues a cooperativas ou associações de pessoas carentes. Esse serviço fomenta o reaproveitamento de materiais como papéis, papelão, metais, plásticos e vidros.

FONTE: AMBIENTAL SANEAMENTO E CONCESSÕES, 2009 (Retirado de http://www.ambsc.com.br/serv_coletas.htm)

1.1. OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é apresentar uma solução para o problema de roteamento da coleta de resíduos sólidos urbanos, minimizando as distâncias percorridas por caminhão de coleta. Para isso, utilizou-se uma metodologia que consistiu basicamente das seguintes etapas:

- 1) estudo exploratório, onde o problema foi caracterizado e estruturado;
- 2) desenvolvimento da solução, através da identificação de algoritmos matemáticos capazes de resolver o problema;
- 3) desenvolvimento computacional da solução, utilizando-se de diversas tecnologias para o cadastramento dos pontos, cálculo das distâncias e, também, dos algoritmos matemáticos;
- 4) validação da solução, por intermédio de testes para verificar se os resultados obtidos estão de acordo com a realidade observada.

1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em seis capítulos, incluindo esta introdução.

No segundo capítulo é realizado o estudo e a estruturação do problema: foram obtidos dados com a empresa responsável pela coleta de resíduos de Joinville, SC e, também, foi feita uma pesquisa bibliográfica sobre o gerenciamento de resíduos sólidos em Joinville e no Brasil, de uma forma geral.

O terceiro capítulo destina-se à revisão da literatura de estudos realizados sobre técnicas da área de Pesquisa Operacional aplicadas a problemas correlatos ao aqui abordado.

O quarto capítulo detalha a metodologia utilizada para resolver o problema de coleta de resíduos sólidos, utilizando como estudo de caso a cidade de Joinville. Neste capítulo são descritos os métodos propostos para a solução do problema e a implementação computacional das técnicas citadas.

O quinto capítulo descreve a obtenção dos dados (coordenadas dos pontos geográficos cadastrados e suas distâncias), utilizados no desenvolvimento da solução para o estudo de caso, e também, dedica-se à obtenção e análise dos resultados obtidos, incluindo comparações com os dados fornecidos pela empresa responsável pela coleta de resíduos.

Finalmente, o capítulo seis traz as conclusões finais e as sugestões para trabalhos futuros.

2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Neste capítulo são descritos: o sistema de coleta de resíduos sólidos urbanos no Brasil, a importância da coleta de resíduos sólidos, a coleta de resíduos sólidos urbanos em Joinville, SC e a região escolhida desta cidade para a aplicação dos métodos da área de Pesquisa Operacional propostos neste trabalho.

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Com o crescimento da população mundial e o “inchaço” das cidades, o aumento da produção de lixo é inevitável. Por definição, considera-se como lixo os restos de atividades humanas considerados como inúteis, indesejáveis ou descartáveis, apresentando-se sob estado sólido, semi-sólido ou semi-líquido, que ocorrem diariamente, em quantidades e composições que dependem do desenvolvimento e do tamanho da população.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define resíduos sólidos como:

“... resíduos nos estados sólidos e semi-sólidos, que resultam de atividade de origem industrial, doméstica, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes dos sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis face à melhor tecnologia disponível (ABNT NBR 10004, 2004)”

De acordo com a Fundação Nacional de Saúde (2004), os resíduos sólidos são constituídos de substâncias:

- Facilmente degradáveis, como restos de comida, sobras de cozinha, restos de podas, animais mortos e excrementos;
- Moderadamente degradáveis, como papel, papelão e outros produtos celulósicos;
- Dificilmente degradáveis, como tecidos, couro, madeira, borracha, ossos, plásticos, dentre outros;

- Não degradáveis, como metal não ferroso, vidro, pedras, cinzas, terra, areia, cerâmica, dentre outros.

Na tabela 2.1, a seguir, TCHOBANOGLIOUS; THEISEN e VIGIL (1993) propõem uma classificação dos resíduos sólidos quanto a sua origem, bem como as unidades onde os resíduos são gerados.

TABELA 2.1. CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS, SEGUNDO SUA ORIGEM

Fonte	Unidades típicas, atividades ou localização onde os resíduos são gerados
Residência	Família simples e várias famílias em residências independentes e apartamentos.
Comércio	Lojas, restaurantes, mercados, escritórios, hotéis, motéis, lojas de impressão, serviços mecânicos, etc.
Instituições	Escolar, hospitalar, prisões, centros governamentais.
Construção e Demolição	Áreas de novas construções, recuperação/renovação de estradas, entulhos de pavimentação.
Serviços Municipais (exceto unidades de tratamento)	Varrição, limpeza de boca de lobo, parques e praias, outras áreas de recreação.
Unidades de tratamento; incineradores municipais	Processo de tratamento de água, efluentes e resíduos industriais.
Município	Todos citados anteriormente.
Indústria	Construção, fabricação, indústrias pesadas e leves, refinarias, unidades geradoras de energia, demolições, etc.
Agricultura	Colheita, pomares, videiras, leiteiras, fazendas, etc.

FONTES: TCHOBANOGLIOUS; THEISEN e VIGIL (1993)

Em relação aos resíduos sólidos, dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), coletados na Pesquisa Nacional sobre o Saneamento Básico (PNSB) realizado em 2000, conforme figura 2.1, indicaram uma situação de destinação final do lixo coletado no País, em peso, bastante favorável: 47,1% em aterros sanitários, 22,3% em aterros controlados e apenas 30,5% em lixões, ou seja, mais de 69% de todo o lixo coletado no Brasil estaria tendo um destino final adequado em aterros sanitários e/ou controlados. Todavia, em número de municípios, o resultado não é tão favorável: 63,6% utilizam lixões e 32,2%, aterros adequados (13,8% sanitários, 18,4% aterros controlados), sendo que 5% não informaram para onde vão seus resíduos. Em 1989, a PNSB (IBGE,2000) mostrava

que o percentual de municípios que destinavam seus resíduos de forma adequada era de apenas 10,7%.

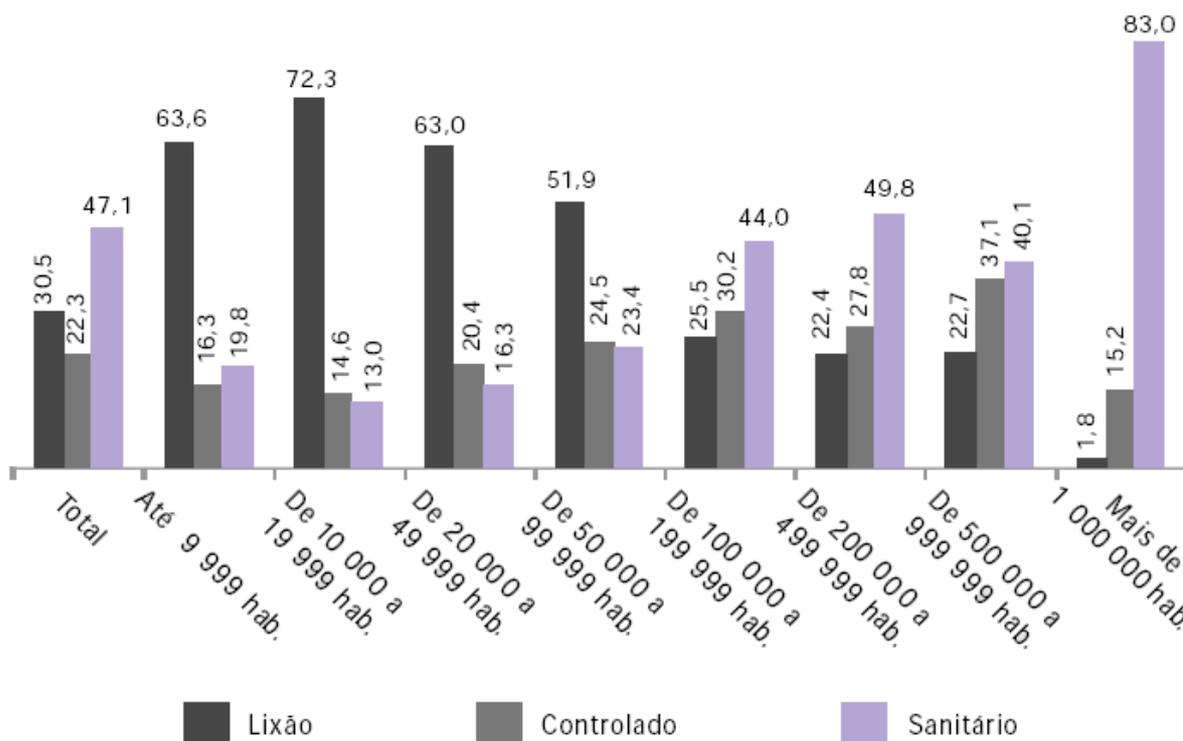


Figura 2.1 - Percentual do volume de lixo coletado, por tipo de destino final, segundo os estratos populacionais dos municípios

FONTE: IBGE, Diretoria de Pesquisa, Departamento de População e Indicadores Sociais, PNSB 2000

Segundo o IBGE (2000), apenas 8,4%, dos municípios, em número, pesam efetivamente em balanças o lixo coletado. Todavia, 64,7% do lixo urbano no Brasil é pesado, na medida em que as grandes cidades, que geram a maior parcela da produção de lixo, dispõem deste equipamento de medição.

Na figura 2.2, verifica-se que há uma tendência de aumento da geração informada do lixo domiciliar per capita em proporção direta com o número de habitantes. Nas cidades com até 200 mil habitantes, pode-se estimar a quantidade coletada, variando entre 450 e 800 gramas por habitante/dia; acima de 200 mil habitantes, essa quantidade aumenta para a faixa entre 800 e 1300 gramas por habitante/dia. A PNSB (IBGE,2000) informa que, na época em que a pesquisa foi realizada, eram coletadas 125.281 toneladas de lixo domiciliar, diariamente, em todos os municípios brasileiros. Trata-se de uma quantidade expressiva de resíduos, para os quais deve ser dado um destino final adequado, sem prejuízo à saúde da população e sem danos ao meio ambiente.

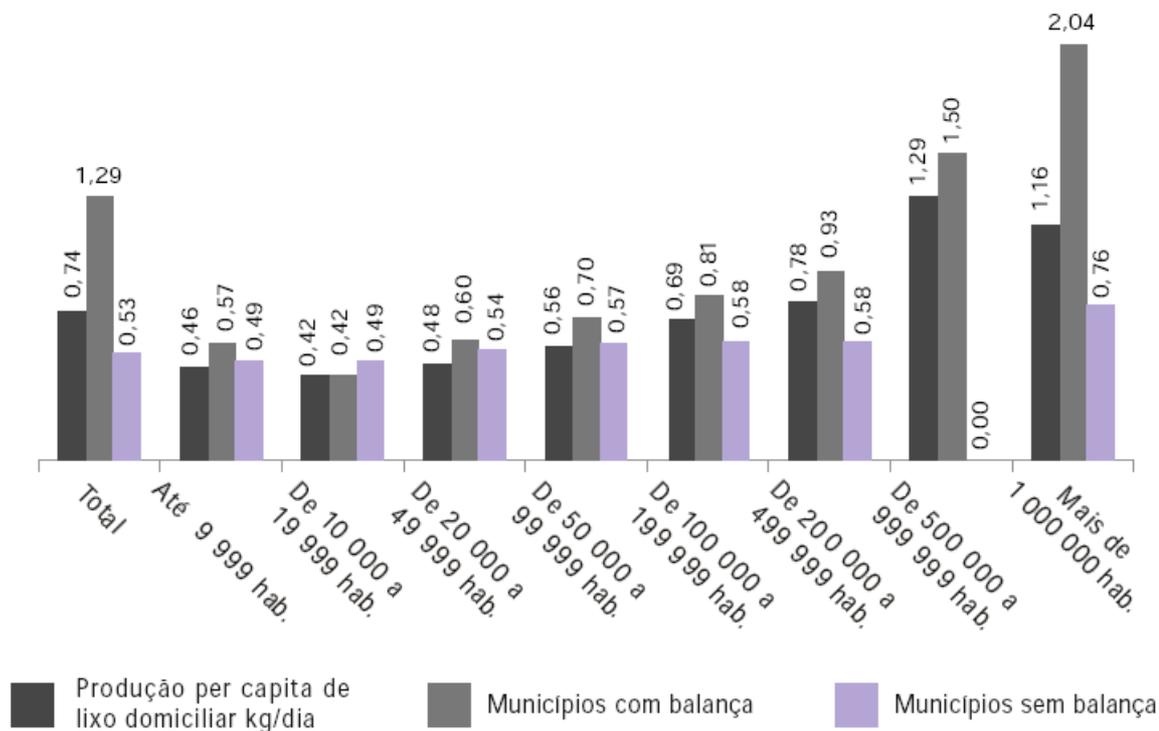


Figura 2.2 – Produção per capita de lixo domiciliar em kg/dia, por existência de balança, segundo os extratos populacionais dos municípios.

FONTE: IBGE, Diretoria de Pesquisa, Departamento de População e Indicadores Sociais, PNSB

2.1.1 Gerenciamento dos Resíduos Sólidos Urbanos

De acordo com ROSA (1999), *apud* CARVALHO (2001), as situações que envolvem a problemática do lixo são bem diferentes de município para município e, desta forma, tem atingido mais fortemente algumas prefeituras do que outras. Por outro lado, não se deve pensar que os problemas sejam menores ou mais fáceis nos locais onde o lixo incomoda menos, uma vez que problemas aparentemente invisíveis podem, em pouco tempo, causar graves danos à comunidade.

Segundo ROSA (1999), *apud* CARVALHO (2001), o problema de limpeza pública em comunidades urbanas assume complexidade progressivamente maior à medida que crescem os contingentes populacionais, pois as fontes produtoras de resíduos tendem a se tornar mais numerosas e distribuídas de maneira aleatória nos espaços das cidades.

Portanto, “deve-se pensar o lixo como um problema sanitário de primeira ordem, para cuja solução é requerido um processo gerencial bem planejado e

estruturado em bases técnicas estabelecidas a partir de soluções de engenharia” (CARVALHO, 2001).

Embora existam inúmeros modelos de gerenciamento integrado do lixo, nenhuma sugestão ou consultoria substitui o bom senso que está no cidadão e em sua administração municipal (IPT, 1995).

Mesmo sendo de responsabilidade do município, a tarefa do gerenciamento do sistema de limpeza urbana, objetivando afastar o lixo das populações e dando um destino final ecologicamente adequado, esta tarefa, segundo IPT (1995), é dificultada pelos seguintes problemas:

- Inexistência de uma política brasileira de limpeza pública;
- Limitação financeira – orçamentos inadequados, fluxo de caixa desequilibrado, tarifas desatualizadas, arrecadação insuficiente e inexistência de linhas de crédito;
- Descontinuidade política e administrativa;
- Falta de controle ambiental.

Para combater esta problemática, a gestão do serviço de limpeza deverá tomar uma série de decisões estratégicas, usando ferramentas apropriadas de manejo gerencial (CARVALHO, 2001).

De acordo com IPT (1995), as prioridades máximas, para qualquer modelo de gerenciamento para o lixo, devem ser:

- Coletar todo o lixo gerado de responsabilidade da prefeitura;
- Dar um destino final adequado para o lixo;
- Buscar formas de tratamento para o lixo de seu município. Considerar que estas formas só darão resultados positivos e duradouros se responderem a claros objetivos tanto ambientais como econômicos;

Fazer campanhas ou implantar programas educacionais voltados à conscientização pela limpeza da cidade e incentivar medidas que visem diminuir a própria geração do lixo.

TCHOBANOGLIOUS; THEISEN e VIGIL (1993) afirmam que as atividades gerenciais ligadas aos resíduos sólidos podem ser agrupadas em seis elementos funcionais, conforme ilustra a figura 2.3.

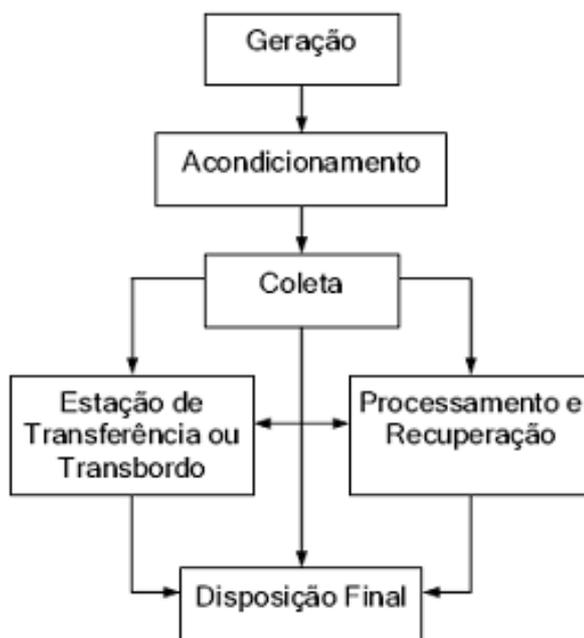


Figura 2.3 – O processo da coleta de resíduos sólidos e suas interrelações
 FONTE: TCHOBANOGLIOUS (1977)

2.1.2 Sistema de Coleta e Transporte de Resíduos Sólidos Urbanos

A coleta de resíduos sólidos urbanos é o serviço que está mais à vista da população, a falta de um planejamento adequado gera muitas reclamações e está intimamente vinculada à aceitação da administração municipal por parte da população.

