

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ADMINISTRAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO**

Eugênio de Oliveira Simonetto

**SISTEMA DE APOIO À DECISÃO APLICADO AO PLANEJAMENTO
OPERACIONAL DA COLETA SELETIVA DE RESÍDUOS SÓLIDOS**

**Tese de Doutorado apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Administração da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como requisito parcial para a obtenção do título
de Doutor em Administração.**

Orientador: Prof. Denis Borenstein

Porto Alegre

2004

Eugênio de Oliveira Simonetto

**SISTEMA DE APOIO À DECISÃO APLICADO AO PLANEJAMENTO
OPERACIONAL DA COLETA SELETIVA DE RESÍDUOS SÓLIDOS**

**Tese de Doutorado apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Administração da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como requisito parcial para a obtenção do título
de Doutor em Administração.**

Orientador: Prof. Denis Borenstein

Porto Alegre

2004

Catálogo na Publicação (CIP)

S598s Simonetto, Eugênio de Oliveira
Sistema de apoio à decisão aplicado ao planejamento
operacional da coleta seletiva de resíduos sólidos / Eugênio de
Oliveira Simonetto. – 2004.
139 f. : il.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande
do Sul, Escola de Administração, Programa de Pós-Graduação
em Administração, 2004.

“Orientador: Prof. Denis Borenstein.”

1. Tecnologia da informação. 2. Sistemas de informação.
3. Gestão. 4. Modelagem de sistemas. 5. Sistema de apoio à
decisão. 6. Planejamento operacional. 7. Resíduos sólidos. 8.
Desenvolvimento de software. I. Título

CDU 681.3

Agradecimentos

- Ao Professor Denis Borenstein, meu orientador, pela confiança em mim depositada, pela sua dedicação, pelo caráter e, por todo o processo de orientação nesta longa jornada... Muito Obrigado!
- À Juliane, minha esposa, que nunca deixou de acreditar, mesmo nos momentos mais difíceis da jornada;
- Aos professores Marco Aurélio Araújo e Luiz Felipe Nascimento do Grupo Interdisciplinar de Gestão Ambiental da UFRGS pelo apoio ao trabalho;
- Aos meus pais João Eugênio e Silvina, pelo incentivo;
- Aos meus orientandos Bruno Reis Dotto e Marcio Tamiosso Nazari pelo apoio técnico na linguagem de programação;
- À COPESUL, em especial à engenheira Carla Rangel e ao engenheiro João Ruy Dornelles Freire, pelo apoio à pesquisa e a concessão da bolsa de estudos;
- Ao Departamento Municipal de Limpeza Urbana de Porto Alegre, em especial à Divisão de Projetos Sociais, Reaproveitamento e Reciclagem, pelo fornecimento dos dados necessários ao desenvolvimento da pesquisa;
- Aos colegas Mauri Leodir Löbler, Breno Augusto Diniz Pereira, João Batista Diniz Leite pelo companheirismo e, pelos momentos de “luta” e aprendizado compartilhados no doutorado;
- A todo o pessoal do PPGA, especialmente, aos professores João Luiz Becker e Eduardo Ribas Santos.

Resumo

O trabalho apresenta a concepção, modelagem e implementação de um sistema de apoio à decisão aplicado ao planejamento operacional da coleta seletiva de resíduos sólidos (*SCOLDSS*), o qual tem por funcionalidade principal a geração de alternativas ao processo decisório no que se refere à: (a) alocação de veículos para a coleta seletiva, bem como à determinação do roteiro a ser percorrido pelos mesmos e, (b) a determinação da quantidade diária de resíduos sólidos a ser enviado a cada unidade de triagem, de modo a evitar o desperdício de mão-de-obra e reduzir a quantidade de resíduos enviada aos aterros sanitários. Para o desenvolvimento do mesmo foi utilizada a combinação de técnicas advindas da Pesquisa Operacional, que são a simulação computacional de eventos discretos e algoritmos para o problema da alocação e roteamento de veículos. O sistema foi desenvolvido utilizando o ambiente Borland Delphi e, para a simulação foi utilizado o simulador Arena 3.5. Para a validação do *SCOLDSS* foram utilizados dados da coleta seletiva de um município do Rio Grande do Sul.

Abstract

A decision support system (DSS) for modeling and solving the recyclable waste collection operational planning is presented. The computer system has the following objectives: (a) to define the vehicles' allocation and routing; (b) to determine the quantity of solid waste to be sent to each waste recyclable trial unit; and (c) to generate operational scenarios to be taken into account in the decision process. To accomplish such objectives the DSS employs two well-known operations research techniques, namely simulation, and assignment/VRP algorithms. The DSS was implemented in Borland Delphi, using the commercial package Arena 3.5 to carry out the simulations. The system was validated using a field test in Porto Alegre, Rio Grande do Sul.

Sumário

| | |
|--|------------|
| 1. Introdução | 14 |
| 1.1 - Objetivos da Pesquisa | 16 |
| 1.2 - Metodologia da Pesquisa | 17 |
| 1.3 - Organização da Tese | 20 |
| 2. Resíduos Sólidos | 21 |
| 2.1 - Gestão de Resíduos Sólidos no Brasil | 23 |
| 2.2. Coleta e Transporte de Resíduos Sólidos Domiciliares | 24 |
| 2.3 - A Transferência dos Resíduos Sólidos | 26 |
| 2.4. A Reciclagem de Resíduos | 27 |
| 2.5 – Estrutura Básica de um Sistema de Coleta Seletiva | 29 |
| 3. Referencial Teórico | 34 |
| 3.1 – Considerações Críticas | 40 |
| 4. Sistemas de Apoio à Decisão e a Pesquisa Operacional | 43 |
| 4.1 - Arquitetura de um Sistema de Apoio à Decisão | 43 |
| 4.2 – Pesquisa Operacional | 46 |
| 5. SCOLDSS – O Sistema de Apoio à Decisão Proposto | 55 |
| 5.1 – Subsistema banco de dados | 57 |
| 5.2. Subsistema Modelo | 61 |
| 5.3. Subsistema Interface (Diálogo) | 77 |
| 5.4 – Aplicabilidade do SCOLDSS em Diferentes Estruturas de Coleta | 78 |
| 6. Validação do Sistema de Apoio à Decisão | 80 |
| 6.1 - Validação de Face | 82 |
| 6.2 – Validação do SCOLDSS | 82 |
| 7. Considerações Finais | 92 |
| 7.1 – Limitações e Possibilidade de Futuras Pesquisas | 93 |
| 7.2 – Conclusões e Recomendações Gerais | 94 |
| Referências Bibliográficas | 97 |
| Anexos | 103 |

| | |
|--|------------|
| Anexo A – Interface <i>SCOLDSS</i> | 104 |
| Anexo B – Instrumento de Validação de Face do <i>SCOLDSS</i> | 114 |
| Anexo C – Exemplo do Detalhamento do Planejamento da Coleta no <i>SCOLDSS</i> ... | 115 |
| Anexo C – Exemplo do Detalhamento do Planejamento da Coleta no <i>SCOLDSS</i> ... | 115 |
| Anexo D – Implementação da Heurística de Gillet (1974) no <i>SCOLDSS</i>..... | 124 |
| Anexo E – O Funcionamento do <i>SCOLDSS</i> e a Integração dos Modelos | 128 |
| Anexo F – Exemplos dos Relatórios Fornecidos pelo DMLU..... | 138 |

Lista de Quadros

| | |
|---|-----|
| Figura 1.1 – Metodologia de pesquisa para Pesquisa Operacional..... | 18 |
| Figura 2.1 - Exemplo de veículo de coleta (Birigüi-SP)..... | 30 |
| Figura 2.2 – Exemplo de veículo de coleta de dimensões menores | 31 |
| Figura 2.3 – Exemplo de veículo de coleta (Franca-SP) | 31 |
| Figura 2.4 – Exemplo de veículo de coleta (Porto Alegre-RS)..... | 32 |
| Figura 2.5 – Unidade de Triagem em Porto Alegre-RS..... | 32 |
| Figura 2.6 - Unidade de Triagem em Porto Alegre-RS | 33 |
| Figura 4.1 – Arquitetura básica de um sistema de apoio à decisão | 46 |
| Figura 5.1 – Diagrama de Atividades do <i>SCOLDSS</i> | 56 |
| Figura 5.2 – A relação entre os subsistemas do sistema de apoio à decisão..... | 57 |
| Figura 5.3 – Modelo Entidade-Relacionamento do <i>SCOLDSS</i> | 61 |
| Quadro 5.2 – Estrutura de funcionamento do modelo decisório do <i>SCOLDSS</i> | 62 |
| Figura 5.4 – Ilustração gráfica do modelo decisório do <i>SCOLDSS</i> | 62 |
| Quadro 5.2 – Formulação matemática do modelo decisório do <i>SCOLDSS</i> | 64 |
| Figura 5.5 – Interface referente à execução do Arena no <i>SCOLDSS</i> | 68 |
| Figura 5.6 - Diagrama de Ciclo de Atividade da simulação no <i>SCOLDSS</i> | 68 |
| Quadro 5.3 – Consulta SQL necessária para auxílio à geração dos agrupamentos..... | 72 |
| Quadro 5.4 – Estrutura genérica dos agrupamentos a serem gerados pela heurística de Gillet (1974) | 73 |
| Quadro 5.5 – Exemplo dos agrupamentos gerados pela heurística no <i>SCOLDSS</i> | 73 |
| Quadro 5.6 – Formulação do modelo matemática para alocação de veículos | 74 |
| Quadro 5.7 - Consulta SQL necessária para geração do roteamento de veículos | 76 |
| Quadro 5.8 - Consulta SQL necessária para geração do roteamento de veículos | 76 |
| Quadro 5.9 – Estrutura genérica do arquivo de resultado textual gerado pela heurística... 77 | |
| Quadro 5.10 – Exemplo de resultado textual gerado pela heurística de roteamento..... | 77 |
| Figura A.1 – Interface inicial do <i>SCOLDSS</i> | 104 |
| Figura A.2 – Interface de Administração dos dados do <i>SCOLDSS</i> | 105 |
| Figura A.3 – Interface para a seleção de cadastro a ser executado | 105 |
| Figura A.4– Interface relativa aos comandos dos formulários do <i>SCOLDSS</i> | 105 |
| Figura A.5 – Interface de cadastro relativo às coletas diárias..... | 106 |

| | |
|---|-----|
| Figura A.6 – Interface relativa ao cadastro de locais de coleta e unidades de triagem | 106 |
| Figura A.7 – Interface para cadastro das distâncias entre os locais de coleta e/ou triagem | 107 |
| Figura A.8– Interface utilizada para o cadastro dos veículos utilizados na coleta seletiva | 107 |
| Figura A.9 – Interface de cadastro dos diferentes tipos de veículos de coleta..... | 108 |
| Figura A.10 – Interface para apoio ao processo decisório da coleta/distribuição dos resíduos sólidos | 109 |
| Figura A.11 – Interface para seleção das unidades de triagem ativas | 109 |
| Figura A.12– Interface para a seleção do mês para planejamento | 109 |
| Figura A.13 - Interface para a seleção do dia para planejamento | 110 |
| Figura A.14 – Botão para iniciar a simulação..... | 110 |
| Figura A.15 – Mensagem para inicialização do <i>Arena</i> | 110 |
| Figura A.16 – Interface do <i>SCOLDSS</i> durante a execução do <i>Arena</i> | 111 |
| Figura A.17 – Botões do <i>SCOLDSS</i> | 111 |
| Figura A.18– Interface para definição do percentual mínimo de demanda | 111 |
| Figura A.19- Interface para apresentação dos resultados do algoritmo de agrupamento . | 111 |
| Figura A.20 – Botão para a alocação de veículos..... | 112 |
| Figura A.21- Interface para apresentação do roteamento dos veículos | 112 |
| Figura A.22- Interface para seleção do tipo de relatório | 112 |
| Figura A.23- Modelo de relatório gerado pelo <i>SCOLDSS</i> | 113 |
| Figura A.24- Modelo de relatório gerado pelo <i>SCOLDSS</i> | 113 |
| Figura C.1 - Solução gerada pela <i>SCOLDSS</i> para a Unidade de Triagem 1 | 115 |
| Figura C.2 - Solução gerada pela <i>SCOLDSS</i> para a Unidade de Triagem 2..... | 116 |
| Figura C.3 - Solução gerada pela <i>SCOLDSS</i> para a Unidade de Triagem 3..... | 118 |
| Figura C.4 - Solução gerada pela <i>SCOLDSS</i> para a Unidade de Triagem 4..... | 118 |
| Figura C.5 - Solução gerada pela <i>SCOLDSS</i> para a Unidade de Triagem 5..... | 119 |
| Figura C.6 - Solução gerada pela <i>SCOLDSS</i> para a Unidade de Triagem 6..... | 120 |
| Figura C.7 - Solução gerada pela <i>SCOLDSS</i> para a Unidade de Triagem 7..... | 121 |
| Figura C.8 - Solução gerada pela <i>SCOLDSS</i> para a Unidade de Triagem 8..... | 123 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|-----|
| Tabela 4.1 – Taxonomia para classificação dos problemas de roteamento de veículos..... | 51 |
| Tabela 5.1 – Estrutura de dados Local de Coleta | 59 |
| Tabela 5.2 – Estrutura de dados Coleta | 60 |
| Tabela 5.3 – Estrutura de dados Veículo | 60 |
| Tabela 5.4 – Estrutura de dados Distância | 60 |
| Tabela 5.5 – Estrutura de dados Tipo de Veículo..... | 60 |
| Tabela 5.6 - Estrutura de dados Depósito | 61 |
| Tabela 6.1 – Comparações entre as soluções de Larson (1999) e do <i>SCOLDSS</i> | 83 |
| Tabela 6.2 – Dados referentes à coleta seletiva de Porto Alegre | 84 |
| Tabela 6.3 – Resultados das execuções da simulação do processamento de resíduos | 86 |
| Tabela 6.4 – Dados referentes à primeira execução da validação do <i>SCOLDSS</i> | 86 |
| Tabela 6.5 – Dados referentes à segunda execução da validação do <i>SCOLDSS</i> | 86 |
| Tabela 6.6 – Dados referentes à terceira execução da validação do <i>SCOLDSS</i> | 87 |
| Tabela 6.7 – Dados referentes à quarta execução da validação do <i>SCOLDSS</i> | 87 |
| Tabela 6.8 - Dados referentes à quinta execução da validação do <i>SCOLDSS</i> | 87 |
| Tabela 6.9 – Dados referentes à sexta execução da validação do <i>SCOLDSS</i> | 87 |
| Tabela 6.10 – Dados referentes à sétima execução da validação do <i>SCOLDSS</i> | 88 |
| Tabela 6.11 – Dados referentes à oitava execução da validação do <i>SCOLDSS</i> | 88 |
| Tabela 6.12 – Dados referentes à nona execução da validação do <i>SCOLDSS</i> | 88 |
| Tabela 6.13 – Dados referentes à décima execução da validação do <i>SCOLDSS</i> | 88 |
| Tabela 6.14 – Resultados das execuções da validação do <i>SCOLDSS</i> | 89 |
| Tabela C.1 – Solução atual para a Unidade de Triagem 1 | 115 |
| Tabela C.2 – Solução gerada pela <i>SCOLDSS</i> para a Unidade de Triagem 1 | 115 |
| Tabela C.3 – Solução atual para a Unidade de Triagem 2..... | 116 |
| Tabela C.4 – Solução gerada pela <i>SCOLDSS</i> para a Unidade de Triagem 2..... | 116 |
| Tabela C.5 – Solução atual para a Unidade de Triagem 3..... | 117 |
| Tabela C.6 – Solução gerada pela <i>SCOLDSS</i> para a Unidade de Triagem 3..... | 117 |
| Tabela C.7 – Solução gerada pela <i>SCOLDSS</i> para a Unidade de Triagem 4..... | 117 |
| Tabela C.8 – Solução atual para a Unidade de Triagem 5..... | 119 |
| Tabela C.9 – Solução gerada pela <i>SCOLDSS</i> para a Unidade de Triagem 5..... | 119 |
| Tabela C.10 – Solução atual para a Unidade de Triagem 6..... | 120 |

| | |
|---|-----|
| Tabela C.11 – Solução gerada pela <i>SCOLDSS</i> para a Unidade de Triagem 6..... | 120 |
| Tabela C.12 – Solução atual para a Unidade de Triagem 7..... | 121 |
| Tabela C.13 – Solução gerada pela <i>SCOLDSS</i> para a Unidade de Triagem 7..... | 121 |
| Tabela C.14 – Solução atual para a Unidade de Triagem 8..... | 122 |
| Tabela C.15 – Solução gerada pela <i>SCOLDSS</i> para a Unidade de Triagem 8..... | 122 |