De acordo com AGUIAR e PHILIPPI JR (2005), o planejamento e a administração da coleta envolvem algumas considerações importantes, como a frequência, o ponto de coleta, o horário e a forma da coleta, para que causem os menores transtornos possíveis para a população e seja sanitária e economicamente adequadas.

Segundo a Fundação Nacional de Saúde (2004), a coleta e o transporte dos diversos tipos de resíduos dos estabelecimentos, domiciliar, de feiras livres, de calçadas, públicos e a coleta de resíduos de serviços de saúde, de um modo geral, devem garantir os seguintes requisitos:

- a) A universalidade do serviço prestado;
- b) A regularidade da coleta (periodicidade, frequência e horário):
 - Periodicidade: os resíduos sólidos devem ser recolhidos em períodos regulares. A irregularidade faz com que a coleta deixe de ter sentido

sob o ponto de vista sanitário e passe a desestimular a população. Por exemplo, todas as segundas, quartas e sextas-feiras é realizado a coleta de resíduos sólidos;

- **Frequência:** é o intervalo entre uma coleta e a seguinte que deve ser o mais curto possível. Em locais de clima tropical, o ideal é que a coleta seja feita diariamente, mas se aceita em dias alternados. Esta definição depende em especial da disponibilidade de equipe e equipamentos. Por exemplo, uma frequência máxima de três dias no intervalo entre uma coleta e a seguinte;
- **Horário:** a coleta usualmente é feita durante o dia e, em áreas comerciais e locais de trânsito intenso, é mais viável a coleta noturna.

A pesquisa, realizada pelo IBGE (2000), revelou tendência na terceirização dos serviços de limpeza urbana, em todas as regiões brasileiras, de forma mais acentuada nos municípios de maior porte, e com menor intensidade no Nordeste. Nos municípios de maior porte ocorre, com alguma frequência, a contratação de mais de uma empresa para executar os serviços, provavelmente para estimular a concorrência entre mais de uma instituição e obter menores preços e melhor qualidade na operação.

Na tabela 2.2, disponibilizada pelo IBGE (2000), tem-se o total de municípios no Brasil que contratam empresas de serviços de limpeza urbana e coleta de lixo, com indicação do número de entidades e da média de empresas contratadas, segundo os estratos populacionais dos municípios.

TABELA 2.2. TOTAL DE MUNICÍPIOS QUE CONTRATAM EMPRESAS DE SERVIÇOS DE LIMPEZA URBANA E COLETA DE LIXO

Estratos populacionais	Total de municípios	Municípios que contratam empresas	Entidades prestadoras de serviços de limpeza urbana e coleta de lixo	Média de empresas contratadas
Total	5.507	604	6.235	1,2
Até 9.999 habitantes	2.644	145	2.776	1,1
De 10.000 a 19.999 habitantes	1.382	95	1.479	1,1
De 20.000 a 49.999 habitantes	957	127	1.119	1,3
De 50.000 a 99.999 habitantes	300	98	418	1,2
De 100.000 a 199.999 habitantes	117	61	198	1,3
De 200.000 a 499.999 habitantes	76	51	145	1,3
De 500.000 a 999.999 habitantes	18	15	55	2,5
Mais de 1.000.000 habitantes	13	12	45	2,7

FONTE: IBGE, Diretoria de Pesquisa, Departamento de População e Indicadores Sociais, PNSB 2000

A PNSB (IBGE,2000) revelou que do percentual do orçamento municipal destinado à limpeza urbana, mostrado na tabela 2.3, na grande maioria dos municípios com população abaixo de 50.000 habitantes, 5% no máximo, é destinado à gestão de resíduos sólidos. No ano de 2000, os serviços de limpeza urbana empregavam cerca de 318.000 pessoas em todo o Brasil, seja em quadros próprios das prefeituras ou contratados através de empresas terceirizadas, isso sem considerar os cerca de 24.000 catadores que atuam nos lixões que, adequadamente ou não, também sobrevivem de forma relacionada a esta atividade.

TABELA 2.3. PERCENTUAL DO ORÇAMENTO DESTINADO AOS SERVIÇOS DE LIMPEZA URBANA E COLETA DE LIXO

Estratos populacionais	Total de municípios	Municípios com serviços de limpeza urbana e/ou coleta de lixo, por percentual do orçamento destinado aos serviços					
		Total	Até 5%	Mais de 5% até 10%	Mais de 10% até 15%	Mais de 15% até 20%	Mais de 20%
Total	5.507	5.475	4.338	872	123	33	31
Até 9.999 habitantes	2.644	2.619	2.237	294	43	11	8
De 10.000 a 19.999 habitantes	1.382	1.376	1.080	243	28	5	9
De 20.000 a 49.999 habitantes	957	957	693	198	28	11	9
De 50.000 a 99.999 habitantes	300	299	209	63	12	2	1
De 100.000 a 199.999 habitantes	117	117	70	37	3	2	1
De 200.000 a 499.999 habitantes	76	76	39	24	7	0	3
De 500.000 a 999.999 habitantes	18	18	6	7	2	1	0
Mais de 1.000.000 habitantes	13	13*	4	6	0	1	0

FONTE: IBGE, Diretoria de Pesquisa, Departamento de População e Indicadores Sociais, PNSB 2000
 *Alguns municípios não informaram o percentual do orçamento destinado aos serviços de limpeza urbana e coleta de lixo.

2.2 COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO MUNICÍPIO DE JOINVILLE

Joinville é o município mais populoso e industrializado do estado de Santa Catarina. Segundo o IBGE (2006), a população é estimada atualmente em 500.000 habitantes. O crescimento populacional é apresentado na tabela 2.4.

TABELA 2.4. CRESCIMENTO POPULACIONAL EM JOINVILLE, ENTRE 1960 E 2004

Anos	Taxas Médias %
1960 a 1970	6,0
1970 a 1980	6,4
1980 a 1991	3,6
1991 a 1996	2,5
1996 a 2000	2,5
2000 a 2004	1,9

FONTE: IBGE

O município de Joinville possui uma área de 1.135,05 km² sendo 212,6 km² na área urbana e 922,45 km² na área rural e está situado na microrregião Nordeste do Estado, na região estadual de planejamento da Associação dos Municípios do Nordeste de Santa Catarina (AMUNESC), a uma distância de 180 km de Florianópolis.



Figura 2.4 – Localização de Joinville dentro do estado de Santa Catarina

Segundo o IBGE (2006), Joinville ocupa o primeiro lugar do PIB per capita no estado de Santa Catarina, e segundo o PNUD (2000) possui um dos mais altos Índices de Desenvolvimento Humano (IDH) (0,857), entre os municípios brasileiros, ocupando a décima terceira posição.

Segundo a Prefeitura de Joinville, este município possui um total aproximado de 127.301 domicílios e registra um déficit habitacional de cerca de 8.000 domicílios. Não existe um tipo de residência predominante no município.

O sistema de coleta e tratamento dos resíduos sólidos na cidade de Joinville é realizado por meio de concessão à empresa Ambiental Saneamento e Concessões (Engepasa Ambiental Ltda.). Trata-se de uma empresa especializada na execução de obras e serviços de limpeza urbana, incluindo: coleta, transporte, tratamento e disposição final dos resíduos sólidos.

A empresa possui a concessão dos serviços de coleta domiciliar; coleta seletiva; coleta dos resíduos dos serviços de saúde; ampliação e operação do aterro sanitário; implantação e operação de autoclave; varrição; serviços gerais de limpeza; capina mecanizada.

Segundo o Poder Judiciário de Santa Catarina:

“1. Os valores cobrados pela Engepasa Ambiental Ltda. a título de remuneração pelos serviços de “coleta e transporte de resíduos domiciliares”, popularmente conhecida como “taxa de lixo”, não tem natureza tributária. Trata-se de remuneração de serviço delegado mediante concessão à pessoa jurídica de direito privado, portanto, de tarifa ou de “preço público”.”

A empresa concessionária é responsável por fazer a cobrança da coleta de resíduos na cidade de Joinville, que é realizado através da emissão de boletos bancários, separadamente da cobrança do IPTU, não sendo considerado um imposto tributário.

O tratamento e destinação final dos resíduos são realizados conforme o tipo do resíduo coletado. Cabe à prefeitura definir o local de tratamento e o destino dos resíduos. No caso de Joinville, a infra-estrutura de tratamento do lixo é apresentada na tabela 2.6.

TABELA 2.6. LOCAL DE TRATAMENTO E DESTINO DOS RESÍDUOS EM JOINVILLE

Tipo de Resíduo	Tratamento
Urbano	Coleta domiciliar executada por setores diariamente atendendo 100% da área urbana. O destino final é o aterro sanitário.
Rural	Coleta do lixo domiciliar não orgânico com frequência de até três vezes por semana dependendo da atividade da região. São atendidos cinco roteiros rurais.
Industrial	Grandes geradores têm coleta terceirizada. Resíduos Classes I e II são transportados para aterros industriais (Curitiba ou Blumenau) e resíduos Classe III vão para o aterro sanitário de Joinville.
Hospitalar	Coleta diferenciada que atende todos os estabelecimentos de saúde. Os resíduos hospitalares são tratados em valas sépticas no aterro sanitário de Joinville.
Comercial	Pequenos geradores são atendidos pela coleta domiciliar, grandes geradores têm coleta terceirizada.

FONTE: AMBIENTAL SANEAMENTO E CONCESSÕES, 2009 (Retirado de http://www.ambsc.com.br/serv_coletas.htm)

Com relação a tabela 2.6 anterior, vale ressaltar que uma das classificações empregadas para caracterizar o lixo é:

- Classe I - Perigosos: apresentam risco à saúde pública ou ao meio ambiente, possuindo uma ou mais das seguintes propriedades: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade;
- Classe II – Não inertes: tem propriedades como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade, porém, não se enquadram como resíduos da classe I ou III;
- Classe III - Inertes: não têm constituinte solubilizado em concentração superior ao padrão de potabilidade de águas.

2.3 ÁREA ANALISADA NESTE TRABALHO

Neste trabalho foi utilizada para análise quanto ao roteamento de caminhões de coleta de lixo, uma área do município de Joinville conforme mostrado na figura 2.5, que compreende aproximadamente 9 km², na qual reside aproximadamente uma população de 35.000 habitantes. Esta região é urbana, predominando casas e condomínios residenciais, que caracteriza homogeneidade para a definição dos grupos de coletas. Atualmente, a área está dividida em cinco setores, sendo que

cada setor é atendido por um caminhão, um motorista e por uma equipe de dois ou três profissionais (garis) destinada à coleta dos resíduos nas residências.



Figura 2.5 – Mapa da região analisada de Joinville, dividida em cinco setores

Esta área selecionada para o trabalho está localizada na região leste de Joinville, e é composta principalmente do bairro Aventureiro e uma pequena área do

bairro Jardim Iririu. O bairro Aventureiro é hoje o mais populoso de Joinville, no qual estima-se que, atualmente, residam 40.000 habitantes. Na tabela 2.7, a seguir, são fornecidas algumas informações sobre o bairro Aventureiro (IBGE, 2000).

TABELA 2.7. INFORMAÇÕES SOBRE BAIRRO AVENTUREIRO DE JOINVILLE

População	30.316 habitantes
Atividade Econômica	110 indústrias
	416 pontos comerciais 823 prestadores de serviços
Educação	4 escolas municipais
	2 Centros de Educ. Infantil
Ação Social	4 clubes de mães
	1 grupo de 3ª idade

FONTE: IBGE (2000)

O problema da coleta de resíduos sólidos, tratado neste trabalho, é formulado com base no processo diário de coleta desenvolvido na referida área selecionada e, por este motivo, foi necessário extrair características da região, atividades e os veículos utilizados na coleta.

A empresa acompanha tanto por setor, quanto por dia, a pesagem de sua carga, o caminhão utilizado, a hora de saída e de chegada do caminhão, o tempo de duração da coleta, a quantidade de km percorrido e o número de viagens necessárias para atender o setor naquele dia. O principal objetivo da empresa é prever sua demanda e distribuir os setores de coleta de forma que minimize o número de viagens.

O procedimento adotado, atualmente, para definir os setores é empírico, com base em observações das áreas e análises dos poucos dados coletados. Não é adotado nenhum método para definição do trajeto a ser percorrido pelo caminhão, ficando sob responsabilidade do motorista definir o melhor trajeto, o qual depende do conhecimento prévio do setor antes de iniciar a coleta.

Na figura 2.6, é apresentada a rota percorrida pelo motorista em um dos setores da área escolhida em um determinado dia. Observou-se que este setor (setor 08) sofreu uma pequena alteração em comparação com a figura 2.5, tendo sido retiradas duas ruas e incluídas outras duas ruas, o que não apresentou impacto na distância total percorrida.

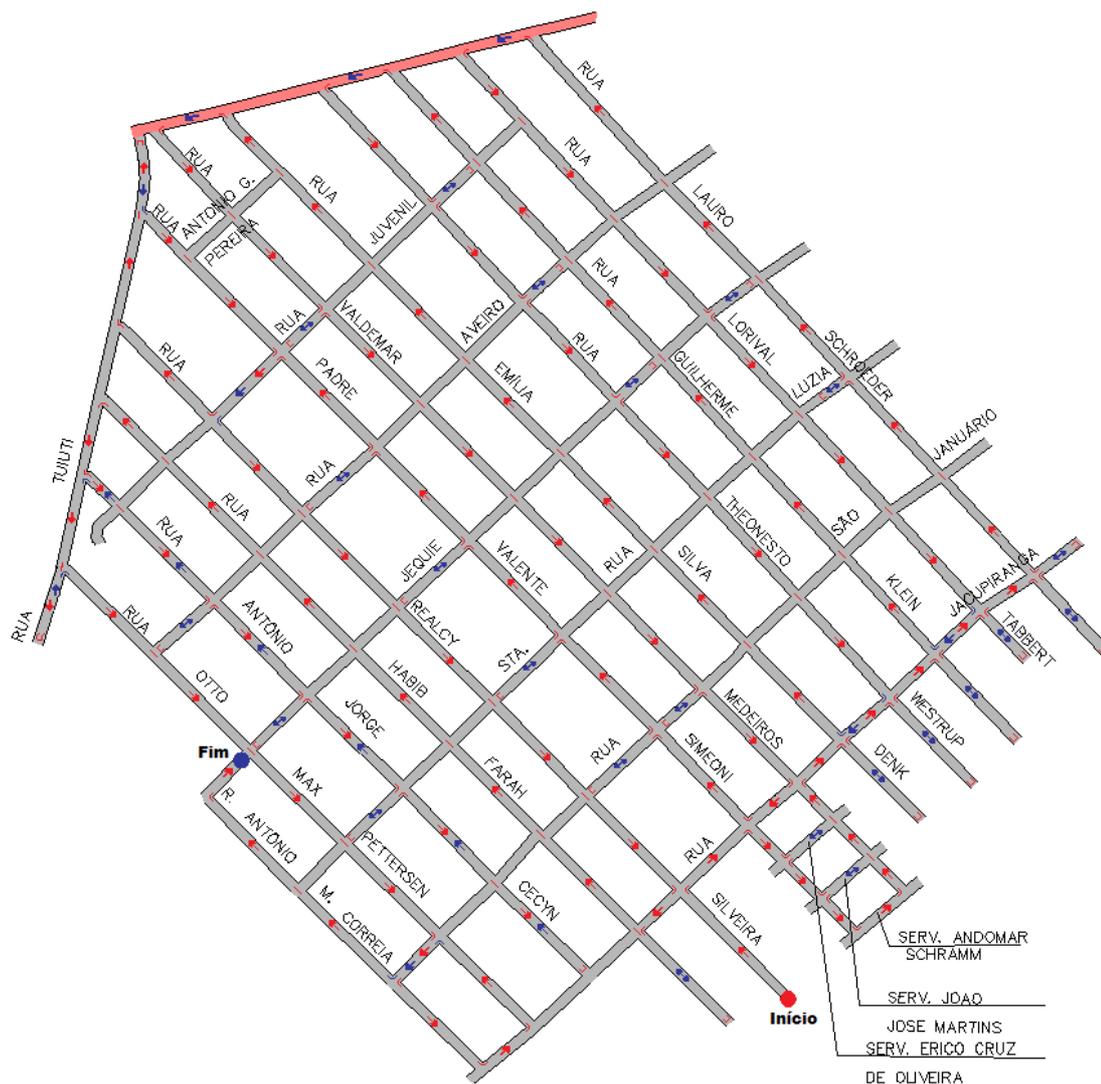


Figura 2.6 – Trajeto percorrido pelo caminhão no setor 08

Este trajeto foi realizado no dia 15 de maio de 2009, percorrendo uma distância de aproximadamente 21 km para coletar os resíduos em todas as residências. A distância total gasta, neste dia, para ir até o ponto inicial de coleta, fazer a coleta, levar os resíduos até o aterro e voltar ao ponto de origem foi de 65 km.

Desta forma, verifica-se que a maior distância não é gasta no roteamento da coleta resíduos, mas nos trajetos para se deslocar da garagem ao ponto inicial de coleta, do ponto final de coleta ao aterro sanitário e deste até a garagem.

Como a distância entre a garagem e o aterro sanitário é grande, cerca de 15.400 metros, todos os setores de coleta possuem esta mesma característica: o percurso do roteamento para a coleta de resíduos menor que a distância total

percorrida por um caminhão. Na tabela 2.8, a seguir, tem-se 17 leituras realizadas no setor 08 nos meses de abril e maio de 2009.

TABELA 2.8. PRODUÇÃO DA COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS DO SETOR 08

Data	Hr Saída	Hr Chegada	Nº viagem	Peso (kg)	Km Total	Duração
01/04/2009 Quarta-feira	05:54	11:50	1	7180	62	05:56:00
03/04/2009 Sexta-feira	05:03	12:03	1	8960	78	07:00:00
06/04/2009 Segunda-feira	05:00	12:40	1	10400	65	07:40:00
08/04/2009 Quarta-feira	06:12	12:52	1	7300	67	06:40:00
10/04/2009 Sexta-feira	05:01	11:09	1	7400	64	06:08:00
13/04/2009 Segunda-feira	05:03	12:01	1	10220	64	06:58:00
15/04/2009 Quarta-feira	05:39	11:54	1	7300	65	06:15:00
17/04/2009 Sexta-feira	05:00	11:18	1	8060	66	06:18:00
20/04/2009 Segunda-feira	05:00	12:02	1	11300	64	07:02:00
22/04/2009 Quarta-feira	05:55	12:08	1	7920	62	06:13:00
24/04/2009 Sexta-feira	05:05	11:18	1	8800	62	06:13:00
27/04/2009 Segunda-feira	05:03	13:03	1	12300	73	08:00:00
29/04/2009 Quarta-feira	05:50	12:08	1	7420	66	06:18:00
01/05/2009 Sexta-feira	05:02	11:09	1	7600	62	06:07:00
04/05/2009 Segunda-feira	06:08	13:21	1	10080	71	07:13:00
06/05/2009 Quarta-feira	05:17	11:28	1	8940	65	06:11:00
08/05/2009 Sexta-feira	05:07	11:33	1	7840	62	06:26:00
Média					66	
Desvio Padrão					4,42	

A dificuldade em definir os setores e trajetos dos caminhões influencia diretamente no custo de coleta dos resíduos sólidos. Portanto, a definição dos setores de atendimento, assim como o roteamento de veículos de coleta de resíduos sólidos em cada um deles, deve buscar um itinerário ideal de coleta, tendo como objetivo minimizar a distância total de viagem (distâncias: entre a garagem e o ponto inicial de coleta; dentro do setor; entre o ponto final de coleta e o aterro; entre o aterro e a garagem), reduzindo os custos operacionais dos caminhões. Para tanto, foram consideradas algumas restrições como a capacidade dos veículos, a distância

máxima que estes devem percorrer, o tempo de viagem, a frequência, o número de equipes, dentre outros.

Neste trabalho são resolvidos, basicamente, dois problemas: definição dos 5 setores de atendimento através da abordagem do problema de p -medianas ($p = 5$), seguido do agrupamento de pontos de demanda e o de roteamento dos veículos em cada um dos 5 setores, abordado através do problema de cobertura de nós.

3 TRABALHOS CORRELATOS

Este capítulo aborda alguns trabalhos relacionados ao problema tratado nesta pesquisa: coleta de resíduos, cobertura de arcos, problema de roteamento de veículos, formação de agrupamento, problema de p -medianas e do problema do carteiro chinês.

WEBER, *apud* LOBO (1998), em um trabalho publicado em 1909, buscava a localização de uma indústria de modo a minimizar os custos de transporte da matéria-prima e também os custos de transporte do produto até o consumidor. O autor considerou uma área onde existia somente um único mercado consumidor e duas regiões fornecedoras de matéria-prima. Este trabalho é tido como a gênese da teoria da localização.

TEITZ e BART (1968) propuseram um método aproximado para encontrar a mediana de um grafo ponderado. O método consiste na procura de uma solução através de troca de vértices, a partir de uma solução inicial. Esse método é descrito e utilizado neste trabalho. CHRISTOFIDES (1975) trabalhou com os problemas de localização de facilidades e roteamento de veículos. Seus trabalhos deram início ao estudo de algoritmos de resolução para estes problemas, contendo formulações matemáticas estruturadas para os problemas dos p -centros, p -medianas e o problema do caixeiro viajante.

BEZERRA (1995), utilizou o modelo das p -medianas para a localização de postos de coleta para apoio ao escoamento de produtos extrativistas, num estudo de caso aplicado ao babaçu, no estado do Piauí, visando racionalizar o trabalho de transporte entre o local de coleta e o local de processamento. Para a otimização do problema foram utilizados três algoritmos: o algoritmo de Floyd para determinar as distâncias mínimas entre cada nó que compõe a rede viária, o algoritmo das p -medianas para localização dos postos de coleta, e um algoritmo genético para encontrar as distâncias e o roteiro para os problemas do caixeiro viajante.

SMIDERLE; STEINER e WILHELM (2004) propuseram uma solução para o trabalho de leitura dos medidores das contas de água dos clientes efetuado por uma empresa de saneamento básico do município de Pato Branco, PR. A metodologia utilizada apresentou duas fases: a primeira formando os grupos de atendimento para

cada leitorista, onde foi utilizada a meta-heurística Algoritmo Genético e posteriormente para refinar a resposta foi aplicado a heurística clássica de Teitz e Bart e, a segunda, propondo a melhor rota a ser seguida, de modo a minimizar a distância a ser percorrida pelos leitoristas, utilizando o algoritmo do Carteiro Chinês.

SMIDERLE; DAL PIVA e TIBES (2005), a partir de dados geográficos e populacionais da área urbana do município de Pato Branco, PR, observou-se a necessidade de se implantar ou re-alocar unidades farmacêuticas de maneira descentralizada, com o intuito de minimizar a distância média do deslocamento da população a esse tipo de facilidade (farmácia). A metodologia adotada neste trabalho é a utilização das heurísticas: Algoritmo Genético e Algoritmo de Teitz e Bart. O algoritmo genético foi aplicado com sucesso para a determinação de p -facilidades, este algoritmo foi combinado com o algoritmo de Teitz e Bart produzindo, a partir da solução inicial do algoritmo genético um refinamento expressivo na solução final.

CAPRI e STEINER (2006) propuseram uma solução para a otimização no serviço de estacionamento rotativo, em Ponta Grossa, PR. O objetivo era obter de forma eficaz e eficiente a distribuição dos trechos de quadra em setores a serem percorridos pelos orientadores (fiscais) e a determinação das áreas compostas por estes setores, de forma a minimizar a distância total a ser percorrida pelos mesmos, otimizando o seu trabalho de fiscalização. Neste trabalho foram utilizados os algoritmos de Teitz e Bart; Algoritmos Genéticos e Busca Tabu e suas combinações. O algoritmo de Busca Tabu mostrou uma leve superioridade em relação aos demais. Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios, pois o programa desenvolvido, além de obter a otimização de todo o processo, elabora de forma automática todos os mapas de setores e áreas a serem fiscalizados pelos orientadores e supervisores, respectivamente, permitindo que qualquer alteração seja feita de forma automática sem causar maiores transtornos.

ROSÁRIO *et al.* (2001) propuseram uma metodologia para a distribuição espacial de Unidades de Saúde 24 horas para a cidade de Curitiba, PR, com o objetivo de minimizar a distância média de deslocamento dos usuários, desde suas residências até a unidade mais próxima. Foram utilizados os algoritmos genéticos, o algoritmo de Teitz e Bart, a busca exaustiva e os diagramas de Voronoi. As heurísticas apresentadas trouxeram resultados satisfatórios para a determinação de soluções para o problema das p -medianas, indicando as melhores localizações para

se implantar as US 24 horas, os algoritmos genéticos foram mais eficientes que o algoritmo de Teitz e Bart. O algoritmo para a determinação do diagrama de Voronoi resolveu analiticamente a determinação das áreas de proximidades das US 24 horas.

GONÇALVES; STEINER e ZAMBONI (2005) propuseram uma metodologia para a obtenção de rotas para serviços de entrega, aplicado ao estudo de caso da distribuição de água mineral para a cidade de Itú, SP. Neste trabalho foram aplicados os seguintes algoritmos: o Algoritmo das p -medianas de Teitz e Bart (para a determinação de p -medianas), o Algoritmo modificado de Gillett e Johnson (para a agrupamento dos pontos de demanda em torno das p -medianas), e os algoritmos dos *Savings* de Clarke e Wright, da Inserção do Mais Próximo, da Busca Tabu e algumas de suas combinações (para a obtenção das rotas de distância mínima, ou seja, da seqüência dos pontos dentro de cada *cluster*) comparativamente. A melhor solução obtida para o caso real abordado (distribuição de água mineral) foi através da aplicação da Busca Tabu e, também, através do algoritmo dos *Savings* de Clarke e Wright seguido da Busca Tabu e, ainda, através do algoritmo da Inserção do Mais Próximo seguido da Busca Tabu.

CORRÊA *et al.* (2004) utilizaram a metaheurística Busca Tabu, para otimizar a designação de candidatos ao vestibular da Universidade Federal do Paraná, de maneira que os candidatos prestassem as provas nos locais mais próximos de suas residências. No caso do Algoritmo Genético, foram utilizados, além dos operadores genéticos usuais, também um operador heurístico chamado “hipermutação direcionada”; já no caso da heurística Busca Tabu foram utilizadas memórias de curto e longo prazo para controlar a busca.

NUNES (1998) mostra uma abordagem para um problema real de roteamento de veículos, objetivando racionalizar o sistema de transporte dos funcionários de uma empresa, de forma a reduzir a quantidade de veículos utilizados, além de minimizar as distâncias das rotas percorridas pelos veículos. Utilizando os Algoritmos Genéticos, o autor encontrou as p -medianas (p pontos notáveis dentre os diversos pontos de parada) para determinação das “sementes” dos *clusters* e, também utilizou os Algoritmos Genéticos para construção de uma seqüência para coleta dos funcionários em cada um dos *clusters* (rotas). A formação dos *clusters* foi determinada a partir da utilização de uma variação do algoritmo de designação de Gillett e Johnson.

COSTA *et al.* (2001) desenvolveram um estudo para a otimização da entrega de correspondências dos serviços postais, realizando o trabalho em duas fases: a primeira dividindo a região de estudo em sub-regiões e a segunda utilizando algoritmos de cobertura de arcos e de cobertura de nós, para realizar a tarefa de roteamento em cada sub-região. Foram utilizadas heurísticas em ambas as fases, com destaque para a segunda, onde utilizou-se o Algoritmo do Carteiro Chinês como proposta de solução para o problema de cobertura de arcos.

PAES (2004) desenvolveu um estudo com uma proposta para o gerenciamento da coleta e transporte do lixo domiciliar, tendo como objetivo minimizar os custos financeiros. Este trabalho descreve sobre a modelagem da coleta do lixo doméstico, efetuado por um caminhão compactador, formulada por meio de modelos de Programação Linear Inteira e da resolução de um dos modelos apresentados. Foi utilizado um algoritmo baseado na Metaheurística GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*), para resolver o Problema do Carteiro Chinês Misto, proposto para a otimização da rota executada pelo veículo coletor em seu respectivo setor de coleta. São apresentadas também, algumas comparações entre os valores (custos) das soluções aproximadas resultantes do algoritmo proposto e suas respectivas soluções ótimas, obtidas do modelo de Programação Linear Inteira. Os algoritmos foram comparados, usando grafos gerados (instâncias) a partir da malha viária da cidade de Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro.

SHERAFAT (2004) desenvolveu um estudo para determinar um circuito de custo mínimo que cobre um dado subconjunto de arcos, arestas e nós de um grafo misto, sujeito a algumas restrições nos vértices. O método proposto oferece uma solução para resolver problemas de roteamento de arcos, como o Problema do Carteiro Chinês Misto, o Problema do Carteiro Rural e suas variações. A solução proposta é baseada numa transformação polinomial do grafo que possibilita a solução do problema resultante como um Problema de Caixeiro Viajante padrão. Resultados computacionais confirmam a eficiência do método na obtenção de soluções próximas da ótima para problemas razoavelmente grandes. Os testes realizados em um problema real de coleta de lixo mostraram a potencialidade do método em resolver problemas práticos, não apenas na sua forma clássica, mas também na forma real, envolvendo algumas restrições adicionais.

SIMONETTO e BORENSTEIN (2006) apresentam a concepção, modelagem e implementação de um sistema de apoio à decisão aplicado ao planejamento operacional da coleta seletiva de resíduos sólidos. Para seu desenvolvimento, foi utilizada a combinação de técnicas advindas da Pesquisa Operacional, quais sejam: a simulação de eventos discretos e algoritmos/heurísticas para o problema da alocação e roteamento de veículos. Na formulação matemática do problema de roteamento de veículos utilizou-se do modelo decisório, como base inicial, o modelo de Fisher e Jaikumar (1981), alterações básicas no modelo original se fizeram necessárias devido às características peculiares do problema de coleta seletiva de resíduos. Para a validação foram utilizados dados da coleta seletiva de Porto Alegre, Rio Grande do Sul. Especificamente para o estudo de caso realizado obteve-se uma melhora de 8,82%, em média, para os percursos; e uma redução de 17,89% no número de viagens.

APAYDIN e GONULLU (2007), desenvolveram um estudo para otimização das rotas de coleta de lixo da cidade de Trabzon, localizada no nordeste da Turquia, que possui aproximadamente 185.000 habitantes, levando em conta dados sobre a rede rodoviária, a demografia e a produção de resíduos sólidos. As rotas foram geradas por um sistema de informações geográficas, onde foram cadastrados 777 pontos em toda a cidade. Depois de obter as rotas otimizadas, as mesmas foram comparadas com as rotas atuais. O sucesso pelo processo de otimização foi aproximadamente de 24,7% na distância e 44,3% no tempo para a coleta de resíduos sólidos.

KARADIMAS *et al.* (2005) utilizaram o algoritmo de otimização Colônia de Formigas para definir as melhores rotas, aplicado ao problema de coleta de resíduos sólidos urbanos. A proposta para o sistema de gerenciamento de coleta de resíduos sólidos tem por base em um banco de dados geográfico suportado por um sistema de informações geográficas. O objetivo do sistema proposto é identificar a melhor relação custo-benefício para um cenário alternativo na coleta de resíduos e transportes, estimar o custo e simular o procedimento de coleta de resíduos sólidos. O estudo de caso abrange uma área de aproximadamente 0,45 km², com uma população de 8.500 habitantes.

BRASILEIRO E LACERDA (2002) objetivam em seu trabalho analisar o uso de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) no sistema de coleta de resíduos sólidos domiciliares em uma cidade de pequeno porte. O estudo de caso realizou-se

na cidade de Ilha Solteira, SP, que possui uma população de aproximadamente 24.000 habitantes. A aplicação do SIG/TransCAD, escolhida para fazer a análise dos dados, contribuiu para o planejamento de rotas de coleta de resíduos sólidos domiciliares. Através dos resultados obtidos pôde-se concluir que a aplicação do TransCAD reduziu o percurso total do veículo coletor em termos de distância e tempo de percurso.

RODRIGUES (2007) propôs uma solução para o transporte de funcionários da empresa Hidrelétrica Itaipu Binacional, localizada no município de Foz do Iguaçu. Para resolver o problema utilizou a aplicação do algoritmo das p-medianas de Teitz e Bart, medianas essas que representam o número de veículos a serem utilizados. Em seguida, aplicou o Algoritmo de Designação de Gillett e Johnson Modificado com o objetivo de designar os pontos de parada a cada veículo. Por último, utilizou o algoritmo de Otimização por Colônias de Formigas aplicado ao Problema do Caixeiro Viajante com a finalidade de determinar a ordem em que os pontos serão visitados, construindo desta maneira as rotas. Os resultados obtidos se mostraram melhores em comparação com os adotados pela empresa.

STERN e DROR (1978) aplicaram as técnicas do Algoritmo do Carteiro Chinês, no estudo das rotas dos Leituristas de Medidores Elétricos, num problema de roteamento de arcos orientados. O resultado apresentou uma redução de 40% no número de trabalhadores necessários, mostrando a aplicabilidade deste estudo.

4 METODOLOGIA UTILIZADA

Pode-se encontrar uma vasta literatura de estudos realizados na área de coleta de resíduos sólidos, utilizando técnicas e métodos da área de Pesquisa Operacional para o seu desenvolvimento (Huang, Baetz e Patry, 1998; Chang e Wei, 2000; Bhat, 1996; Everett e Shahi, 1997; Kulcar, 1996; Transkanen, 2000; Tung e Pinnoi, 2000; Weintraub, Martell e Gunn, 1998; Paes, 2004; Barão, 2008; Apaydin, 2004; Sherafat, 2004). Dentre os trabalhos pesquisados, muitos são desenvolvidos abordando problemas de coleta seletiva de resíduos sólidos, sendo que os trabalhos que tratam de problemas de cobertura de arcos, na sua maioria, utilizam pequenas áreas para exemplificar a solução.

A metodologia utilizada neste trabalho, apresentada na figura 4.1, consistiu basicamente das seguintes etapas:

- 1) Estudo exploratório do problema de coleta de resíduos sólidos urbanos, onde o problema foi caracterizado e estruturado;
- 2) Desenvolvimento da solução, através da identificação de algoritmos matemáticos capazes de resolver o problema;
- 3) Desenvolvimento computacional da solução, utilizando-se de diversas tecnologias (recursos computacionais modernos, conforme apresentado na seção 4.3.2), para o cadastramento dos pontos, cálculo das distâncias e, também, dos algoritmos matemáticos;
- 4) Validação da solução, por intermédio de testes para verificar se os resultados obtidos estão de acordo com a realidade observada.