Lista de Abreviaturas

- CASE – *Computer Aided Software Engineering* (Engenharia de Software Apoiada por Computador)
- CEMPRE – Compromisso Empresarial para Reciclagem
- DMLU - Departamento Municipal de Limpeza Urbana de Porto Alegre
- EDP – *Electronic Data Processing* (Processamento Eletrônico de Dados)
- FEPAM - Fundação Estadual de Proteção ao Meio-Ambiente
- GLP – *Gray Linear Programming* (Programação Linear Nebulosa)
- MIS – *Management Information Systems* (Sistemas de Informação Gerenciais)
- PO – Pesquisa Operacional
- SAD – Sistemas de Apoio à Decisão
- SCOLDSS – Sistema de Apoio à Decisão Aplicado ao Planejamento Operacional da Coleta Seletiva de Resíduos Sólidos
- SGBD - Sistema de Gerência de Banco de Dados
- SIAD - Sistema Inteligente de Apoio à Decisão
- SICOLSE – Sistema de Informação para a Gestão da Coleta Seletiva
- SQL – *Structured Query Language* (Linguagem Estruturada de Consultas)
- SWARU - *Solid Waste Reduction Unit* (Unidade de Redução de Resíduos Sólidos)
- UML - *Unified Modelling Language* (Linguagem de Modelagem Unificada)
- VRP – *Vehicle Routing Problem* (Problema do Roteamento de Veículos)

1. Introdução

A preocupação da comunidade internacional com os limites do desenvolvimento do planeta teve início na década de sessenta, quando começaram as discussões sobre os riscos da degradação do meio ambiente. Tais discussões levaram os pesquisadores a conclusão de que se fosse mantido o ritmo de industrialização, poluição e exploração de recursos naturais, o limite de desenvolvimento do planeta seria atingido, dentro de, cem anos no máximo (Meadows, 1972; Weintraub et al., 1998).

O manejo ambientalmente saudável dos resíduos sólidos encontra-se dentre as questões mais importantes para a manutenção da qualidade do meio ambiente da Terra e, principalmente, para alcançar um desenvolvimento sustentável e ambientalmente saudável em todos os países (Zutshi & Sohal, 2002). Apesar de toda a preocupação da comunidade internacional com a qualidade do meio ambiente na Terra, o que acontece na prática, na maioria das vezes, é um desenvolvimento não-sustentável na gestão de resíduos sólidos, pois os métodos para a coleta, transporte e depósito do lixo não levam em conta as conseqüências que o mau uso e o tratamento inadequado dos resíduos podem acarretar no meio ambiente em um futuro bem próximo.

A reciclagem dos resíduos sólidos é uma excelente alternativa para propiciar a preservação de recursos naturais, a economia de energia, redução de área que demanda o aterro sanitário, geração de emprego e renda, assim como a conscientização da população para questões ambientais. Porém, para um melhor funcionamento, é de vital importância que se implante nas cidades um amplo sistema de coleta seletiva, onde os recicláveis sejam separados nas residências e coletados pelo sistema municipal de coleta seletiva. Apesar de ser uma excelente alternativa para a redução de resíduos com destino aos aterros, apenas 4,7% dos resíduos são reutilizados ou reciclados nas cidades gaúchas, segundo a CEMPRE (Organização Não-Governamental Compromisso Empresarial para Reciclagem) (Netto, 2001). Um dos motivos para tal parcela reduzida de reciclagem deve-se ao mau acondicionamento dos resíduos pela população, fato este gerado pela falta de informação acerca da coleta seletiva. Outros fatores que contribuem para o pequeno índice de reciclagem dos resíduos é o alto custo da coleta seletiva para as municipalidades (O'Leary et al., 1999; Monteiro et al., 2001), assim como a falta de um sistema

corretamente dimensionado em termos da capacidade de armazenamento e processamento de resíduos nas unidades de triagem.

Além do alto custo da coleta, um fator que contribui bastante para os baixos índices de reciclagem é a falta de atenção dada à capacidade de armazenamento e processamento de resíduos nas unidades de triagem. Muitas vezes, modelos desenvolvidos para o projeto e operação de sistemas de coleta consideram, para a definição da distribuição dos resíduos, somente as distâncias ou os custos de deslocamentos dos pontos de coleta aos depósitos finais (Chang & Wei, 2000; Huang et al., 1998; Tung & Pinnoi, 2000). Tais modelos não levam em consideração o fluxo dinâmico de resíduos (entrada / saída) que possuem as unidades de triagem de resíduos potencialmente recicláveis. Particularmente, Huang et al. (1998) trata o armazenamento de recicláveis, mas não dedica uma atenção especial ao fluxo de entrada e saída dos mesmos nas unidades de triagem, pois atribui à variável fluxo um valor médio calculado a partir de uma faixa de valores pré-determinada.

Contudo, no caso da distribuição da coleta seletiva de resíduos, não se pode tratar somente a minimização do custo de deslocamentos ou a distância percorrida pelos veículos coletores, tem-se de levar em consideração a capacidade física e de trabalho diária das unidades de triagem de resíduos, pois muitas vezes pode existir uma solução com um custo menor do que outra, mas que a unidade de triagem em determinado momento não suporte o carregamento a ela destinado. Neste caso, quase sempre estes resíduos são destinados diretamente ao aterro sanitário, deixando de serem reaproveitados, e, portanto, não gerando renda para os trabalhadores da unidade. Ao mesmo tempo uma outra unidade de triagem, por ser menos vantajosa em termos de custo ou distância, pode não ter matéria-prima a ser processada, resultando em menor quantidade de lixo reaproveitada, mão-de-obra ociosa e sobrecarga desnecessária ao aterro sanitário. Tais características, não levadas em conta na literatura especializada, são devidamente tratadas neste trabalho.

Para o desenvolvimento do sistema de apoio à decisão, denominado *SCOLDSS*, foram abordadas questões relativas ao processo decisório referente à logística dos resíduos sólidos recicláveis e reutilizáveis provenientes da coleta seletiva. Especificamente, na concepção e implementação do *SCOLDSS*, foram enfatizados os seguintes aspectos: a

quantidade de resíduos gerada pela população, a distribuição de veículos para a coleta, a determinação do trajeto a ser percorrido por estes e a estimativa da capacidade de armazenamento e processamento de resíduos nas unidades de triagem, o que, como citado anteriormente, não é devidamente caracterizado nos trabalhos referentes à área.

Para o desenvolvimento do sistema computacional foram utilizadas técnicas quantitativas oriundas da Pesquisa Operacional, tais como a simulação discreta e algoritmos para a resolução do roteamento de veículos. O uso destas técnicas objetiva agregar qualidade ao processo decisório, pois em muitas vezes as decisões sobre o planejamento da gestão dos resíduos sólidos são tomadas baseadas somente na experiência dos gestores (Chang & Wei, 2000). Tal fato, segundo este autor, contribui para o alto custo e o baixo desempenho dos sistemas de coleta de resíduos nas cidades. A utilização de ferramentas de Pesquisa Operacional (PO) na Gestão de Resíduos Sólidos surge como uma alternativa viável para o tratamento da complexidade inerente ao processo de coleta seletiva de resíduos sólidos, pois através do uso destas ferramentas pode-se representar uma situação do mundo real, estudar seu comportamento (via execução de modelos formais) e tomar decisões com base nas conclusões extraídas. Vários autores (Huang et al., 1998; Chang & Wei, 2000; Bhat, 1996; Everett & Shahi, 1996; Kulcar, 1996; Tanskanen, 2000; Tung & Pinnoi, 2000; Weintraub et al., 2001) já utilizaram técnicas e métodos da PO para desenvolver estudos na área de coleta de resíduos sólidos.