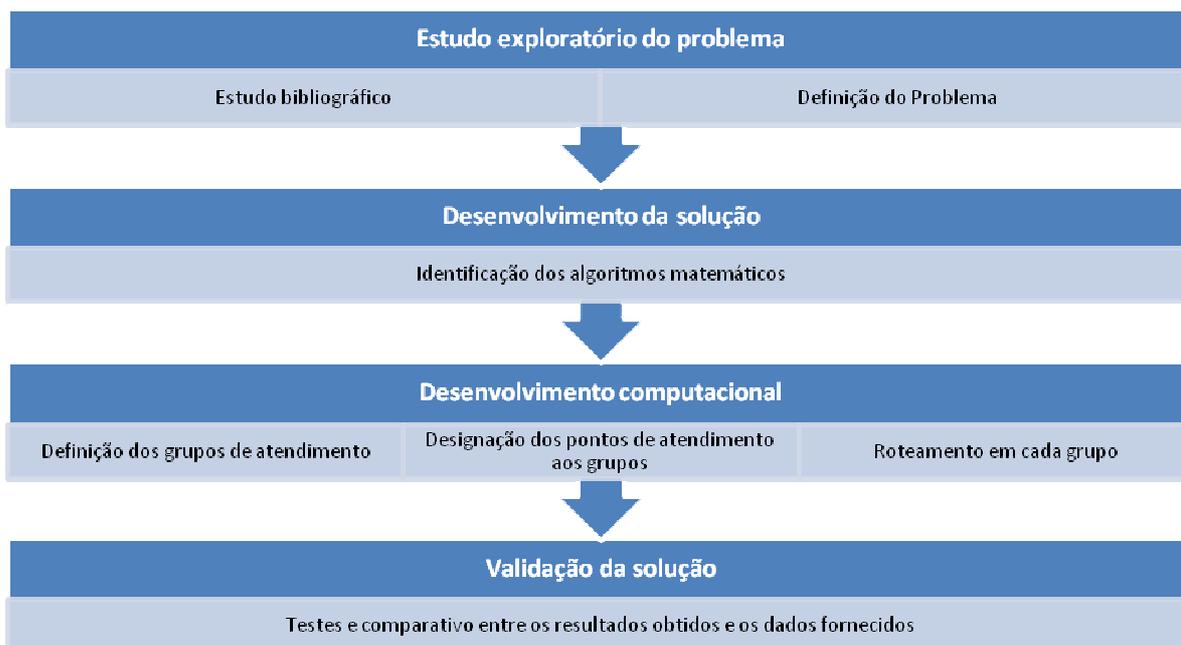


Figura 4.1 – Metodologia do trabalho

4.1. ESTUDO EXPLORATÓRIO DO PROBLEMA DE COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Na 1ª. etapa, estudo e estruturação do problema, foram realizadas entrevistas com os responsáveis pela coleta de resíduos de Joinville, SC, e, também, pesquisa bibliográfica dos estudos realizados sobre técnicas da área de Pesquisa Operacional aplicadas a problemas semelhantes.

Nesta etapa foi detalhado o problema de coleta de resíduos em Joinville, descrito no capítulo 2, e também foi realizado o estudo de trabalhos correlatos ao problema de coleta de resíduos os quais foram descritos no capítulo 3.

Também foi feito um estudo exploratório da situação atual da coleta de resíduos, transporte, tratamento e disposição final dos resíduos sólidos no município de Joinville, através de entrevistas e pesquisas bibliográficas.

O objetivo principal nesta fase foi definir, através dos estudos, as técnicas de Pesquisa Operacional que poderiam ser utilizadas na solução do problema de coleta de resíduos sólidos, principalmente, na etapa de roteamento de veículos.

Segundo GOLDBARG (2000), os problemas de roteamento, em geral, poderiam ser classificados em duas grandes classes: Roteamento em Grafos e Roteamento de Veículos propriamente dito. A classe geral dos problemas de Roteamento de Grafos seria constituída pelas seguintes subclasses:

- 1) Problema de Roteamento de Nós (associados aos ciclos Hamiltonianos);
- 2) Problemas de Roteamento de Arcos (associados aos ciclos Eulerianos).

Dentre as subclasses, apresentadas por GOLDBARG (2000), o problema de coleta de resíduos sólidos se caracteriza como um problema de roteamento de arcos, por necessitar a formação de um ciclo Euleriano, onde o caminhão de coleta deve passar por todos os arcos uma única vez.

Segundo SMIDERLE (2001), os problemas de cobertura de arcos determinam um caminho mínimo através de uma rede tal que todos os arcos sejam atravessados uma única vez. Este problema, conhecido na literatura como o Problema do Carteiro Chinês (PCC), tem muitas aplicações como, por exemplo, problemas do setor público incluindo varredura de ruas, coleta de lixo, roteamento de carteiros, inspeção de linhas de água, eletricidade ou gás, dentre outros.

4.2. DESENVOLVIMENTO DA SOLUÇÃO

A 2ª. etapa deste trabalho consistiu na identificação dos algoritmos matemáticos capazes de apresentar uma solução para o problema de roteamento da coleta de resíduos em Joinville.

Para atender ao problema descrito no capítulo 2, identificou-se a necessidade, primeiramente, de determinar quais regiões serão atendidas pelos cinco caminhões. Portanto, o problema a ser tratado divide-se em dois:

- 1º. Divisão da área estudada em cinco grupos, sendo que cada grupo será atendido por um caminhão, para isso na formação dos grupos de atendimentos dividiu-se o problema dois:
 - I. Formular o problema da p -medianas, utilizando o algoritmo de Teitz e Bart, para definir as cinco medianas;
 - II. Realizar a designação dos trechos das ruas para cada uma das cinco medianas, utilizando o algoritmo de Gillett e Johnson.
- 2º. Roteamento do percurso dentro dos diferentes grupos, conforme apresentado na figura 4.2, utilizando o Algoritmo do Carteiro Chinês para construir os roteiros.

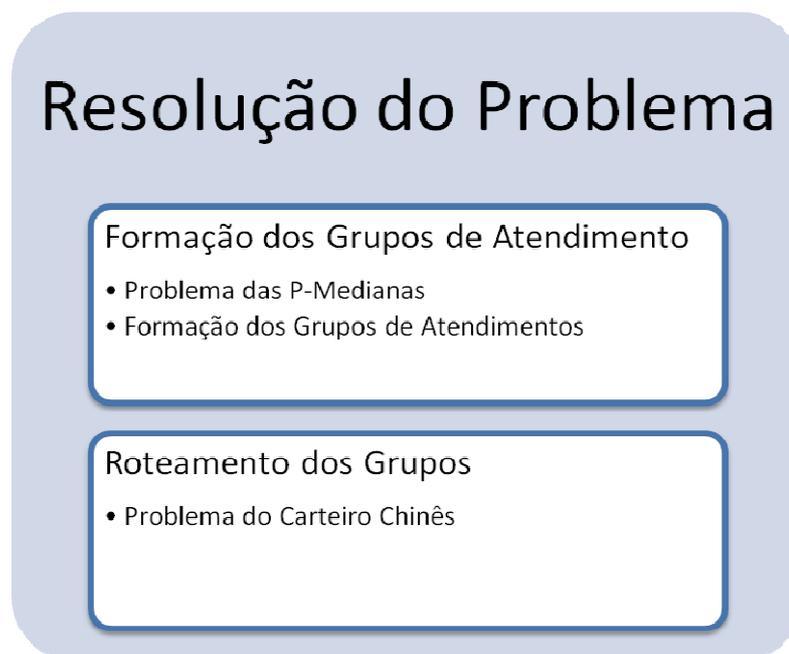


Figura 4.2 – Fases para a resolução do problema

4.2.1 Problema das p -Medianas

Suponha que se queira construir algumas farmácias e que, para isso, se tenha algumas opções de localização, surgindo assim uma pergunta: "*Quais as melhores localizações para se implantar as farmácias a fim de que as distâncias percorridas pelos usuários sejam mínimas, observado o sistema viário?*". Esta pergunta caracteriza um problema das p -medianas (ROSÁRIO *et al.*, 2001).

Assim, o problema das p -medianas consiste em determinar a localização, em uma rede, de p facilidades (medianas) de um conjunto pré-definido n ($n > p$) de candidatas, minimizando-se a soma das distâncias de cada ponto de demanda à sua mediana mais próxima.

As primeiras formulações do problema das p -medianas foram apresentadas em HAKIMI, 1964, onde são apresentados dois teoremas fundamentais para a obtenção de soluções para o problema das p -medianas.

Foram desenvolvidos, para o problema das p -medianas, métodos heurísticos e métodos que exploram uma busca em árvore (MARANZANA, 1964; TEITZ e BART, 1968), que utilizam o método *branch-and-bound* (JARVINEN e RAJALA, 1972), a heurística *simulated annealing* (GALVÃO e CHIYOSHI, 2000), técnicas baseadas em relaxação Lagrangeana e otimização de sub-gradientes (BEASLEY e CHIYOSHI, 1993) e a heurística Lagrangeana/*surrogate* (LORENA *et al.*, 2001).

A seguir, são apresentadas algumas formas para se resolver o problema das p -medianas.

a) Formulação matemática para o problema das p -medianas

A formulação a seguir, proposta por CHRISTOFIDES (1975), apresenta o problema de localização das p -medianas como um Problema de Programação Linear Inteira Binária.

Seja $[\xi_{ij}]$ uma matriz de alocações, onde:

$$\xi_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o vértice } x_j \text{ é alocado ao vértice } x_i, \text{ sendo } i \neq j; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

e, além disso :

$$\xi_{ii} = \begin{cases} 1, & \text{se o vértice } x_i \text{ é um vértice mediana, sendo } i = j; \\ 0, & \text{caso contrário,} \end{cases}$$

então, o problema das p -medianas pode então ser formulado como segue:

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} \xi_{ij} \quad (4.1)$$

sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n \xi_{ij} = 1 \quad \text{para } j=1, \dots, n \quad (4.2)$$

$$\sum_{i=1}^n \xi_{ii} = p \quad (4.3)$$

$$\xi_{ij} \leq \xi_{ii} \quad \text{para todo } i, j=1, \dots, n \quad (4.4)$$

$$\xi_{ij} = 0 \text{ ou } 1 \quad (4.5)$$

onde $[d_{ij}]$ é a matriz de distâncias ponderadas cujos valores são determinados de acordo com o problema. A função objetivo (4.1) minimiza a soma das distâncias dos vértices de demanda até o conjunto de medianas. As restrições (4.2) asseguram que todo vértice x_j seja alocado a um, e somente um vértice mediana x_i . As restrições (4.3) asseguram que existe exatamente p vértices medianas. As restrições (4.4)

garantem que as alocações só podem ser feitas a vértices-medianas. As restrições (4.5) garantem que ξ_{ij} são variáveis binárias, podendo assumir o valor 0 ou 1.

Se as restrições (4.5) forem reformuladas para $\xi_{ij} \geq 0$, então o problema resultante seria um Problema de Programação Linear. Em função do problema ser formulado como um Problema de Programação Linear Inteira Binária, por si só já é bastante complexo e, dependendo da cardinalidade de nós do grafo, a sua resolução se torna inviável. Sendo assim, formas de resolução aproximadas (heurísticas) são analisadas.

b) Descrição do Algoritmo de Teitz e Bart

Para a determinação das áreas de coleta de lixo a serem utilizadas para cada um dos caminhões, utilizou-se o algoritmo das p -medianas de Teitz e Bart (TEITZ e BART, 1968). Esta heurística é baseada na substituição de vértices e o seu objetivo é, a partir de uma solução inicial, melhorar o valor da função objetivo a cada iteração.

Considerando-se todos os vértices do grafo como potenciais medianas, o algoritmo de Teitz e Bart para o problema das p -medianas pode ser definido como segue: seja $G(V, A)$ um grafo não direcionado onde V são os seus vértices e A as suas arestas. Seja v_i um vértice qualquer pertencente a V e sejam conhecidas as distâncias entre todos os vértices de V . Chama-se **número de transmissão** do vértice v_i , ($\sigma(v_i)$), a soma das menores distâncias existentes entre o vértice v_i e todos os outros vértices v_j do grafo G . Sendo n o número total de vértice do grafo, o número de transmissão $\sigma(v_i)$ é dado por:

$$\sigma(v_i) = \sum_{j=1}^n w_j d(v_i, v_j), v_i, v_j \in V \quad (4.6)$$

onde, $d(v_i, v_j)$ é a menor distância entre v_i e v_j , e w_j é um peso associado ao vértice v_j .

Assim, v_m é uma mediana se, entre todos os vértices do grafo, é aquela que produz a menor soma total das distâncias desde si própria até cada um dos outros vértices do grafo.

Assim sendo, tem-se:

$$\sigma(v_m) = \text{mínimo}\{\sigma(v_i)\}, \forall v_i \in V \quad (4.7)$$

Para o problema de encontrar p -medianas ($p > 1$), seja $V_p \subset V$ e $|V_p| = p$, calcula-se:

$$d(V_p, v_j) = \text{mínimo}\{d(v_i, v_j)\}, \forall v_i \in V_p, v_j \in V \quad (4.8)$$

$$\sigma(V_p) = \sum_{j=1}^n w_j d(V_p, v_j), \forall v_j \in V \quad (4.9)$$

Dessa maneira, um conjunto de p vértices é a solução ótima para o problema das p -medianas se, entre todos os outros conjuntos de p vértices do grafo, é aquele que produz a menor distância total desde si próprio até todos os outros vértices do grafo. Portanto, deve-se ter:

$$\sigma(V_p \text{ solução ótima}) = \text{mínimo}\{\sigma(V_p)\}, \forall V_p \subset V \quad (4.10)$$

O objetivo do algoritmo das p -medianas de Teitz e Bart é, portanto, encontrar um conjunto V_p em V para o qual o número de transmissão seja mínimo.

Esta heurística é fácil de ser implementada e produz boas soluções. No entanto, foram necessárias algumas modificações para o problema das 5-medianas, descritas mais adiante, com o objetivo de diminuir o tempo de processamento sem alterar o resultado final.

O procedimento básico do algoritmo das p -medianas de Teitz e Bart é descrito a seguir.

Passo 0 - Selecione, aleatoriamente, um conjunto $V_p \subset V$, com $|V_p| = p$ para formar uma solução inicial para o problema.

Passo 1 - Rotule todos os vértices $v_i \in \{V - V_p\}$ como “não analisados”.

Passo 2 - Enquanto existirem vértices não analisados em $\{V - V_p\}$ faça o seguinte:

Selecione um vértice não analisado $v_i \in \{V - V_p\}$ e calcule a redução Δ_{ij} do número de transmissão, para todos os vértices v_j pertencentes a V_p , ou seja:

$$\Delta_{ij} = \sigma(V_p) - \sigma(V \cup \{v_i\} - \{v_j\}), \forall v_j \in V_p$$

Faça $\Delta_{ij_máximo} = \text{máximo}[\Delta_{ij}]$, para todo Δ_{ij} calculado anteriormente.

Se $\Delta_{ij_máximo} > 0$ então:

Faça $V_p = (V_p \cup \{v_i\} - \{v_j\})$ e insira v_j em $\{V - V_p\}$

Rotule v_j como “analisado”.

Caso contrário, continue.

Passo 3 – Se durante a execução do Passo 2, houver alguma modificação no conjunto V_p , então:

Volte ao Passo 2 e continue a execução do algoritmo.

Caso contrário, PARE e apresente o conjunto V_p como uma solução aproximada para o problema das p -medianas.

b1) Modificação proposta para o Algoritmo de Teitz e Bart

O algoritmo de Teitz e Bart encontra a solução através de uma procura exaustiva, que quando aplicado a problemas de maior porte provoca uma explosão combinatorial.

Por este motivo, para resolver o problema das 5-medianas para o problema proposto, foi feita uma alteração no Passo 2, que consiste em`
 Testar inicialmente a distância entre cada um dos vértices v_j pertencentes a V_p com os vértices $v_i \in \{V - V_p\}$. Caso os vértices da nova formação $V \cup \{v_i\} - \{v_j\}$ estejam muito próximos, então conclui-se que o algoritmo está realizando uma combinação de p -medianas desnecessária, sendo que o cálculo da redução (Δ_{ij}) do número de transmissão $\sigma(v_i)$, para estes casos, não precisa ser calculado (DETOFENO e STEINER, 2009a) e (DETOFENO e STEINER, 2009b).

Incluindo um parâmetro que determine uma distância mínima entre as p -medianas, diminui-se o número de combinações para o cálculo do Δ_{ij} e, desta forma, o algoritmo de Teitz e Bart não gera uma explosão combinatorial no cálculo do Δ_{ij} . Esta é uma modificação bastante importante ao tratar com problemas maiores, ou seja, com um número grande de pontos.

4.2.2 Formação dos Grupos de Atendimento

A obtenção das medianas, para o problema da coleta de resíduos, servirá como “pontos de apoio” para a formação dos grupos de atendimento para cada um dos caminhões. A determinação dos grupos para cada caminhão, considerando cada trecho de rua a ser atendido como um ponto de demanda, será feita através do algoritmo de designação de Gillett e Johnson (1974).

O algoritmo de Gillett e Johnson (BODIN *et al.*, 1983) procura alocar um ponto de demanda a uma mediana, utilizando como fator de decisão um valor que representa a urgência com que o ponto de demanda deve ser alocado. Frequentemente, o critério utilizado é a razão entre a primeira e a segunda menores distâncias do ponto de demanda até a mediana.

A seguir, está descrito o algoritmo de designação proposto por Gillett e Johnson com uma adaptação que inclui a restrição de capacidade.

Passo 1 - Calcule a distância entre cada nó i ainda não designado, até cada uma das medianas (caminhões), cujos caminhões correspondentes ainda possuam “capacidade” que, neste trabalho, é a distância a ser percorrida pelo caminhão. A capacidade média de cada caminhão é dada por: $Capacidade = (distância\ total / 5)$; neste trabalho será de aproximadamente 70 km;

Passo 2 - Para cada nó i do passo anterior, obter t_i^1 como sendo o depósito mais próximo de i e t_i^2 como sendo o segundo depósito mais próximo de i , com distâncias iguais a c_i^1 e c_i^2 , respectivamente;

Passo 3 – Para todos os nós i dos passos anteriores calcule a razão $r_i = c_i^1 / c_i^2$. Ordene os nós i de acordo com os valores r_i , em ordem crescente. Esta lista determina a ordem em que os nós serão designados a cada uma das medianas; aqueles nós relativamente próximos a uma mediana serão considerados primeiro;

Passo 4 – Percorra a lista do passo anterior, designando os nós i às medianas mais próximas, até que a “capacidade” de alguma delas fique esgotada. Neste caso, retire todos os nós i já designados e a mediana (caminhão) com “capacidade” esgotada e volte ao Passo 1.

Através da designação dos pontos a cada uma das 5 medianas, são obtidas as áreas de atendimento, ou seja, grupos de pontos a serem atendidos por caminhão.

4.2.3 Problema do Carteiro Chinês (PCC)

Segundo GOLDBARG (2000), um dos mais antigos problemas da teoria de grafos é o da determinação de um percurso sobre um grafo G que contenha toda aresta de G exatamente uma vez (KARP, 1975). Tal circuito é denominado de Euleriano, pelo fato Euler ter sido o primeiro a reportar um estudo sobre a sua determinação, no ano de 1736.

O PCC é um problema de otimização que objetiva cobrir com um percurso (ou *tour*) todos os arcos do grafo, minimizando a distância total percorrida. O percurso do carteiro distingui-se do circuito (ou ciclo) Euleriano por nele ser permitida, se necessário, a repetição de arestas. Claramente no caso do grafo possuir circuitos Eulerianos, tais circuitos solucionam o problema. O PCC é um exemplo de um problema de roteamento que admite solução em tempo polinomial (EDMONDS e JOHNSON, 1973).

O PCC, de acordo com a natureza da rede, classifica-se em:

- Problema do Carteiro Chinês Não Direcionado (PCCND);
- Problema do Carteiro Chinês Direcionado (PCCD);
- Problema do Carteiro Chinês Misto (PCCM);
- Problema do Carteiro Rural (PCR) como uma variante do PCC, uma vez que consiste em calcular uma rota que atende somente um subconjunto $R \subseteq A$ de arcos (EISELT; GENDREAU; LAPORTE, 1995).

Segundo GOLDBARG (2000), Kwan Mei-Ko foi o primeiro a relatar PCCND em uma publicação datada de 1962 (MEI-KO,1962) no periódico "Chinese Mathematics". Em virtude de sua origem, o problema ficou denominado como Problema por Carteiro Chinês.

A formulação matemática do PCC, segundo BODIN *et al.* (1983), é apresentada a seguir:

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (4.11)$$

sujeito a:

$$\sum_{k=1}^n x_{ki} - \sum_{k=1}^n x_{ik} = 0 \quad i = 1, \dots, n \quad (4.12)$$

$$x_{ij} + x_{ji} \geq 1 \quad \forall (i, j) \in A \quad (4.13)$$

$$x_{ij} \geq 0 \text{ inteiras} \quad (4.14)$$

onde:

x_{ij} = número de vezes em que a aresta (i, j) é percorrido de i para j ;

c_{ij} = comprimento ou o custo da aresta (i, j) .

No modelo matemático proposto a função objetivo (4.11) minimiza o custo total, ou seja, a distância total a ser percorrida. As restrições em (4.12) garantem a continuidade da rota; as restrições em (4.13) que nenhuma aresta deixará de ser considerada e, em (4.14), tem-se que as variáveis do problema são não negativas, inteiras.

Segundo GOLDBARG (2000), como em todo grafo existe um número par de nós de grau ímpar, se denominarmos por d_i o grau do nó i e por $|E| = m$ o número

de arestas, então $\sum_i d_i = \sum_{i \in \text{ímpar}} d_i + \sum_{i \in \text{par}} d_i = 2m$, pois cada aresta possui dois nós

extremos. Como a primeira parcela da soma é par, a segunda também será.

Considere N_i o conjunto de nós de grau ímpar em G e por N_p o conjunto de nós de grau par e, ainda, N o conjunto de todos os nós. Desde que o número de nós de grau ímpar seja par, $|N_i|$ é par. Utilizando este fato, pode-se particionar N_i em dois

conjuntos e formar $k = \frac{1}{2} \cdot \frac{|N_i|}{2}$ caminhos entre pares de nós distintos. As arestas

(aqui denominadas por E^*) contidas nesses caminhos são acrescentadas ao grafo original G como arcos artificiais, obtendo-se um grafo $G_i(E^*)$. Uma solução viável do

PCC origina-se dos k caminhos que ligam os k pares de nós ímpares. De acordo com CHRISTOFIDES (1975), o problema então se reduz a determinar os melhores k

caminhos que ligam os k pares do nó ímpares. Sua idéia de solução é a de transformar o PCC em um problema de determinação de um ciclo Euleriano em um grafo convenientemente expandido.

A solução exata deste problema pode ser obtida em $O(n^3)$ como mostra PAPADIMITRIOU e STEIGLITZ (1992). EDMONDS e JOHNSON (1973) apresentam um interessante algoritmo para a solução do PCC via *matching* (emparelhamento). Pode-se resumir o algoritmo da seguinte forma (GOLDBARG,2000):

INÍCIO

Ler o grafo $G(N, A)$

Se todos os nós em G , o grafo original, possuem grau par então **determinar** um ciclo Euleriano em G e Fim.

Organizar um grafo K_n da seguinte forma:

Reunir todos os vértices de grau ímpar no grafo K_n e **associar** a cada par de vértices i e j no grafo, uma aresta (i, j) com peso igual ao caminho mais curto que liga i a j no grafo G .

Determinar o 1-*matching* mínimo em K_n, M^* .

Para cada aresta pertencente a M^* **associar** uma nova aresta em G no caminho mínimo que ela representa, obtendo um grafo G_n .

Determinar a solução do carteiro chinês que é representada por um ciclo Euleriano em G_n .

FIM

4.3. DESENVOLVIMENTO COMPUTACIONAL

Esta seção apresenta a descrição do desenvolvimento computacional da proposta do presente trabalho, bem como de cada um dos métodos utilizados neste trabalho e descritos nas seções anteriores deste capítulo, começando pelo algoritmo das p -medianas de Teitz e Bart, seguido do algoritmo de Gillett e Johnson que faz as designações e, por fim, do algoritmo PCC responsável pela criação das rotas. A obtenção dos dados e dos resultados é apresentada no capítulo 5.

4.3.1 Fases do desenvolvimento computacional

O desenvolvimento computacional dos algoritmos para a solução do problema foi dividido em duas fases distintas, conforme apresentado na figura 4.2.

1ª. Fase: Formação dos Grupos de Atendimento

Esta 1ª. fase foi dividida em duas etapas, conforme consta na figura 4.2: na 1ª. etapa foram obtidas as 5-medianas para que as mesmas pudessem servir como “pontos de apoio” para a formação dos 5-grupos de atendimento, uma para cada caminhão; para tanto, foi utilizada a heurística de Teitz e Bart. Na 2ª. etapa foram definidos os 5-grupos de atendimento (pontos de demanda; trechos de ruas) para cada caminhão, através do algoritmo de designação de Gillett e Johnson.

1ª. Etapa: Obtenção das 5-medianas

Nesta etapa, os resultados da aplicação do algoritmo de Teitz e Bart foram comparados através de duas formas para se obter as distâncias entre os pontos geográficos. A primeira forma foi gerar a matriz de distâncias entre os pontos geográficos utilizando o cálculo da distância Euclidiana; a segunda forma foi utilizar o cálculo do menor trajeto entre as ruas. No capítulo 5 são detalhadas as duas formas utilizadas.

Além disso, foi feita uma pequena modificação no próprio algoritmo de Teitz e Bart de tal forma a se obter um menor tempo de processamento. A alteração, conforme descrita na seção 4.2.1, consistiu em incluir um parâmetro “distância mínima das medianas” igual a 700 metros (valor este definido após simulações), fazendo com que as combinações geradas entre as 5-medianas não possa ter uma distância inferior a 700 metros entre elas; caso contrário, a combinação é descartada. A figura 4.3, a seguir, apresenta um exemplo de uma combinação descartada pelo programa. Os resultados gerados e tempo de processamento são apresentados no capítulo 5.



Figura 4.3 – Exemplo de uma combinação inválida para geração das 5-medianas

2ª. Etapa: Formação dos grupos de atendimento (*Clusters*)

Na 2ª. etapa foram definidos os 5-grupos de atendimento para cada caminhão. Isso foi obtido através do algoritmo de designação de Gillett e Johnson. No método proposto por Gillett e Johnson, conforme apresentado na seção 4.2.2, os pontos de demanda são designados aos depósitos (medianas; caminhões) de acordo com o algoritmo, considerando a restrição de capacidade.

O critério utilizado é a razão entre a distância do ponto de demanda à primeira mediana mais próxima e a segunda mais próxima. No algoritmo, foi proposto que cada grupo atenda em torno de 70 km, que equivalem aproximadamente 20 km de trajeto na área de coleta de resíduos.

2ª. Fase: Roteamento em cada Grupo de Pontos de Demanda

Já na 2ª. fase, o roteamento dentro de cada um dos grupos obtidos na 1ª. fase, caracteriza um problema de cobertura de arcos, que foi resolvido utilizando o Algoritmo do Carteiro Chinês. Nesta 2ª. fase obtém-se, de forma rápida e eficiente, o

caminho otimizado que será percorrido pelo caminhão com a menor distância em sua respectiva área.

Para exemplificar a solução do roteamento de coleta de resíduos, utilizou-se um setor da área escolhida, denominada setor 08 (Aventureiro), conforme figura 2.1, melhor detalhada na figura 4.4. Este setor é atendido atualmente por um caminhão, sendo que, desta forma, pode-se comparar os resultados obtidos aplicando o Algoritmo do Carteiro Chinês com os dados fornecidos pela empresa responsável pela coleta de resíduos de Joinville.



Figura 4.4 – Detalhamento do Setor 08, da figura 2.1, bairro Aventureiro

4.3.2 Tecnologias utilizadas para o desenvolvimento computacional

No desenvolvimento computacional utilizou-se vários programas e tecnologias distribuídos gratuitamente através de *sites* na WEB (ou WWW - *World Wide Web*). Para a obtenção dos dados utilizou-se os programas *Google Earth*, *API* do *Google Maps* e a linguagem de programação *PHP*. No desenvolvimento dos algoritmos utilizou-se o *Oracle Database 10G Express*.

a) *Google Earth*

Google Earth é um programa desenvolvido e distribuído pelo *Google* cuja função é apresentar um modelo tridimensional do globo terrestre, construído a partir de fotografias de satélite obtidas de fontes diversas, imagens aéreas (fotografadas de aeronaves) e sistema de informações geográficas 3D. Desta forma, o programa pode ser usado simplesmente como um gerador de mapas bidimensionais e fotos de satélite ou como um simulador das diversas paisagens presentes no planeta Terra. Com isso, é possível identificar lugares, construções, cidades, paisagens, entre outros elementos.

A utilização do *Google Earth* no trabalho está relacionada à obtenção dos pontos geográficos da região de Joinville, SC. O *Google Earth* gera um arquivo KML (detalhado abaixo) que possui todos os pontos cadastrados.

b) *KML (Keyhole Markup Language)*

O *KML*, ou *Keyhole Markup Language* (linguagem de marcação de *Keyhole*), possui formato de arquivo e gramática *XML (EXtensible Markup Language - Linguagem extensível de formatação)* que serve para modelar e armazenar características geográficas como pontos, linhas, imagens, polígonos e modelos para exibição no *Google Earth*, no *Google Maps* e em outros aplicativos. O processamento de um arquivo *KML* no *Google Earth* é semelhante ao de arquivos *HTML* e *XML* em navegadores da *WEB*. Assim como o *HTML*, o *KML* tem uma estrutura de *tags* com nomes e atributos usados para finalidades de exibição específicas. Desta forma, o *Google Earth* funciona como navegador de arquivos *KML*.