Na elaboração deste trabalho, além do sistema desenvolvido e sua validação, tem-se por objetivo efetuar um estudo referente aos temas referenciados no mesmo, quais sejam:

- Gestão de Resíduos Sólidos e a Reciclagem de Resíduos;
- Aplicações de Pesquisa Operacional na Gestão de Resíduos Sólidos;
- Simulação Computacional e Problemas do Roteamento de Veículos.

1.1 - Objetivos da Pesquisa

O objetivo desta tese é desenvolver uma abordagem, através da construção de um sistema de apoio à decisão, para o tratamento do planejamento operacional da coleta seletiva, desde a alocação dos veículos de coleta, determinação dos percursos destes,

considerando distâncias entre pontos de coletas e restrições de capacidade de transporte, até a distribuição final dos resíduos nas unidades de triagem.

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- Projetar uma solução aceitável para a resolução do problema da coleta e distribuição dos resíduos potencialmente recicláveis;
- implementar em um ambiente computacional a solução desenvolvida;
- validar o comportamento e desempenho do sistema de apoio à decisão desenvolvido, utilizando dados de problemas reais da coleta seletiva.

1.2 - Metodologia da Pesquisa

A metodologia de pesquisa adotada para o desenvolvimento do *SCOLDSS* foi apresentada em Law & Kelton (1991) e, foi utilizada neste trabalho devido à natureza da pesquisa e a utilização de técnicas advindas da Pesquisa Operacional. Esta metodologia consiste basicamente das seguintes etapas: (1) estudos exploratórios, na qual o problema foi identificado e estruturado; (2) desenvolvimento da solução, pela construção de modelos formais capazes de representar o problema; (3) implementação computacional da solução, utilizando-se a tecnologia de sistemas de apoio à decisão; (4) validação da solução, através de testes em laboratório e em campo, para verificar se os resultados obtidos estão de acordo com a realidade observada. O desenho da pesquisa pode ser visualizado na figura 1.1. As atividades desenvolvidas em cada etapa da pesquisa são apresentadas a seguir.

1.2.1 - Estudos Exploratórios

A primeira etapa da pesquisa constituiu-se em um estudo exploratório, no qual o conceito de logística reversa (produção, coleta, transferência e armazenamento) de resíduos sólidos foi adquirido através de pesquisas bibliográficas, entrevistas e, observações *in loco* do atual contexto logístico da coleta seletiva de resíduos sólidos e representado em forma textual para posteriormente ser transposto para um ambiente computacional (Sistema de Apoio à Decisão). O SAD desenvolvido auxiliará os gestores no processo decisório referente à coleta seletiva de resíduos sólidos.

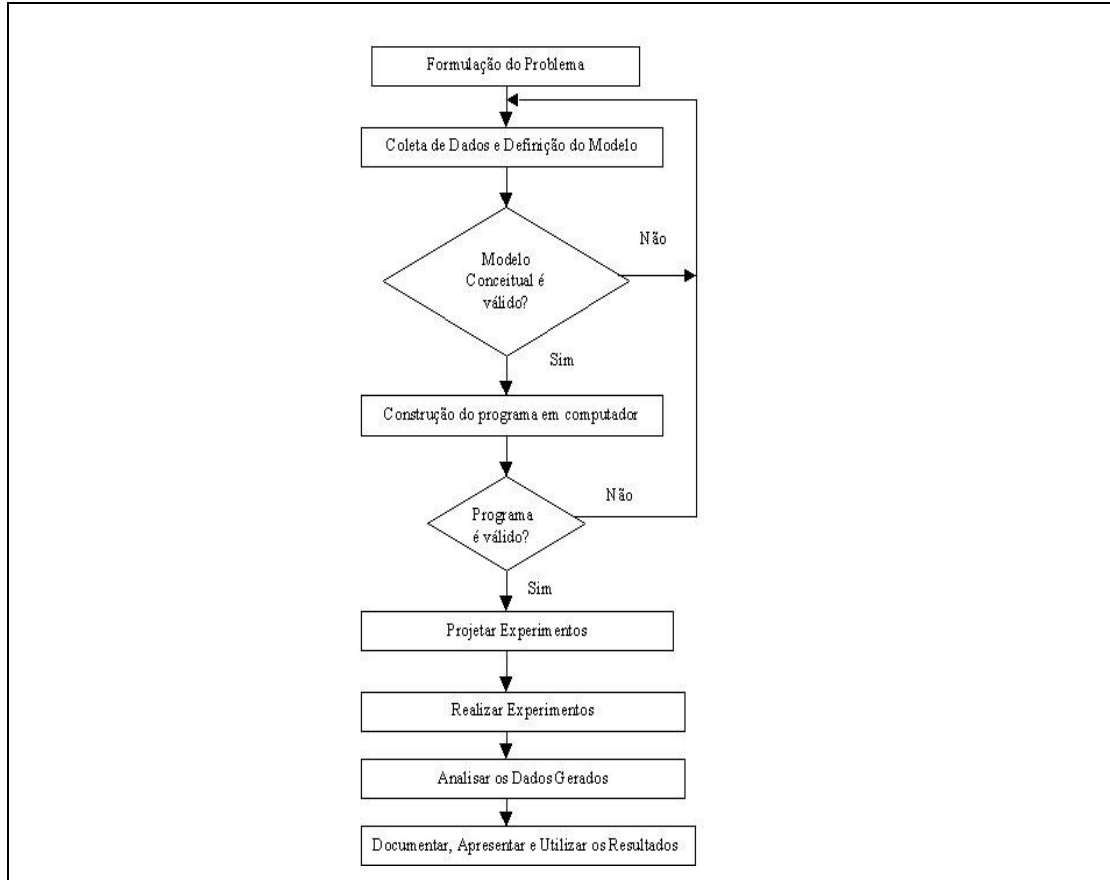


Figura 1.1 – Metodologia de pesquisa para Pesquisa Operacional

Os estudos exploratórios consistiram dos seguintes passos:

- a) Verificação da existência do problema ;
- b) definição e estruturação do problema; e
- c) especificação dos requisitos da solução.

Na metodologia de pesquisa de Law & Kelton (1991), os estudos exploratórios compreendem a primeira etapa da metodologia, denominada como formulação do problema.

1.2.2 – Desenvolvimento da Solução

O objetivo desta etapa foi projetar uma solução aceitável (através da coleta de dados e do desenvolvimento do modelo conceitual do sistema) e válida para o problema da

coleta e distribuição dos resíduos sólidos recicláveis, o qual satisfizesse os requisitos básicos levantados (especificados) no estudo exploratório. Após esta etapa foi executada a primeira validação do modelo, através da verificação de outros modelos apresentados na bibliografia correspondente à área (Barlaz et al., 1995; Monteiro et al., 2001; Huang et al., 1998; Chang & Wei, 2000) e, através da participação de especialistas na área de resíduos sólidos. Com os refinamentos para adequação do modelo, solicitados pelos avaliadores, executados, passou-se à implementação da solução em um ambiente computacional, apresentado no Capítulo 5 e no Anexo A.

1.2.3 – Implementação da Solução

Esta etapa consistiu dos seguintes passos: adaptação da solução encontrada para ser implementada na linguagem de programação Delphi (Borland, 2003) e no ambiente de simulação *Arena 3.5* (Arena Software, 2003). Também, nesta etapa foram desenvolvidas as rotinas componentes do sistema, a interface para o usuário final, as estruturas de dados e também executada a codificação do sistema. As estruturas de dados são apresentadas na seção 5.1 e a interface do *SCOLDSS* é apresentada no Anexo A .

Para o desenvolvimento do modelo computacional, foi utilizada a arquitetura de sistemas de apoio à decisão proposta por Sprague & Watson (1991), a qual é composta por três subsistemas: Subsistema interface, subsistema banco de dados e, subsistema modelos, a qual será apresentada na seção 4.1 do trabalho.

1.2.4 – Validação da Solução

O sistema concebido(*SCOLDSS*) consiste do desenvolvimento de modelos quantitativos e de simulação para o planejamento operacional da coleta seletiva de resíduos sólidos. Como um modelo pode ser definido como “representação do mundo real” (Pidd, 1998; Law & Kelton, 1991) temos que fazer com que o comportamento da representação seja o mesmo (ou mais próximo possível) da realidade em questão, sob determinadas condições especificadas. Este processo denomina-se validação de modelo.

No *SCOLDSS*, a validação fez-se necessária em três fases distintas: (a) no desenvolvimento do modelo conceitual do sistema, ou seja, na verificação dos requisitos

básicos a serem representados; (b) na implementação do sistema, onde verificou-se se os resultados provenientes de *software* atendem aos requisitos definidos no modelo conceitual e; (c) na verificação da capacidade do sistema de apoio à decisão como um todo em representar o processo decisório envolvido no planejamento operacional da coleta de resíduos sólidos.

A validação foi desenvolvida com a utilização de dados históricos da área de resíduos sólidos recicláveis do Departamento Municipal de Limpeza Urbana de Porto Alegre, bem como com a participação de pesquisadores na área. O processo de validação do *SCOLDSS* é apresentado no Capítulo 6 do trabalho.

1.3 - Organização da Tese

O trabalho está organizado da seguinte forma: A gestão dos resíduos sólidos, conceitos básicos e, a reciclagem de resíduos são apresentadas no capítulo 2, no capítulo 3 são apresentados e analisados artigos técnicos de periódico científicos referentes à área em estudo neste trabalho, bem como suas contribuições à pesquisa em desenvolvimento. No capítulo 4 são apresentadas as teorias de base utilizadas para o desenvolvimento do *SCOLDSS*, tais como a arquitetura de sistema de apoio à decisão, à Pesquisa Operacional, à simulação computacional e o problema de roteamento de veículos, com os modelos utilizados na implementação.

No capítulo 5 é apresentado o *SCOLDSS* - Sistema de Apoio à Decisão Aplicado ao Planejamento Operacional da Coleta Seletiva de Resíduos Sólidos, seu modelo conceitual, sua arquitetura, com base em Sprague & Watson (1991) e, o processo de interação do usuário para com o mesmo. No capítulo 6 é apresentada a validação do sistema de apoio à decisão, a qual foi efetuada com base no modelo de Finlay (1994), com contribuições da abordagem por O'Keefe et al (1987), quando se trata da validação de face do sistema. Por fim, no capítulo 7 são apresentadas as considerações finais e, a possibilidade de trabalhos futuros com base em problemas não devidamente tratados na área de estudo da tese.

2. Resíduos Sólidos

Resíduos sólidos, para a compreensão deste trabalho como um todo, são todos os restos domésticos e resíduos não perigosos, tais como os resíduos comerciais, institucionais, de podas e de construções. Em alguns países, o sistema de gestão dos resíduos sólidos também se ocupa dos resíduos humanos, tais como excrementos, cinzas de incineradores e, de instalações de tratamento de esgoto. O objetivo deste capítulo é apresentar a área de pesquisa em gestão de resíduos, desde sua criação no Brasil até os dias de hoje, porém com o foco de pesquisa mais centrado na reciclagem de resíduos e na coleta seletiva, seus modelos e suas estruturas, devido à sua importância para o desenvolvimento desta tese.

O descarte do lixo é uma operação que envolve as fases de limpeza, coleta e destinação final. Estes serviços são considerados tarefas tipicamente municipais e, por isto organizados pelos governos locais. Entre estes serviços, a destinação final do lixo é uma preocupação que vem ganhando relevância, devido às suas implicações com a qualidade de vida das populações e a necessidade de aprimorar as técnicas de manejo dos resíduos sólidos urbanos.

O manejo saudável dos resíduos deve ir além do simples depósito ou aproveitamento por métodos seguros destes, deve-se buscar no conceito de desenvolvimento sustentável, a forma de tratamento de resíduos sólidos, ou seja, a mudança dos padrões de produção e consumo. A utilização deste conceito (desenvolvimento sustentável) é uma forma de conciliar o desenvolvimento com o bem-estar do meio ambiente.

A estrutura da ação necessária deve apoiar-se em uma hierarquia de objetivos e centrar-se nas quatro principais áreas de programas relacionadas com os resíduos, a saber: (Resol, 2004):

(a) Redução ao mínimo dos resíduos

Uma abordagem preventiva do manejo dos resíduos centrada na transformação do estilo de vida e dos padrões de produção e consumo oferece as maiores possibilidades de inverter o sentido das tendências atuais.

(b) Aumento ao máximo da reutilização e reciclagem ambientalmente saudáveis dos resíduos

Na medida em que se modifica a economia dos serviços de depósito de resíduos, a reciclagem e a recuperação de recursos ficam cada dia mais rentáveis. Os futuros programas de manejo de resíduos devem aproveitar ao máximo as abordagens do controle de resíduos baseadas no rendimento dos recursos.

(c) Promoção do depósito e tratamento ambientalmente saudáveis dos resíduos

Nos países em desenvolvimento, esse problema tem um caráter ainda mais fundamental: menos de 10 por cento dos resíduos urbanos são objeto de algum tratamento e apenas em pequena proporção tal tratamento responde a uma norma de qualidade aceitável.

(d) Ampliação do alcance dos serviços que se ocupam dos resíduos

As conseqüências do mau armazenamento dos resíduos sólidos ficam evidentes quando analisamos a seguinte informação: não menos de 5,2 milhões de pessoas, entre elas 4 milhões de crianças menores de cinco anos, morrem a cada ano no mundo devido a enfermidades relacionadas com os resíduos (Resol, 2004). A ampliação e o melhoramento dos serviços de depósito de resíduos com segurança são decisivos para que se controle este tipo de problema.

Estas áreas de programas são relacionadas entre si e, atuam integradas para constituir uma estrutura ambientalmente saudável para o manejo dos resíduos sólidos. No entanto, é preciso uma estrutura bem definida e projetada para o gerenciamento sustentável dos resíduos sólidos.

A preocupação com os problemas oriundos do mau armazenamento e aproveitamento do lixo, relatados anteriormente (principalmente nos itens b, c e d), foram um dos elementos motivadores do desenvolvimento deste trabalho, o qual objetiva

solucionar parte dos problemas relacionados à logística e escoamento do fluxo dos resíduos, no que refere-se exclusivamente aos recicláveis e reutilizáveis.

Nas próximas subseções, serão abordados temas referentes à gestão dos resíduos sólidos, que vão desde a coleta dos resíduos até a disposição final dos mesmos. É dado um destaque maior à reciclagem dos resíduos devido ao fato desta ser de maior importância para a pesquisa do que os outros tipos de disposição final.

2.1 - Gestão de Resíduos Sólidos no Brasil

O serviço de limpeza urbana no Brasil foi iniciado, oficialmente, em 25 de novembro de 1880, no Rio de Janeiro, quando o imperador Dom Pedro II assinou um decreto, aprovando o contrato de "limpeza e irrigação" da cidade, executado por Aleixo Gary e, mais tarde, por Luciano Francisco Gary, de cujo sobrenome origina-se a palavra gari, que hoje denomina os trabalhadores da limpeza urbana em muitas cidades brasileiras (Monteiro et al., 2001). Dos tempos do império aos dias de hoje, os serviços de limpeza urbana alternaram momentos bons e ruins. Hoje, a situação da gestão dos resíduos sólidos se apresenta em cada cidade brasileira de forma diversa, prevalecendo, uma situação bastante preocupante.

A gestão dos resíduos sólidos, considerada um dos setores do saneamento básico, não tem merecido a atenção necessária por parte do poder público. Com isso, compromete-se cada vez mais a saúde da população, bem como vai se degradando os recursos naturais, especialmente o solo e os recursos hídricos. A interdependência dos conceitos de meio ambiente, saúde e saneamento é hoje bastante evidente, o que reforça a necessidade de integração das ações desses setores em prol da melhoria da qualidade de vida da população brasileira.