Com a utilização do arquivo *KML* gerado pelo *Google Earth* conseguiu-se cadastrar os pontos geográficos na base de dados. Assim, foi possível obter as distâncias reais entre os pontos, necessárias para os algoritmos aplicados ao problema de roteamento. Na figura 4.5, tem-se um exemplo de arquivo *KML*.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<kml xmlns="http://earth.google.com/kml/2.2">
<Document>
  <Folder>
    <name>Rota 08</name>
    <open>1</open>
    <Placemark>
      <name>Guilherme Klein</name>
      <LookAt>
        <longitude>-48.80683240915403</longitude>
        <latitude>-26.24032465265673</latitude>
        <altitude>0</altitude>
        <range>708.0407941196743</range>
        <tilt>0</tilt>
        <heading>-0.2946112003468945</heading>
        <altitudeMode>relativeToGround</altitudeMode>
      </LookAt>
      <styleUrl>#msn_placemark_square95000</styleUrl>
      <Point>
        <coordinates>-48.80740927700165,-26.24096572110779,0</coordinates>
      </Point>
    </Placemark>
  </Folder>
</Document>
</kml>
```

Figura 4.5 – Exemplo do arquivo *KML* gerado pelo *Google Earth*

c) *Google Maps API*

A *API* (*Application Programming Interface* ou Interface de Programação de Aplicativos) do *Google Maps* permite incorporar o *Google Maps* em uma página da *WEB*. A *API* fornece diversos utilitários para manipular mapas e adicionar conteúdo ao mapa através de diversos serviços. A *API* do *Google Maps* é um serviço gratuito em fase beta de teste, disponível para qualquer site que seja gratuito para os consumidores.

Neste trabalho foi utilizado a *API* do *Google Maps* para calcular a distância total entre dois pontos geográficos. Este cálculo da melhor rota, fornecido pela *API*, considera a direção e o sentido das ruas. As distâncias fornecidas pela *API* foram utilizadas para substituir o cálculo da distância Euclidiana, em geral utilizado no algoritmo de Teitz e Bart.

d) *PHP*

PHP é uma linguagem que permite criar *sites WEB* dinâmicos, possibilitando uma interação com o usuário através de formulários, parâmetros da *URL* e *links*. A

diferença do *PHP* com relação a linguagens semelhantes a *Javascript* é que o código *PHP* é executado no servidor, sendo enviado para o cliente apenas *HTML*. Desta maneira, é possível interagir com bancos de dados e aplicações existentes no servidor, com a vantagem de não expor o código fonte para o cliente.

A utilização da linguagem *PHP* neste trabalho foi necessária para passar parâmetros de controle e buscar os valores de retorno da *API* do *Google Maps*. Desta maneira, foi possível cadastrar as distâncias, fornecidas pela *API* do *Google Maps*, na base de dados.

e) *Oracle Database 10g Express Edition*

O *Oracle Database 10g Express Edition (Oracle Database XE)* é uma versão básica simplificada do banco de dados, baseada no código do *Oracle 10g Release 2* para desenvolvimento, implementação e distribuição gratuitos. O *Oracle Database XE* é ideal para:

- Desenvolvedores que trabalham em aplicativos *PHP*, *Java*, *NET*, *XML*, e de código aberto;
- *DBAs* que precisam de um banco de dados para fins de treinamento e implementação;
- Fornecedores de *softwares* independentes e fornecedores de *hardware* que necessitam de um banco de dados inicial para distribuir gratuitamente;
- Instituições educacionais e alunos que precisam de um banco de dados gratuito para seu plano de estudos.

O *Oracle Database XE* pode ser instalado em uma máquina *host* de qualquer tamanho com qualquer quantidade de CPUs (uma base de dados por máquina), mas o *XE* irá armazenar até 4GB de dados do usuário, consumir até 1GB de memória e usar uma CPU na máquina *host*.

A utilização do *Oracle Database XE* foi essencial neste trabalho; utilizou-se esta ferramenta como base de dados para os pontos geográficos e para o desenvolvimento dos algoritmos em *PL/SQL (Procedural Language/Structured Query Language)*. *PL/SQL* é uma extensão da linguagem padrão *SQL* para o banco de dados *Oracle*.

5 OBTENÇÃO DOS DADOS E DOS RESULTADOS

5.1 OBTENÇÃO DOS DADOS PARA O ESTUDO DE CASO

Para a obtenção dos dados na área selecionada, utilizados no desenvolvimento da solução para o estudo de caso da cidade de Joinville, utilizou-se o programa *Google Earth* para cadastrar os pontos geográficos e o desenvolvimento de um programa computacional, utilizando a *API* do *Google Maps*, para obter as distâncias entre os pontos cadastrados no *Google Earth*.

5.1.1. Cadastramento dos pontos geográficos no *Google Earth*

No programa *Google Earth*, os pontos geográficos foram cadastrados de duas maneiras distintas.

No primeiro método, conforme ilustrado na figura 5.1, os pontos foram cadastrados com o objetivo de calcular a menor distância entre eles utilizando a distância Euclidiana, para posterior aplicação dos algoritmos de Teitz e Bart e Gillett e Johnson. Para atender a área desejada foram cadastrados 2.128 pontos no total.

A principal característica deste método é que nos trechos de quadras foram cadastrados um ou mais pontos, dependendo da distância de um cruzamento ao outro, de tal forma que a distância entre os pontos não fosse maior do que o tamanho de uma quadra a outra.

Na figura 5.1, no detalhe, verifica-se que a distância entre as quadras são de 78,92 e 68,97 metros e as distâncias entre os pontos cadastrados são de 48,42 e 48,92 metros. Desta maneira ao se utilizar o cálculo da distância Euclidiana tem-se garantido o fato de que a distância entre dois pontos é viável para o trajeto do caminhão.



Figura 5.1 – Primeiro método utilizado para cadastrar os pontos geográficos no *Google Earth*

No segundo método utilizado para obter os pontos geográficos, exemplificado na figura 5.2, o principal objetivo foi utilizar a *API do Google Maps* para calcular a menor distância entre os pontos. Desta maneira não foi necessário cadastrar os pontos entre os cruzamentos, diminuindo de 2.128 (1º. método) para 560 o número total de pontos cadastrados.



Figura 5.2 – Segundo método utilizado para cadastrar os pontos geográficos no *Google Earth*

Neste caso, conforme já comentado na seção 4.3, o *Google Earth* gera um arquivo **.KML*, com formato de arquivo e uma gramática *XML*, que serve para modelar e armazenar características geográficas para exibição no *Google Earth* no *Google Maps* e em outros aplicativos. Neste trabalho, tais potencialidades foram utilizadas para a obtenção dos pontos geográficos (Latitude e Longitude), cadastrados para “alimentar” os algoritmos implementados.

5.1.2. Obtenção das distâncias entre os pontos geográficos

Cada um dos procedimentos utilizados para cadastrar os pontos geográficos no *Google Earth*, conforme descritos na seção 5.1, teve como único objetivo buscar a melhor maneira de calcular as distâncias entre dois pontos geográficos.

A primeira forma, a mais utilizada entre os trabalhos pesquisados, foi gerar a matriz de distâncias entre os pontos geográficos utilizando o cálculo da distância Euclidiana ($d_e(x, y) = \|x - y\|$). A desvantagem na utilização deste cálculo, para o problema de roteamento da coleta de resíduos, é que as distâncias entre os pontos não consideram o trajeto (sentido das vias) executado pelo caminhão influenciando, portanto, no resultado das *p*-medianas. Na figura 5.3, está um exemplo de como é feito o cálculo da distância Euclidiana entre dois pontos de coordenadas:

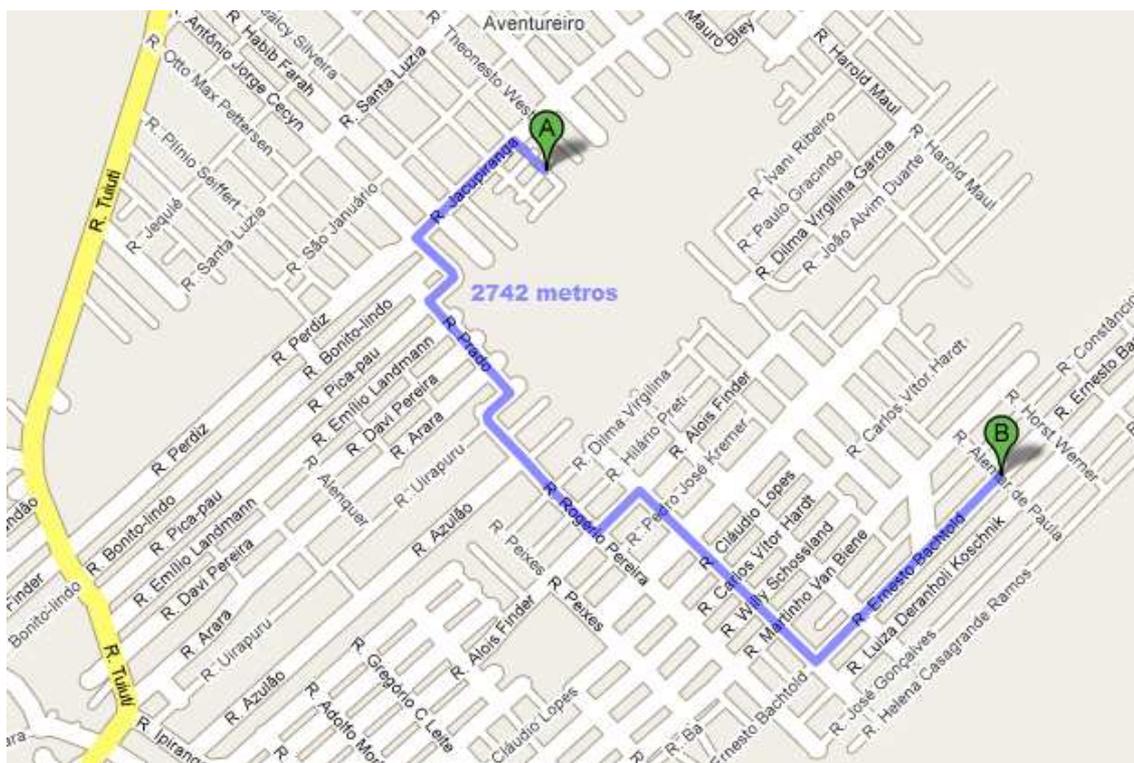


Figura 5.4 – Distância entre dois pontos utilizando o cálculo do menor trajeto entre as ruas

5.2 OBTENÇÃO DOS RESULTADOS PARA O ESTUDO DE CASO

Com a junção do desenvolvimento computacional dos algoritmos e dos dados obtidos tem-se, então, os resultados do problema abordado.

Os resultados são apresentados conforme as duas fases do desenvolvimento computacional, descrito na metodologia adotada neste trabalho, dividida em: formação dos grupos de atendimento (definição das 5-medianas; formação dos grupos) e o roteamento em cada grupo.

5.2.1 Formação dos Grupos de Atendimento

Conforme apresentado e discutido no capítulo 4, as 5-medianas são definidas utilizando-se a heurística de Teitz e Bart com a modificação proposta de só se examinar os conjuntos em que as candidatas tivessem, entre si, uma distância maior do que 700 metros. Para o cálculo das distâncias, os resultados do algoritmo foram comparados utilizando-se os dois métodos apresentados (distâncias Euclidianas e

distâncias reais). Vale ressaltar que cada uma das 5-medianas corresponde a um caminhão de coleta de lixo (e, conseqüentemente, a uma equipe de trabalho: motorista e dois garis).

Os resultados da implementação computacional do algoritmo de Teitz e Bart são apresentados na tabela 5.1. Verifica-se que o número de iterações e os resultados das 5-medianas não se altera com a utilização do algoritmo de Teitz e Bart Modificado, porém, há uma diferença significativa no tempo de processamento computacional entre ambos.

TABELA 5.1 - COMPARATIVO ENTRE OS DESEMPENHOS DOS ALGORITMOS (TEITZ E BART CLÁSSICO E TEITZ E BART MODIFICADO)

<i>Matriz de distância</i>	<i>Nr. de Pontos</i>	<i>Teitz e Bart Clássico</i>		<i>Teitz e Bart Modificado</i>		<i>Resultado 5-Mediana</i>
		<i>Tempo</i>	<i>Iterações</i>	<i>Tempo</i>	<i>Iterações</i>	
Euclidiana	2128	05:50:16	12	00:35:59	12	216;777;877; 1009;1455
Menor distância entre os pontos	560	00:04:12	9	00:02:24	9	71;477;560; 229;300

O resultado das 5-medianas encontrado pelo algoritmo de Teitz e Bart clássico, utilizando a matriz de distância Euclidiana, está na figura 5.5, onde se verifica que existem dois pontos próximos (pontos em vermelho).



Figura 5.5 – Resultado do Algoritmo de Teitz e Bart com o cálculo das distâncias Euclidianas

Utilizando os resultados anteriores, como sendo a solução inicial para o algoritmo de Teitz e Bart modificado, considerando agora as distâncias reais e a restrição mínima de 700 metros entre as medianas, as 5-medianas ficaram mais espaçadas como se observa na figura 5.6.

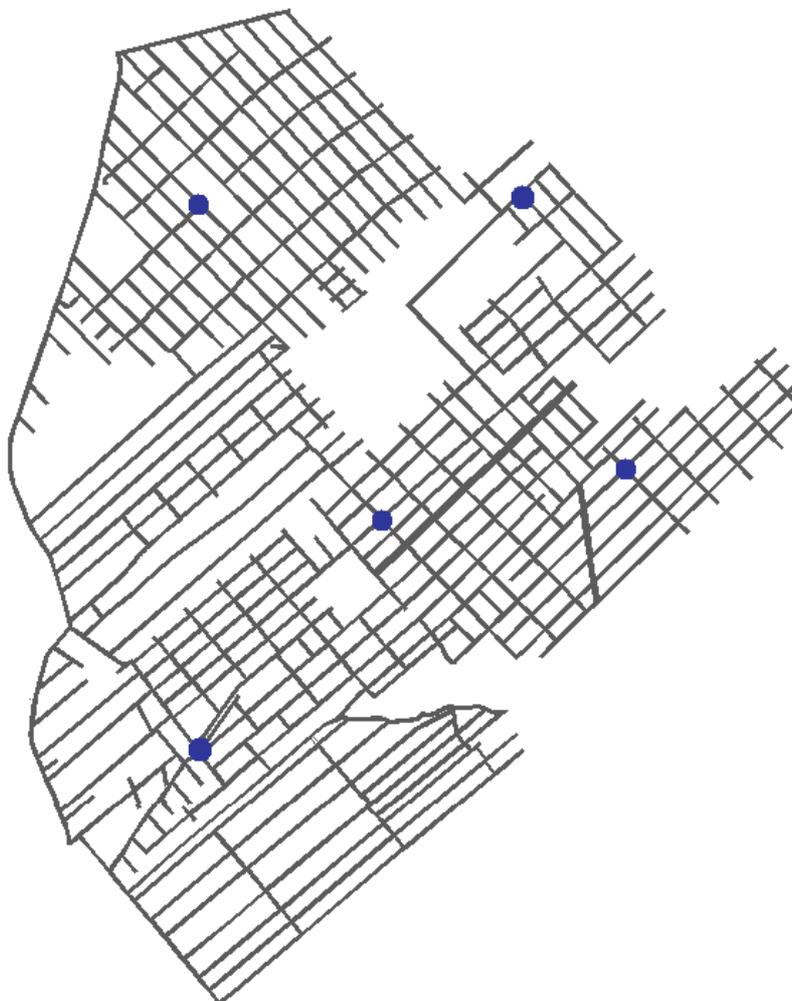


Figura 5.6 – Resultado do Algoritmo de Teitz e Bart considerando as distâncias reais

Após a obtenção das 5-medianas, precisa-se determinar o grupo de pontos de demanda a ser atendido por cada caminhão. Esta designação dos trechos de ruas é obtida através do algoritmo de designação de Gillett e Johnson, conforme já comentado.

A figura 2.5 mostrou como é definida atualmente a área de atendimento de cada caminhão na região analisada e, na figura 5.7, a seguir, tem-se o resultado da designação após a execução do algoritmo de Gillett e Johnson.

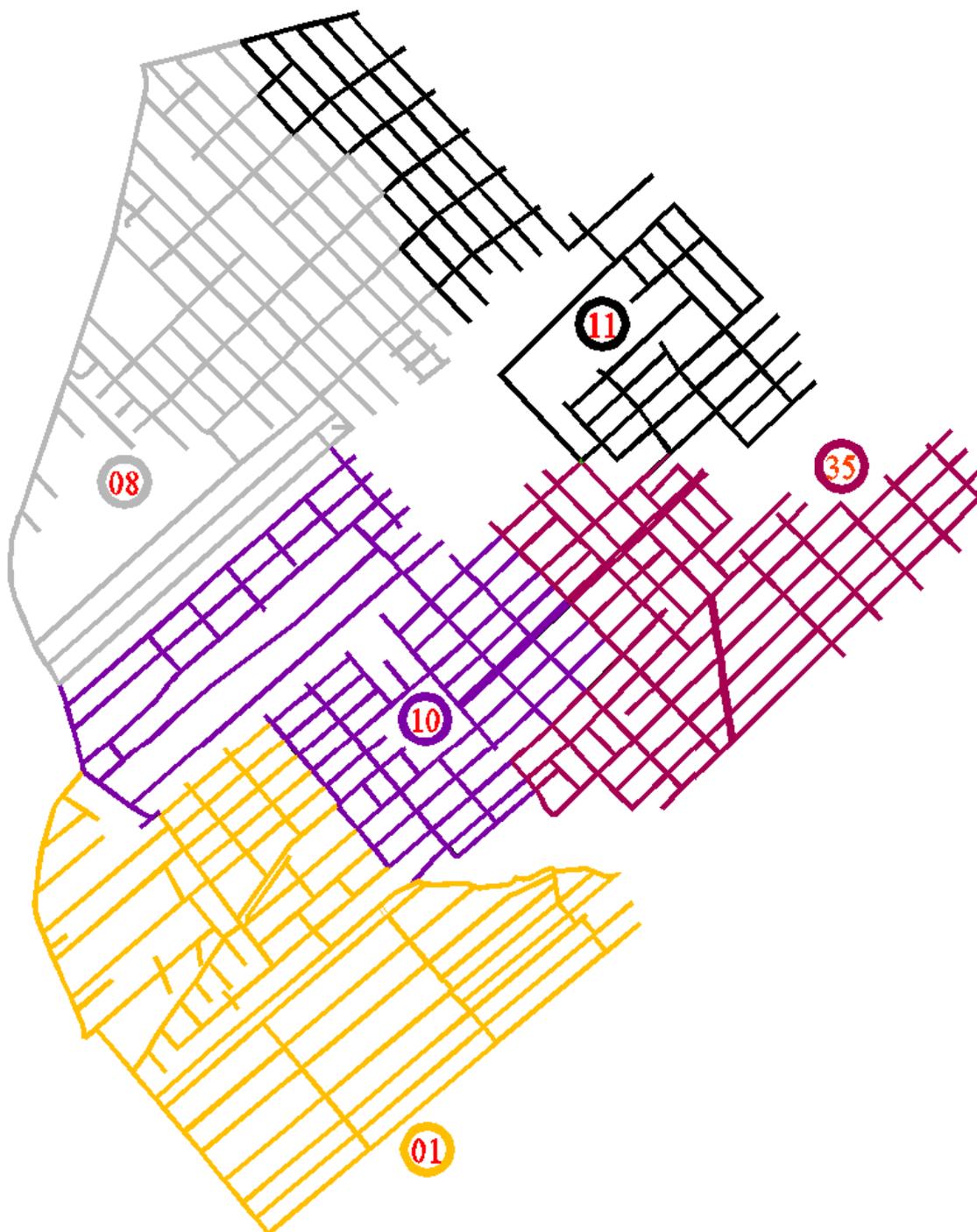


Figura 5.7 – Resultado do Algoritmo de Gillett e Johnson

5.3 ROTEAMENTO DO GRUPO 08

A última etapa do desenvolvimento computacional deste trabalho é a implementação do Algoritmo do Carteiro Chinês, que foi aplicada na Rota 08 atual, conforme detalhamento da figura 4.5.

Na figura 5.8 a seguir, tem-se a ilustração do resultado. No anexo deste trabalho tem-se o resultado com o detalhamento da seqüência dos trechos das ruas e as distâncias entre cada trecho.

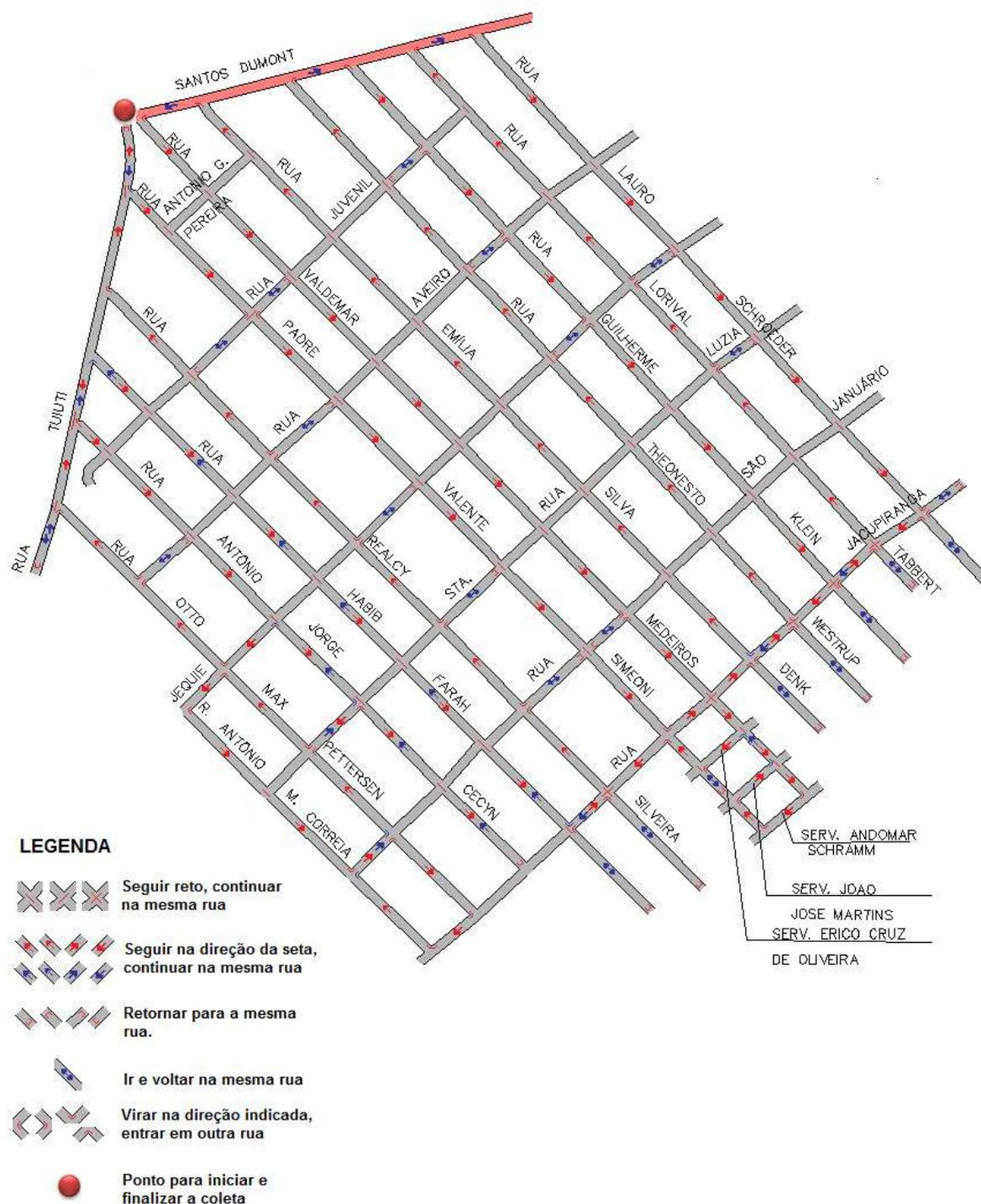


Figura 5.8 – Trajeto obtido pelo Algoritmo do Carteiro Chinês para a rota 08

A distância para percorrer todo o trajeto é de aproximadamente 19.355 metros. Verificou-se que se deve iniciar a coleta na Rua Santos Dumont esquina

TABELA 5.2 - COMPARATIVO ENTRE A MÉDIA ATUAL PARA A COLETA DE RESÍDUOS COM O RESULTADO ALCANÇADO PELO ALGORITMO DO CARTEIRO CHINÊS PARA A ROTA 08

Trajetos	Média Atual (Metros)	Resultado (Metros)	Diferença (Metros)	Diferença do Resultado (%)
Rua Barra Velha (Saída) até a rua Santos Dumont	14.500	14.500	0	0,00
Roteamento da coleta de resíduos sólidos	21.000	19.355	-1.645	7,83
Rua Santos Dumont até a rua Bororós (Aterro Sanitário)	12.000	10.300	-1.700	14,17
Rua Bororós até a rua Barra Velha (Chegada)	18.500	14.500	-4.000	21,62
Total ≈	66.000	58.655	-7.345	11,13

Nesta tabela 5.2 verifica-se que com a adoção dos procedimentos de otimização para a área analisada, pode-se ter um ganho de aproximadamente 5.700 (1.700 + 4.000) metros na área externa a área de coleta, que equivale a 8,6% (5.700/66.000) do total. Considerando apenas a área da coleta, onde foi aplicado o Algoritmo do Carteiro Chinês, obteve-se um ganho de 2,49% (1.645/66.000) em relação ao total e de 7,83% (1.645/21.000) considerando apenas a área da coleta.

Todos os trajetos apresentados na tabela 5.2 foram otimizados, mas somente o trajeto “Roteamento da coleta de resíduos sólidos” foi otimizado utilizando o Algoritmo do Carteiro Chinês.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia, composta de algoritmos matemáticos e implementação computacional, para a otimização de rotas em um problema de cobertura de arcos. O estudo de caso deu-se em uma área da cidade de Joinville, SC.

O método utilizado para obter os dados para este trabalho (distâncias Euclidianas ou reais), detalhado no capítulo 5, apresentou influência no resultado final dos algoritmos, principalmente no algoritmo de Teitz e Bart. A utilização deste algoritmo forneceu uma solução satisfatória para a determinação de 5-medianas, principalmente quando utilizada a opção de buscar a menor distância entre os pontos x e y , respeitando o trajeto das ruas (distâncias reais). A alteração proposta para o algoritmo de Teitz e Bart, incluindo um parâmetro para verificar as distâncias entre as combinações geradas, possibilitou que o problema possa ser expandido, atendendo a uma área maior.

Através do algoritmo de Gillett e Jonhson, obteve-se um resultado satisfatório na formação dos grupos a serem atendidos pelos caminhões. O trabalho apresenta a diferença entre as áreas utilizadas pela empresa responsável e as áreas obtidas através da heurística de Gillett e Jonhson (figuras 2.3 e 5.3).

A utilização do Algoritmo do Carteiro Chinês garante um roteamento otimizado, de mínima distância total, na coleta de resíduos urbanos. Na área onde o Algoritmo do Carteiro Chinês foi aplicado, obteve-se um ganho aproximado de 7,83% na Rota 08, em comparação com o roteamento realizado atualmente pelo motorista do caminhão.

Verificou-se que a empresa necessita, além de um procedimento otimizado, também tecnológico (por exemplo, a instalação de GPS nos veículos) na coleta de resíduos sólidos, que oriente e acompanhe o trajeto de saída, o percurso para o aterro sanitário e o retorno do caminhão à garagem. Com a implantação do Algoritmo do Carteiro Chinês, pode-se obter um ganho aproximado de 7,83% (tabela 5.2) em relação ao percurso total gasto atualmente para a Rota 08.

Outro aspecto importante a ser considerado é a automatização na obtenção dos pontos geográficos ou na aquisição dos mapas digitalizados, podendo ser adquiridos com empresas especializadas, e a automatização na obtenção dos agrupamentos e das rotas, de maneira rápida, eficaz e sem erros, através dos algoritmos de otimização.

O comparativo com os dados da coleta de resíduos sólidos, fornecidos pela empresa concessionária da coleta, com os resultados alcançados, mostrou que as técnicas da área de Pesquisa Operacional utilizadas são uma alternativa para a redução da distância e, por conseqüência, para a redução dos custos para a empresa.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Objetivando um aprimoramento dos resultados obtidos, são propostas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- a) Utilizar a tecnologia GPS com os algoritmos do PCC para gerar rotas otimizadas em tempo real, e orientar os motoristas nos trajetos;
- b) Utilizar mais restrições para gerar os agrupamentos (*clusters*) como, por exemplo, a quantidade de resíduos coletados, os dias da semana, o tempo gasto no trajeto, a capacidade do veículo, dentre outros;
- c) Simular os ganhos financeiros com a implementação do trabalho na região estudada, assim como para todas as demais regiões da cidade;
- d) Utilizar a técnica, apresentada neste trabalho, dos cálculos das p -medianas de Teitz e Bart modificado, com o objetivo de reduzir o tempo de processamento e atender a uma quantidade maior de pontos, a outros problemas de p -medianas, comparando os resultados com outras técnicas como, por exemplo, Algoritmos Genéticos, Colônia de Formigas, *Simulated Annealing*, dentre outras.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 1004:2004, Resíduos Sólidos – Classificação, disponível em: http://www.abnt.org.br/m5.asp?cod_noticia=30&cod_pagina=965, acessado em 09/06/2009.

AGUIAR, A.; PHILIPPI JUNIOR, A. O. **Resíduos sólidos: características e gerenciamento**. Saneamento, saúde e ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável, Barueri, SP, Manole, 2005.

AMBIENTAL SANEAMENTO E CONCESSÕES, disponível em: http://www.ambsc.com.br/serv_coletas.htm, acessado em 09/06/2009.

APAYDIN, O. **Geographical information system (GIS) supported optimization of solid waste management alternatives in Trabzon City**, Ph.D. Thesis, Yildiz Technical University, Science Institute, Environmental Engineering, Istanbul, 2004.

APAYDIN, O.; GONULLU M.T. **Route optimization for solid waste collection: Trabzon (Turkey) case study**. Global NEST Journal, vol. 9, no. 1, Istanbul-Turkey, pp 6-11, 2007.

BARÃO, F.R. **Problemas de localização e roteamento aplicados na otimização da coleta de resíduos sólidos urbanos no município de Passo Fundo-RS**. Dissertação de Mestrado, PPGEng – UPF, 2008.

BEASLEY, J.E; CHIYOSHI, F. **Lagrangean heuristic for location problems**. European Journal of Operations Research, v.65, p.383-399, 1993.

BEZERRA, O.B. **Localização de postos de coleta para apoio ao escoamento de produtos extrativistas – Um estudo de caso aplicado ao babaçu**. Dissertação de Mestrado, UFSC, 1995.

BHAT, V.N. **A model for the optimal allocation of trucks for the solid waste management**. Copenhagen-DK. Waste Management & Research, v. 14, p. 87-96, Jan. 1996.

BODIN, L.; GOLDEN, B.; ASSAD, A.; BALL, M. **Routing and Scheduling of vehicles and crews : the state of the art**. England, Pergamon Press, vol. 10. n. 2, 1983.

BRASILEIRO, L. A.; LACERDA, M. G. **Análise de uso de SIG no sistema de coleta de resíduos sólidos domiciliares em cidades de pequeno porte**. SIBESA VI, Vitória–ES, 2002.

CAPRI, M. A. V.; STEINER, M.T.A. **Otimização no serviço do estacionamento rotativo regulamentado utilizando técnicas da pesquisa operacional**. SBPO XXXVIII, Goiânia, GO, p 1413 -1423, 2006.

CARVALHO, L.E.X. **Desenvolvimento de solução integrada de sistemas de limpeza urbana em ambiente SIG**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Transportes), Rio de Janeiro–RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, 240 p, 2001.

CHANG, N.; WEI, Y. **Siting recycling drop-off in urban area by genetic algorithm-based fuzzy multiobjective nonlinear integer programming modeling**. Fuzzy Sets and Systems. Nagoya-JP. v. 114, n. 1, p. 133-149, Aug. 2000.

CHRISTOFIDES, N. **Graph Theory – An Algorithmic Approach**. New York: Academic Press, 1975.

CORRÊA, E.S.; STEINER, M.T.A.; FREITAS, A.A. & CARNIERI, C. **A Genetic Algorithm for Solving a Capacitated P-Median Problem**. Numerical Algorithms, Netherlands, v. 35, p. 373-388, 2004.

COSTA, D.M.B.; STEINER, M.T.A.; CARNIERI, C.; ZAMBONI, L.V.S.; SILVA, A.C.L. **Técnicas da Pesquisa Operacional na Otimização dos Serviços Postais**. Gestão & Produção, São Carlos, SP, v.8, n.1, p. 37-55, 2001.

DETOFENO, T.C; STEINER, M.T.A. **Otimização Das Rotas de Coleta de Resíduos Urbanos, Utilizando Técnicas de Pesquisa Operacional**, XXXII CNMAC, 2009a, Cuiabá, MT.

DETOFENO, T.C; STEINER, M.T.A. **Otimização Das Rotas de Coleta de Resíduos Urbanos: Um estudo de caso em Joinville-SC**, XLI SBPO, 2009b, Porto Seguro, BA.

EDMONDS, J.; JOHNSON, E.L. **Matching, Euler tours and the Chinese postman**. Mathematical Programming, 5: 88 – 124, 1973.

EGLESE R.W.; MURDOCK H. **Routing Road Sweepers in a Rural Area**, JORS, 4, 281-288. 1991.

EISELT, H.A.; GENDREAU, M.; LAPORTE, G. **Arc routing problems, part II: the rural postman problem**. *Operations Research*, 43(3): 399 – 414. 1995.

EVERETT, J.W.; SHAHI, S. **Vehicle and labor requirements for yard waste collection**. Waste Management & Research. Copenhagen-DK. v. 15, n. 6, p. 627-640, Dec. 1997.

FISHER, M.; JAIKUMAR, R. **A generalized assignment heuristics for vehicle routing**. Networks, v. 11, n. 22, p. 109-124, 1981.

Fundação Nacional de Saúde. **Manual de Saneamento**. 3. Ed. Rev. – Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2004.

GALVÃO, R.D.; CHIYOSHI, F. **A statistical analysis of simulated annealing applied to the p-median problem.** Operations Research, v.96 p.61-74, 2000.

GHIANI, G.; IMPROTA, G. **An algorithm for the hierarchical Chinese postman problem.** JORS 26, p. 27-32, 2000.

GILLETT, B.; JOHNSON, J. **Sweep Algorithm for the Multiple Depot Vehicle Dispatch Problem.** Proceedings of ORSA/TIMS Meeting, San Juan, Puerto Rico, October 1974.

GOLDBARG, M.C. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos.** Rio de Janeiro: Campus, 2000.

GONÇALVES, S. M. ; STEINER, M. T. A. ; ZAMBONI, L. V. S. . **Uma Metodologia para o Problema do Roteamento de Veículos - um Estudo de Caso para a Distribuição de Água Mineral.** In: XXXVII SBPO, 2005, Gramado, RS. Pesquisa Operacional e o Desenvolvimento Sustentável, 2005. v. único. p. 1047-1056.

HAKIMI, S. L. **Optimum location of switching centers and the absolute centers and medians of a graph.** Operations Research, v.12, p.450-459, 1964.

HUANG, G.H.; BAETZ, B.W.; PATRY, G.G. **Trash-Flow Allocation: Planning Under Uncertainty.** Interfaces. Hanover-MD-USA. v. 28, n. 6, p. 36-55, Jun. 1998.

IPT Lixo Municipal: Manual de Desenvolvimento Integrado. Relatório técnico, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, SP, 1995.

IBGE:2006 (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa2009/POP2009_DOU.pdf, acessado em 14/06/2009.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**, Rio de Janeiro, RJ, 2000.

JARVINEN, P.J.; RAJALA, J. **A branch and bound algorithm for seeking the p-median.** Operations Research, v.20, p.173-178, 1972.

KARADIMAS, N.V.; KOUZAS, G.; ANAGNOSTOPOULOS, I.; LOUMOS, V. **Urban Solid Waste Collection and Routing: The Ant Colony Strategic approach.** I.J. of SIMULATION, Vol. 6, No 12-13, 2005.

KARP, R.M. **On the Computacional Complexity of Combinatorial Problems.** Networks 5, p. 45-68, 1975.

KULCAR, T. **Optimizing solid waste collection in Brussels.** European Journal of Operations Research. Brussels-BE. v. 90, n. 1, p. 71-77, Apr. 1996.

LAW, A.M.; KELTON, W.D. **Simulation Modeling & Analysis.** 2° Ed. New York: McGraw-Hill, 1991.

LOBO, D.S. **Localização de Unidades de Educação Infantil: uma aplicação para creches municipais de Florianópolis**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Florianópolis (UFSC), Florianópolis, SC, 1998.

LORENA, L.A.N.; SENNE, E.L.F.; PAIVA, J.A.C.; MARCONDES, S.P.B. **Integração de modelos de localização a sistemas de informações geográficas**. In: Revista do Departamento de Engenharia de Produção. São Paulo: Universidade Federal de São Carlos, v.8, n.2, 2001.

MARANZANA, F.E. **On the location of supply points to minimize transport costs**. Operations Research Quarterly, v.15, p.261-267. 1964.

MEI-KO, K. **Graphic Programming Using Odd and Even Points**. Chinese Mathematics, vol 1, p. 273-277, 1962.

NUNES, L.F. **Algoritmos Genéticos Aplicados na Abordagem de um Problema Real de Roteirização de Veículos**. Dissertação de Mestrado, UFPR, 1998.

PAES, F.G. **Otimização de rotas para coleta do lixo doméstico: Um tratamento GRASP do Problema do Carteiro Chinês Misto (PCCM)**. Dissertação de Mestrado em Ciências de Engenharia, UENF, Campos-RJ, 116 p., 2004.

PAPADIMITRIOU, C.H.; STEIGLITZ, K. **Combinatorial Optimization Algorithms and Complexity**. Prentice-Hall, Nova York, 1992.

PNUD:2000 (Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento), Disponível em [http://www.pnud.org.br/atlas/ranking/IDH-M%2091%2000%20Ranking%20decrecente%20\(pelos%20dados%20de%202000\).htm](http://www.pnud.org.br/atlas/ranking/IDH-M%2091%2000%20Ranking%20decrecente%20(pelos%20dados%20de%202000).htm), acessado em 11/10/2008.

RODRIGUES, S.B. **A metaheurística colônia de formigas aplicada a um problema de roteamento de veículos: Caso da Itaipu Binacional**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia (UFPR), Curitiba, PR, 2007.

ROSA, S.L. **Modelo Conceitual para Planejamento e Gerenciamento de Sistemas de Resíduos Sólidos Urbanos: Fixação de diretrizes básicas**. Relatório Técnico, 1999, Disponível em <http://www.resol.com.br>.