A coleta do lixo é o segmento que mais se desenvolveu dentro do sistema de limpeza urbana e o que apresenta maior abrangência de atendimento junto à população, ao mesmo tempo em que é a atividade do sistema que demanda maior percentual de recursos por parte da municipalidade (Monteiro et al., 2001; O'Leary et al., 1999; Huang et al., 1998). Este fato se deve à pressão exercida pela população e pelo comércio para que se execute a coleta com regularidade, evitando-se assim o incômodo da convivência com o

lixo nas ruas. Contudo, essa pressão tem geralmente um efeito seletivo, ou seja, quando a administração municipal não tem meios de oferecer o serviço a toda a população, priorizam os setores comerciais, as unidades de saúde e o atendimento à população de renda mais alta. Um dos grandes problemas enfrentados pelas administrações municipais para a coleta nas áreas mais carentes dos municípios é a ausência de uma infra-estrutura viária adequada, o que exige a adoção de sistemas alternativos, que apresentam baixa eficiência e, portanto, custo mais elevado. A disposição final dos resíduos é um dos problemas mais críticos enfrentados pelas municipalidades. Considerando-se apenas os resíduos sólidos urbanos, percebe-se claramente, que a ação generalizada das administrações públicas ao longo dos anos foi apenas afastar das zonas urbanas o lixo coletado, depositando-o, muitas vezes, em locais absolutamente inadequados, como encostas florestadas, rios e vales.

Com relação ao tratamento do lixo, têm-se instaladas no Brasil algumas unidades de compostagem e reciclagem, estas utilizam tecnologia simplificada, com segregação manual, no caso dos recicláveis, e compostagem em leiras a céu aberto, com posterior peneiramento. As poucas usinas de incineração existentes, utilizadas exclusivamente para incineração de resíduos de serviços de saúde e de aeroportos, em geral não atendem aos requisitos mínimos ambientais da legislação brasileira. Outras unidades de tratamento térmico desses resíduos, tais como autoclavagem, microondas e outros, vêm sendo instaladas mais frequentemente em algumas cidades brasileiras, mas os custos de investimento e operacionais ainda são muito altos (Monteiro et al., 2001).

2.2. Coleta e Transporte de Resíduos Sólidos Domiciliares

Coletar o lixo significa o seu recolhimento para posteriormente ser encaminhado, mediante transporte adequado, a uma possível estação de transferência, a um eventual tratamento e à disposição final (Barlaz et al., 1995).

A coleta e o transporte do lixo domiciliar produzido em imóveis residenciais, em estabelecimentos públicos e no pequeno comércio são, em geral, efetuados pelo órgão municipal encarregado da limpeza urbana. Para esses serviços, podem ser usados recursos próprios da prefeitura, de empresas sob contrato de terceirização ou sistemas mistos, como o aluguel de viaturas e a utilização de mão-de-obra da prefeitura. Pode-se então conceituar

como coleta domiciliar comum ou ordinária o recolhimento dos resíduos produzidos nas edificações residenciais, públicas e comerciais, desde que não sejam, estas últimas, grandes geradoras.

A coleta do lixo domiciliar deve ser efetuada em cada imóvel, sempre nos mesmos dias e horários, regularmente (Huang et al., 1998). Somente assim os cidadãos habituar-se-ão e serão condicionados a colocar os recipientes ou embalagens do lixo nas calçadas, em frente aos imóveis, sempre nos dias e horários em que o veículo coletor irá passar.

Em qualquer cidade que disponha de controle do peso de lixo coletado, é possível verificar matematicamente se a coleta é, de fato, regular, comparando-se os pesos de lixo em duas ou mais semanas consecutivas. Nos mesmos dias da semana (uma segunda-feira comparada com outra segunda-feira, e assim por diante) os pesos de lixo não devem variar mais que 10%. Da mesma forma, as quilometragens percorridas pelas viaturas de coleta devem ser semelhantes, pois os itinerários a serem seguidos serão os mesmos (para um mesmo número de viagens ao destino). Além disso, a ocorrência de pontos de acumulação de lixo domiciliar nos logradouros e um número elevado de reclamações apontam claramente qualquer irregularidade da coleta. O ideal, portanto, em um sistema de coleta de lixo domiciliar é estabelecer um recolhimento com dias e horários determinados, de pleno conhecimento da população, através de comunicações individuais a cada responsável pelo imóvel e de placas indicativas nas ruas. A população deve adquirir confiança de que a coleta não vai falhar e assim irá prestar sua colaboração, não atirando lixo em locais impróprios, acondicionando e posicionando embalagens adequadas, nos dias e horários marcados, com grandes benefícios para a higiene ambiental, a saúde pública, a limpeza e o bom aspecto dos logradouros públicos (Monteiro et al., 2001).

Uma das principais dificuldades da área de coleta de resíduos é a determinação e o dimensionamento dos roteiros a serem percorridos pelos veículos que efetuam a coleta (Huang et al., 1998; O'Leary et al., 1999). Monteiro et al. (2001) apresenta uma metodologia para o dimensionamento da coleta. Basicamente, o método consiste em:

- Dividir a cidade em subáreas;
- levantar e sistematizar as características de cada roteiro;
- analisar as informações levantadas;

- redimensionar os roteiros, tendo como premissa à minimização de horas extras de trabalho, segundo Monteiro et al. (2001).

Para Huang et al. (1998) e Bhat (1996) é de extrema importância que se reduza a distância viajada pelos veículos, pois o transporte, segundo os autores, chega a consumir de 70 a 80% do orçamento municipal destinado à gestão dos resíduos sólidos.

2.3 - A Transferência dos Resíduos Sólidos

Nas cidades de médio e grande porte que sofrem forte expansão urbana, aumentam também as exigências ambientais e a resistência da população em aceitar a implantação, próximo as suas residências, de qualquer empreendimento ligado à disposição final de resíduos sólidos (Barlaz et al., 1995). Tal fato é afirmado no estudo desenvolvido por Huang et al. (1998), onde uma unidade incineradora, devido às restrições impostas pelos moradores dos arredores desta, não opera com sua capacidade total. No estudo, um dos cenários desenvolvidos não contemplava o funcionamento desta unidade.

Além disto, os terrenos urbanos ficam muito caros para localização de aterros sanitários, o qual demanda áreas de grandes extensões, e assim sendo, os aterros sanitários estão sendo implantados cada vez mais distantes dos centros da massa de geração de resíduos.

O aumento na distância entre o ponto de coleta dos resíduos e o aterro sanitário causa os seguintes problemas (Huang et al., 1998):

- Atraso nos roteiros de coleta, alongando a exposição do lixo nas ruas;
- aumento do tempo improdutivo da guarnição de trabalhadores parados à espera do retorno do veículo que foi vazar sua carga no aterro;
- aumento do custo de transporte;
- redução da produtividade dos caminhões de coleta, que são veículos especiais e caros.

Para a solução desses problemas, algumas municipalidades vêm optando pela implantação de estações de transferência ou de transbordo (Barlaz et al.,1995). O transporte para o aterro sanitário dos resíduos descarregados nas estações de transferência é feito por veículos ou equipamento de maior porte e de menor custo unitário de

transporte. Os veículos ou equipamentos de transferência devem transportar pelo menos três vezes a carga de um caminhão de coleta.

Normalmente as estações de transferência são implantadas quando a distância entre o centro de massa de coleta e o aterro sanitário é superior a 25km (O’Leary et al., 1999; Monteiro et al.,2001). Em grandes cidades, onde as condições do tráfego rodoviário tornam vagarosos os deslocamentos, é possível encontrar estações implantadas em locais cuja distância do aterro sanitário é inferior a 20Km. A implantação de uma estação de transferência deve ser precedida de estudo de viabilidade que avalie seus ganhos econômicos e de qualidade para o sistema de coleta. Com relação à modalidade de transporte, os sistemas de transferência podem ser ferroviário, marítimo e rodoviário (Barlaz et al., 1995; Monteiro et al.,2001).

2.4. A Reciclagem de Resíduos

Reciclagem, segundo O’Leary et al. (1999), é o processo no qual, resíduos que são destinados à disposição final são coletados, processados e remanufaturados ou reutilizados. Monteiro et al. (2001) define reciclagem como sendo a separação de materiais do lixo domiciliar, tais como papéis, plásticos, vidros e materiais, com a finalidade de trazê-las de volta à indústria para serem beneficiados. Estes materiais são novamente transformados em produtos comercializáveis.

A reciclagem pode propiciar a preservação de recursos naturais, a economia de energia, redução do material que demanda o aterro, geração de emprego e renda, conscientização da população para questões ambientais. Contudo, para um bom funcionamento da reciclagem é de vital importância que se implante na cidade um amplo sistema de coleta seletiva, onde os recicláveis sejam separados nas residências e coletados pelo sistema municipal.

A gestão sustentável dos resíduos sólidos pressupõe uma abordagem embasada princípio dos 3 Rs: redução (do uso de matérias-primas e energia e do desperdício nas fontes geradoras), reutilização direta dos produtos, e reciclagem de materiais. A hierarquia dos Rs segue o princípio de que causa menor impacto evitar a geração do lixo do que

reciclar os materiais após seu descarte. A reciclagem de materiais polui menos o ambiente e envolve menor uso de recursos naturais, mas não diminui o atual padrão de consumo da população, fato este, causador da excessiva geração de resíduos (BNDES, 1998).

Um número cada vez maior de municípios está investindo e apoiando a reciclagem de resíduos, seja através da coleta seletiva, seja na construção de usinas de reciclagem, buscando com isto diminuir a quantidade de lixo em decomposição, ao mesmo tempo oferecendo atividade remunerada a parte da população. Para a reciclagem três grandes atividades devem ser executadas: seleção do lixo pela população, coleta seletiva do lixo e o processamento nas usinas de reciclagem (Calderoni, 1997).

A criação de políticas ambientais nos países desenvolvidos despertou o interesse da população pela questão dos resíduos sólidos. O aumento da geração per capita de lixo, fruto do seu forte apelo ambiental. Os principais benefícios ambientais da reciclagem dos materiais existentes no lixo (plásticos, papéis, metais e vidros) são (O'Leary et al., 1999):

- a) ambiental/geográfico, onde estão em questão a falta de espaço para disposição do lixo, a preservação da paisagem, a economia de recursos naturais e a diminuição do impacto ambiental de lixões e aterros;
- b) sanitário, onde a disposição inadequada do lixo, algumas vezes aliada à falta de qualquer sistema de coleta municipal, traz inconvenientes estéticos e de saúde pública;
- c) social, quando o trabalho enfoca a geração de empregos e o resgate da dignidade, estimulando a participação de catadores de rua e de lixões;
- d) econômico, com o intuito de reduzir os gastos com a limpeza urbana e investimentos em novos aterros;
- e) educativo, que vê um programa de coleta seletiva como forma de contribuir para mudar valores e atitudes individuais para com o ambiente, incluindo a revisão de hábitos de consumo, ou para mobilizar a comunidade e fortalecer o espírito de cidadania.

O grande desafio para implantação de programas de reciclagem é buscar um modelo que permita a sua auto-sustentabilidade econômica. Os modelos mais tradicionais, implantados em países desenvolvidos, quase sempre são subsidiados pelo poder público e são de difícil aplicação em países em desenvolvimento. Embora a escassez de recursos

dificulte a implantação de programas de reciclagem, algumas municipalidades vêm procurando modelos alternativos adequados às suas condições econômicas.

2.5 – Estrutura Básica de um Sistema de Coleta Seletiva

A coleta seletiva é o modelo mais empregado nos programas de reciclagem e consiste na separação, pela população, dos materiais recicláveis existentes nos resíduos domésticos para que posteriormente os mesmos sejam coletados por um veículo específico (Barlaz et al., 1995). A separação dos materiais recicláveis nas residências pode ser feita individualizando-se os materiais recicláveis e acondicionando-os em contêineres diferenciados ou agrupando-os em um único recipiente (Chang & Wei, 2000). O fundamento deste processo é a separação, pela população, dos materiais recicláveis (compostos inorgânicos) do restante do lixo (compostos orgânicos), que é destinado a aterros ou usinas de compostagem.

A implantação da coleta seletiva é um processo contínuo, o qual é ampliado gradativamente. O primeiro passo, diz respeito à realização de campanhas informativas de conscientização junto à população, convencendo-a da importância da reciclagem e orientando-a para que separe o lixo em recipientes para cada tipo de material. A instalação de postos de entrega voluntária em locais estratégicos possibilita a realização da coleta seletiva em locais públicos, tais como, conjuntos habitacionais, *shopping centers* e edifícios comerciais e públicos.

Posteriormente, deve-se elaborar um plano de coleta, definindo equipamentos, veículos, áreas e a periodicidade de coleta dos resíduos. A regularidade e eficácia no recolhimento dos materiais são importantes para que a população tenha confiança e se disponha a participar. Finalmente, é necessária a instalação de unidades de triagem para a limpeza e separação dos resíduos e o acondicionamento para a venda do material a ser reciclado.

O sistema com separação individualizada dos materiais recicláveis requer considerável espaço para guarda dos contêineres, o que pode inviabilizar sua adoção em apartamentos ou em casas de pequenas dimensões. Nesse modelo, o veículo de coleta pode

ter sua carroceria compartimentada de forma a transportar os materiais separadamente. Outro modelo, bem mais utilizado, é aquele que a população separa os resíduos domésticos em dois grupos:

- Materiais orgânicos (úmidos), compostos por restos de alimentos e materiais não recicláveis (lixo). Devem ser acondicionados em um único contêiner e coletados pelo sistema de coleta de lixo domiciliar regular.
- Materiais recicláveis (secos, compostos por papéis, metais, vidros e plásticos). Devem ser acondicionados em um único contêiner e coletados nos roteiros de coleta seletiva.

Na maioria das cidades onde existe o sistema, os roteiros de coleta seletiva são realizados semanalmente, caso de Florianópolis, Porto Alegre (DMLU, 2004), Limeira. Em algumas cidades do Japão, como Osaka, a frequência de coleta é bi-semanal (Osaka, 2003). Já em Seul na Coreia (Seoulife, 2003), os resíduos sólidos recicláveis são coletados duas vezes por semana. Para o transporte da coleta, normalmente, utiliza-se caminhões do tipo carroceria aberta ou “gaiola” (Figuras 2.1, 2.2 e 2.4), ou até mesmo do tipo “baú” (Figura 2.3) (DMLU, 2003; Prefeitura SP, 2003).



Figura 2.1 - Exemplo de veículo de coleta (Birigüi-SP)



Figura 2.2 – Exemplo de veículo de coleta de dimensões menores



Figura 2.3 – Exemplo de veículo de coleta (Franca-SP)

Após a coleta, os materiais recicláveis devem ser transportados para uma unidade de triagem (Figuras 2.5 e 2.6), equipada com lugares para catação, para que seja feita uma separação mais criteriosa dos materiais visando a comercialização dos mesmos. As unidades de triagem devem ser dotadas de prensas para que os materiais recicláveis de menor peso específico (papéis e plásticos) possam ser enfardados para facilitar a estocagem e o transporte dos mesmos. É importante que a população seja devidamente orientada para que somente sejam separados, como lixo seco, os materiais que possam ser comercializados, evitando-se despesas adicionais com o transporte e manuseio de rejeitos,

que certamente serão produzidos durante o processo de seleção por tipo de material e no enfardamento.

A distribuição dos resíduos entre as unidades se dá de acordo com a capacidade de recepção de cada unidade, em função das dimensões da mesma, do número de pessoas envolvidas e do ritmo de trabalho das pessoas envolvidas.



Figura 2.4 – Exemplo de veículo de coleta (Porto Alegre-RS)



Figura 2.5 – Unidade de Triagem em Porto Alegre-RS



Figura 2.6 - Unidade de Triagem em Porto Alegre-RS

Apesar de ser uma excelente alternativa para a diminuição dos resíduos enviados aos aterros e da redução do gasto com energia, a coleta seletiva apresenta alguns aspectos menos vantajosos, quando comparados com a coleta convencional. São eles:

- aumento das despesas com transporte em função da necessidade do aumento do número de caminhões;
- alto valor unitário, quando comparada com a coleta convencional.

Cabe ressaltar, que não adianta somente a implantação da coleta seletiva, após esta fase inicial. Segundo Chang & Wei (2000), o poder público deve manter a população permanentemente mobilizada através de campanhas de sensibilização e de educação ambiental.