ROSÁRIO, R.R.L.; CARNIERI, C.; STEINER, M.T.A.; FLEISHFRESSER, S.A.; CORRÊA, E.S. **Aplicação do Problema das p-medianas para determinar a Localização de Unidades de Saúde 24 Horas**. XXXIII SBPO, Campos de Jordão, SP, p. 1155-1166, 2001.

SHERAFAT, H. **Algoritmos Heuristicos de Cobertura de Arcos**, Tese de Doutorado, UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina), 174 p, 2004.

SIMONETTO, E.O.; BORENSTEIN, D. **Gestão operacional da coleta seletiva de resíduos sólidos urbanos – Abordagem utilizando um sistema de apoio à decisão**. Gestão & Produção, São Carlos, SP, v.13, n.3, p. 449-461, 2006.

SMIDERLE, A. **Técnicas da Pesquisa Operacional aplicadas a um Problema de Cobertura de Arcos**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia (UFPR), Curitiba, PR, 2001.

SMIDERLE, A.; STEINER, M.T.A. & WILHELM, V.E. **Técnicas da Pesquisa Operacional aplicadas a um Problema de Cobertura de Arcos**. TEMA (Tendências em Matemática Aplicada), SBMAC, v. 5, n.2, p. 347-356, 2004.

SMIDERLE, A.; DAL PIVA, A.; TIBES, E. **Estudo de caso da distribuição geográfica das unidades farmacêuticas do município de Pato Branco**. XXV ENEGEP, Porto Alegre, RS, 2005.

STERN H.I.; DROR M., **Routing Electric Meter Readers**, Computers & Operations Research, 6, 209-223. 1978.

TANSKANEN, J.H. **Strategic planning of municipal solid waste management**. Resources, Conservation and Recycling. Utrecht, Netherlands. v. 30, n. 2, p. 111-133, Aug. 2000.

TCHOBANOGLIOUS, G. **Solid wastes: engineering principles and management**. *Issues*. Tokyo: McGraw-Hill, 1977.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S.A. **Integrated Solid Waste Management**. McGraw Hill International Editions, 1993, 978p.

TEITZ, M.B.; BART, P. **Heuristics methods for estimating the generalized vertex median of a weighted graph**. Operations Research, v.16, p.955-961, 1968.

TUNG, D.V.; PINNOI, A. **Vehicle routing-scheduling for waste collection in Hanoi**. European Journal of Operational Research. Brussels-BE. v. 125, n. 3, p. 449-468, Sep. 2000.

WEINTRAUB, A.; MARTELL, D.; GUNN, E. **Forest Management Challenges for Operational Researchers**. European Journal of Operations Research. Brussels-BE. v. 104, n. 1, p. 1-17. Jan,1998.

ANEXO

Detalhamento do Resultado do Roteamento através do Algoritmo do Carteiro Chinês para a rota 08

Seqüência	DE	PARA	Distância (metros)
1	Santos Dumont/Valdemar Medeiros	Valdemar Medeiros/Antonio G. Pereira	144
2	Valdemar Medeiros/Antonio G. Pereira	Valdemar Medeiros/Juvenil	155
3	Valdemar Medeiros/Juvenil	Valdemar Medeiros/Aveiro	151
4	Valdemar Medeiros/Aveiro	Valdemar Medeiros/Jequie	160
5	Valdemar Medeiros/Jequie	Valdemar Medeiros/Sta Luzia	158
6	Valdemar Medeiros/Sta Luzia	Valdemar Medeiros/Sao Januario	154
7	Valdemar Medeiros/Sao Januario	Padre Valente Simeoni/Sao Januario	75
8	Padre Valente Simeoni/Sao Januario	Valdemar Medeiros/Sao Januario	75
9	Valdemar Medeiros/Sao Januario	Valdemar Medeiros/Jacupiranga	155
10	Valdemar Medeiros/Jacupiranga	Valdemar Medeiros/Serv. Eurico Cruz de Oliveira	58
11	Valdemar Medeiros/Serv. Eurico Cruz de Oliveira	Valdemar Medeiros/Serv. Joao Jose Martins	47
12	Valdemar Medeiros/Serv. Joao Jose Martins	Valdemar Medeiros/Serv. Andomar Schramm	51
13	Valdemar Medeiros/Serv. Andomar Schramm	Padre Valente Simeoni/Serv. Andomar Schramm	72
14	Padre Valente Simeoni/Serv. Andomar Schramm	Padre Valente Simeoni/Serv. Joao Jose Martins	46
15	Padre Valente Simeoni/Serv. Joao Jose Martins	Valdemar Medeiros/Serv. Joao Jose Martins	77
16	Valdemar Medeiros/Serv. Joao Jose Martins	Valdemar Medeiros/Serv. Eurico Cruz de Oliveira	47
17	Valdemar Medeiros/Serv. Eurico Cruz de Oliveira	Padre Valente Simeoni/Serv. Eurico Cruz de Oliveira	72
18	Padre Valente Simeoni/Serv. Eurico Cruz de Oliveira	Padre Valente Simeoni/Serv. Joao Jose Martins	52
19	Padre Valente Simeoni/Serv. Joao Jose Martins	Padre Valente Simeoni/Serv. Eurico Cruz de Oliveira	52
20	Padre Valente Simeoni/Serv. Eurico Cruz de Oliveira	Padre Valente Simeoni/Jacupiranga	56
21	Padre Valente Simeoni/Jacupiranga	Realcy Silveira/Jacupiranga	109
22	Realcy Silveira/Jacupiranga	Realcy Silveira	180
23	Realcy Silveira	Realcy Silveira/Jacupiranga	180
24	Realcy Silveira/Jacupiranga	Habid Farah/Jacupiranga	66
25	Habid Farah/Jacupiranga	Habid Farah	170
26	Habid Farah	Habid Farah/Jacupiranga	170

27	Habid Farah/Jacupiranga	Habid Farah/Sao Janeiro	156
28	Habid Farah/Sao Janeiro	Habid Farah/Sta Luzia	155
29	Habid Farah/Sta Luzia	Habid Farah/Jequie	151
30	Habid Farah/Jequie	Habid Farah/Aveiro	148
31	Habid Farah/Aveiro	Habid Farah/Juvenil	143
32	Habid Farah/Juvenil	Tuiuti/Habid Farah	108
33	Tuiuti/Habid Farah	Antonio Jorge Cecyn	98
34	Antonio Jorge Cecyn	Antonio Jorge Cecyn/Juvenil	50
35	Antonio Jorge Cecyn/Juvenil	Antonio Jorge Cecyn/Aveiro	154
36	Antonio Jorge Cecyn/Aveiro	Antonio Jorge Cecyn/Jequie	149
37	Antonio Jorge Cecyn/Jequie	Antonio Jorge Cecyn/Sta Luzia	149
38	Antonio Jorge Cecyn/Sta Luzia	Antonio Jorge Cecyn/Sao Janeiro	151
39	Antonio Jorge Cecyn/Sao Janeiro	Antonio Jorge Cecyn/Jacupiranga	158
40	Antonio Jorge Cecyn/Jacupiranga	Antonio Jorge Cecyn/Sao Janeiro	158
41	Antonio Jorge Cecyn/Sao Janeiro	Antonio Jorge Cecyn/Sta Luzia	151
42	Antonio Jorge Cecyn/Sta Luzia	Otto Max Pettersen/Sta Luzia	90
43	Otto Max Pettersen/Sta Luzia	Otto Max Pettersen/Jequie	152
44	Otto Max Pettersen/Jequie	Antonio M. Correia/Jequie	77
45	Antonio M. Correia/Jequie	Antonio M. Correia/Sta Luzia	148
46	Antonio M. Correia/Sta Luzia	Antonio M. Correia/Sao Janeiro	153
47	Antonio M. Correia/Sao Janeiro	Otto Max Pettersen/Sao Janeiro	74
48	Otto Max Pettersen/Sao Janeiro	Otto Max Pettersen/Jacupiranga	123
49	Otto Max Pettersen/Jacupiranga	Antonio M. Correia/Jacupiranga	74
50	Antonio M. Correia/Jacupiranga	Antonio M. Correia/Sao Janeiro	118
51	Antonio M. Correia/Sao Janeiro	Otto Max Pettersen/Sao Janeiro	74
52	Otto Max Pettersen/Sao Janeiro	Otto Max Pettersen/Sta Luzia	153
53	Otto Max Pettersen/Sta Luzia	Antonio Jorge Cecyn/Sta Luzia	90
54	Antonio Jorge Cecyn/Sta Luzia	Antonio Jorge Cecyn/Jequie	149
55	Antonio Jorge Cecyn/Jequie	Otto Max Pettersen/Jequie	95
56	Otto Max Pettersen/Jequie	Otto Max Pettersen/Aveiro	155
57	Otto Max Pettersen/Aveiro	Antonio Jorge Cecyn/Aveiro	94
58	Antonio Jorge Cecyn/Aveiro	Otto Max Pettersen/Aveiro	94
59	Otto Max Pettersen/Aveiro	Tuiuti/Tuiuti/Otto Max Pettersen/Juvenil	148
60	Tuiuti/Tuiuti/Otto Max Pettersen/Juvenil	Antonio Jorge Cecyn	118
61	Antonio Jorge Cecyn	Tuiuti/Habid Farah	98
62	Tuiuti/Habid Farah	Habid Farah/Juvenil	108
63	Habid Farah/Juvenil	Habid Farah/Aveiro	143
64	Habid Farah/Aveiro	Habid Farah/Jequie	148
65	Habid Farah/Jequie	Habid Farah/Sta Luzia	151

66	Habid Farah/Sta Luzia	Habid Farah/Sao Januario	155
67	Habid Farah/Sao Januario	Habid Farah/Jacupiranga	156
68	Habid Farah/Jacupiranga	Realcy Silveira/Jacupiranga	66
69	Realcy Silveira/Jacupiranga	Realcy Silveira/Sao Januario	154
70	Realcy Silveira/Sao Januario	Padre Valente Simeoni/Sao Januario	110
71	Padre Valente Simeoni/Sao Januario	Realcy Silveira/Sao Januario	110
72	Realcy Silveira/Sao Januario	Realcy Silveira/Sta Luzia	155
73	Realcy Silveira/Sta Luzia	Padre Valente Simeoni/Sta Luzia	111
74	Padre Valente Simeoni/Sta Luzia	Realcy Silveira/Sta Luzia	111
75	Realcy Silveira/Sta Luzia	Realcy Silveira/Jequie	153
76	Realcy Silveira/Jequie	Padre Valente Simeoni/Jequie	115
77	Padre Valente Simeoni/Jequie	Realcy Silveira/Jequie	115
78	Realcy Silveira/Jequie	Realcy Silveira/Aveiro	158
79	Realcy Silveira/Aveiro	Padre Valente Simeoni/Aveiro	117
80	Padre Valente Simeoni/Aveiro	Realcy Silveira/Aveiro	117
81	Realcy Silveira/Aveiro	Realcy Silveira/Juvenil	149
82	Realcy Silveira/Juvenil	Tuiuti/Realcy Silveira	157
83	Tuiuti/Realcy Silveira	Tuiuti/Padre Valente Simeoni	138
84	Tuiuti/Padre Valente Simeoni	Santos Dumont/Valdemar Medeiros	119
85	Santos Dumont/Valdemar Medeiros	Tuiuti/Padre Valente Simeoni	119
86	Tuiuti/Padre Valente Simeoni	Padre Valente Simeoni/Antonio G. Pereira	72
87	Padre Valente Simeoni/Antonio G. Pereira	Padre Valente Simeoni/Juvenil	152
88	Padre Valente Simeoni/Juvenil	Realcy Silveira/Juvenil	112
89	Realcy Silveira/Juvenil	Padre Valente Simeoni/Juvenil	112
90	Padre Valente Simeoni/Juvenil	Valdemar Medeiros/Juvenil	72
91	Valdemar Medeiros/Juvenil	Padre Valente Simeoni/Juvenil	72
92	Padre Valente Simeoni/Juvenil	Padre Valente Simeoni/Aveiro	155
93	Padre Valente Simeoni/Aveiro	Padre Valente Simeoni/Jequie	152
94	Padre Valente Simeoni/Jequie	Padre Valente Simeoni/Sta Luzia	153
95	Padre Valente Simeoni/Sta Luzia	Padre Valente Simeoni/Sao Januario	158
96	Padre Valente Simeoni/Sao Januario	Padre Valente Simeoni/Jacupiranga	150
97	Padre Valente Simeoni/Jacupiranga	Valdemar Medeiros/Jacupiranga	77
98	Valdemar Medeiros/Jacupiranga	Emaia Silva Denk/Jacupiranga	71
99	Emaia Silva Denk/Jacupiranga	Emaia Silva Denk	146
100	Emaia Silva Denk	Emaia Silva Denk/Jacupiranga	146
101	Emaia Silva Denk/Jacupiranga	Theonesto Westrupp/Jacupiranga	76
102	Theonesto Westrupp/Jacupiranga	Theonesto Westrupp/Sao Januario	160
103	Theonesto Westrupp/Sao	Theonesto Westrupp/Sta Luzia	163

	Januario		
104	Theonesto Westrupp/Sta Luzia	Theonesto Westrupp/Jequie	155
105	Theonesto Westrupp/Jequie	Theonesto Westrupp/Aveiro	151
106	Theonesto Westrupp/Aveiro	Theonesto Westrupp/Juvenil	157
107	Theonesto Westrupp/Juvenil	Santos Dumont/Theonesto Westrupp	192
108	Santos Dumont/Theonesto Westrupp	Santos Dumont/Guilherme Klein	83
109	Santos Dumont/Guilherme Klein	Guilherme Klein/Juvenil	140
110	Guilherme Klein/Juvenil	Theonesto Westrupp/Juvenil	75
111	Theonesto Westrupp/Juvenil	Guilherme Klein/Juvenil	75
112	Guilherme Klein/Juvenil	Guilherme Klein/Aveiro	155
113	Guilherme Klein/Aveiro	Theonesto Westrupp/Aveiro	73
114	Theonesto Westrupp/Aveiro	Guilherme Klein/Aveiro	73
115	Guilherme Klein/Aveiro	Guilherme Klein/Jequie	156
116	Guilherme Klein/Jequie	Theonesto Westrupp/Jequie	71
117	Theonesto Westrupp/Jequie	Guilherme Klein/Jequie	71
118	Guilherme Klein/Jequie	Guilherme Klein/Sta Luzia	153
119	Guilherme Klein/Sta Luzia	Guilherme Klein/Sao Januario	155
120	Guilherme Klein/Sao Januario	Guilherme Klein/Jacupiranga	156
121	Guilherme Klein/Jacupiranga	Guilherme Klein	148
122	Guilherme Klein	Guilherme Klein/Jacupiranga	148
123	Guilherme Klein/Jacupiranga	Lorival Tabbert/Jacupiranga	69
124	Lorival Tabbert/Jacupiranga	Lorival Tabbert/Sao Januario	159
125	Lorival Tabbert/Sao Januario	Lorival Tabbert/Sta Luzia	155
126	Lorival Tabbert/Sta Luzia	Lauro Schroeder/Sta Luzia	69
127	Lauro Schroeder/Sta Luzia	Lorival Tabbert/Sta Luzia	69
128	Lorival Tabbert/Sta Luzia	Lorival Tabbert/Jequie	157
129	Lorival Tabbert/Jequie	Lauro Schroeder/Jequie	75
130	Lauro Schroeder/Jequie	Lorival Tabbert/Jequie	75
131	Lorival Tabbert/Jequie	Lorival Tabbert/Aveiro	156
132	Lorival Tabbert/Aveiro	Lorival Tabbert/Juvenil	155
133	Lorival Tabbert/Juvenil	Santos Dumont/Lorival Tabbert	103
134	Santos Dumont/Lorival Tabbert	Santos Dumont/Lauro Schroeder	84
135	Santos Dumont/Lauro Schroeder	Lauro Schroeder/Aveiro	233
136	Lauro Schroeder/Aveiro	Lauro Schroeder/Jequie	158
137	Lauro Schroeder/Jequie	Lauro Schroeder/Sta Luzia	152
138	Lauro Schroeder/Sta Luzia	Lauro Schroeder/Sao Januario	155
139	Lauro Schroeder/Sao Januario	Lauro Schroeder/Jacupiranga	158
140	Lauro Schroeder/Jacupiranga	Lauro Schroeder	126
141	Lauro Schroeder	Lauro Schroeder/Jacupiranga	126
142	Lauro Schroeder/Jacupiranga	Alvacir Josi de Paula/Jacupiranga	73
143	Alvacir Josi de Paula/Jacupiranga	Lauro Schroeder/Jacupiranga	75
144	Lauro Schroeder/Jacupiranga	Lorival Tabbert/Jacupiranga	72

145	Lorival Tabbert/Jacupiranga	Lorival Tabbert	123
146	Lorival Tabbert	Lorival Tabbert/Jacupiranga	123
147	Lorival Tabbert/Jacupiranga	Guilherme Klein/Jacupiranga	69
148	Guilherme Klein/Jacupiranga	Theonesto Westrupp/Jacupiranga	73
149	Theonesto Westrupp/Jacupiranga	Theonesto Westrupp	162
150	Theonesto Westrupp	Theonesto Westrupp/Jacupiranga	162
151	Theonesto Westrupp/Jacupiranga	Emaia Silva Denk/Jacupiranga	76
152	Emaia Silva Denk/Jacupiranga	Emaia Silva Denk/Sao Januario	153
153	Emaia Silva Denk/Sao Januario	Emaia Silva Denk/Sta Luzia	156
154	Emaia Silva Denk/Sta Luzia	Emaia Silva Denk/Jequie	154
155	Emaia Silva Denk/Jequie	Emaia Silva Denk/Aveiro	153
156	Emaia Silva Denk/Aveiro	Emaia Silva Denk/Juvenil	153
157	Emaia Silva Denk/Juvenil	Emaia Silva Denk/Antonio G. Pereira	157
158	Emaia Silva Denk/Antonio G. Pereira	Santos Dumont/Emaia Silva Denk	91
159	Santos Dumont/Emaia Silva Denk	Santos Dumont/Valdemar Medeiros	87
Distância Total --->			19.355