3. Referencial Teórico

A gestão de resíduos sólidos é um tópico que vem atraindo a atenção de pesquisadores em Pesquisa Operacional e Modelagem de Sistemas nos últimos anos (Huang et al., 1998). Prova disso, são os inúmeros trabalhos publicados na área, os quais vão desde a alocação de veículos para a coleta dos resíduos (Bhat, 1996; Everett & Shahi, 1997) até a construção de modelos de avaliação de impacto ambiental provocado pela disposição final dos resíduos, levando em consideração o tipo de disposição, o tipo de resíduo e o local onde foi depositado o mesmo (Perrodin et al., 2002).

Portanto, neste capítulo será feita uma revisão teórica na literatura científica a respeito deste tema de pesquisa, os quais foram utilizados na elaboração desta tese. Os temas a serem desenvolvidos são:

- Roteamento de veículos para a coleta de resíduos sólidos (Tung & Pinnoi, 2000);
- alocação de veículos para a coleta de resíduos (Bhat, 1996);
- localização dos depósitos de destinação final para a reciclagem (Chang & Wei, 2000);
- planejamento do fluxo de resíduos (Huang et al., 1998).

O primeiro caso a ser apresentado da utilização de técnicas de Pesquisa Operacional é uma aplicação do problema do roteamento e escalonamento de veículos na área de gestão ambiental urbana (Tung & Pinnoi, 2000), esta foi desenvolvida na empresa responsável pela coleta de lixo em Hanoi no Vietnam. O problema é caracterizado por carga e descarga dos resíduos com janela de tempo (Bodin & Golden, 1981), tempo entre as chegadas e restrição de tempo total para o percorrimto das rotas. A heurística proposta no artigo é composta de duas fases: a fase de construção da rota e a fase de melhoria da solução construída na primeira fase. Para a rotina de construção das rotas foi utilizada a heurística I1 proposta por Solomon's (1987) e, para a melhoria das soluções encontradas foram empregadas as técnicas *Or-opt* ou *2-opt* (Lin & Kernighan, 1973), ou ainda, uma combinação das duas técnicas.

A distribuição do volume de resíduos sobre janelas de tempo tem influência sobre o número de veículos necessários para a coleta. Foi observado que se houver, ao menos,

uma janela de tempo vazia (nenhuma demanda) entre as coletas e, se esta janela de tempo for ampla, o tempo entre chegadas é menos restritivo o que pode ocasionar melhores soluções, devido à diminuição de restrições no problema.

A solução heurística apresentada por Tung & Pinnoi (2000) comparada com a solução utilizada anteriormente, mostrou-se melhor, tanto em termos de desempenho computacional, como na qualidade gerada. O método heurístico utilizado diagnosticou também, que ao invés da utilização dos 22 caminhões pode-se perfeitamente utilizar somente 18 destes, não prejudicando a qualidade da solução gerada pelo método. Pela aplicação do método, foi constatado que a frota da companhia pode coletar até 20% a mais de resíduos do que coleta atualmente.

O método apresentado por Tung & Pinnoi (2000) contempla um problema de roteamento de veículos com uma frota homogênea e aplicação com um único depósito. Neste depósito, (no caso, o aterro sanitário) não existem restrições relacionadas à demanda requerida de resíduos, o que, quando se trata de resíduos que possam ser reutilizados ou reciclados, é um fator-chave para a determinação das rotas de coletas dos veículos, pois pode-se depender também da capacidade de trabalho e de armazenamento das unidades de triagem. Uma das limitações do trabalho é o fato do mesmo ser desenvolvido somente para um destino final dos resíduos, o aterro sanitário. Futuramente, no caso da construção de um novo aterro ou de novas unidades de destino final, nas quais duas unidades podem funcionar simultaneamente, o modelo precisa ser reconstruído para suportar características dos problemas multi-depósito.

O segundo artigo analisado neste estudo trata do roteamento de veículos e da localização de estações de coleta de resíduos recicláveis na área urbana de Taohsiung em Taiwan (Chang & Wei, 2000). A justificativa para o desenvolvimento da pesquisa é a rapidez com que se esgota o espaço físico dos aterros sanitários e o tempo consumido pelo processo de determinação da área e construção de novos incineradores pela municipalidade, nesta aplicação, a reciclagem dos resíduos surgiu como alternativa viável para a redução da destinação final destes para o aterro sanitário.

Basicamente, foram três os objetivos considerados pela pesquisa:

(1) *Maximização da população servida pelas estações de reciclagem de resíduos.*

Este objetivo é dependente da distribuição da densidade populacional da área de serviço, então, o primeiro objetivo é maximizar a taxa de serviço baseado no total de residentes na área de serviço.

(2) *Minimização da distância a ser percorrida pela população para a entrega dos resíduos (residência – estação de coleta).*

O aumento da quantidade de resíduos a ser reciclada pode estar relacionada a distância das residências às estações de coleta. A minimização do percurso da população até uma estação de coleta de recicláveis pode ser um importante fator de sucesso para os programas de reciclagem desenvolvidos pelas municipalidades.

(3) *Minimização da distância a ser percorrida pelos veículos de coleta de resíduos.*

A distribuição das estações de coleta de resíduos recicláveis é também dependente de um eficiente roteamento dos veículos responsáveis pela coleta. Portanto, o terceiro objetivo a ser considerado é a minimização do somatório das distâncias das rotas a serem percorridas para a tarefa de coleta dos resíduos entre as estações.

O modelo construído para a satisfação dos objetivos apresentados anteriormente utilizou técnicas desenvolvidas no campo da inteligência artificial, tais como algoritmos genéticos (Goldberg, 1989) e conjuntos *fuzzy* (Zadeh, 1978). Primeiramente, foi utilizada uma formulação de abordagem determinística e, posteriormente foram desenvolvidas a partir desta abordagem, funções *fuzzy*, devido à incerteza existente no planejamento da distribuição das estações e do roteamento de veículos. Segundo Chang & Wei (2000), os algoritmos genéticos são utilizados como uma excelente ferramenta para a resolução do problema e, para alcançar a solução ótima de funções objetivos.

A otimalidade do tamanho das estações de coleta, a localização das mesmas, bem como das estratégias de roteamento dos veículos puderam ser preditas através da utilização do modelo. Porém, os autores admitem que em aplicações do mundo real não existe um sistema ideal que possa ser utilizado em todas as municipalidades, as quais necessitem do mesmo. Ainda, complementam que o sucesso de um programa de

reciclagem de resíduos não depende somente de modelos matemáticos para a obtenção de sucesso, e sim, da educação da população através das diferentes mídias existentes.

O modelo, em uma análise crítica, é bastante voltado para a obtenção do ótimo, seja na maximização da população servida pelas estações, como na minimização dos percursos percorridos pela população e veículos de coleta. Como é de maior interesse na concepção deste trabalho o roteamento de veículos, dar-se-á uma maior atenção a este problema e a busca do ótimo nos casos apresentados.

Nos quatro casos (cenários) apresentados no artigo é possível atingir-se a otimalidade para o problema do roteamento de veículos, pois segundo Cordeau et al (2002), somente em problemas com poucas instâncias pode-se atingir a solução ótima e, que nenhum algoritmo de otimização resolve problemas com mais de 50 clientes, no caso, justamente o número de estações de coleta. Desta forma, se forem necessárias mais estações de coleta o ótimo poderá ficar comprometido, pois o sistema está trabalhando no limite das restrições de clientes, tanto dos problemas relatados na literatura (Cordeau et al., 2002), como das restrições existentes nos quatro cenários de execução do modelo. Neste caso, recomenda-se a utilização das abordagens heurísticas para a resolução do problema de roteamento de veículos (Cordeau et al., 2002).

O terceiro artigo analisado trata da otimização da alocação de veículos para a coleta de resíduos, tendo em vista a parcela consumida do orçamento municipal por esta tarefa. Segundo Bhat (1996), os custos com coleta e transferência de resíduos consomem até 80% do orçamento municipal para a gestão dos resíduos sólidos e, através do modelo desenvolvido no artigo o autor busca sensíveis melhorias no processo de coleta dos resíduos, objetivando gerar uma significativa redução nos custos deste.

Após estudos preliminares, no qual, foram estudados os processos de coleta, transferência e disposição final, foi constatado que os fatores determinantes para a melhora substancial de todo o processo eram basicamente:

- Tempo total de viagem por turno do veículo;
- tempo de espera no depósito final;
- tempo para descarregamento de carga;

- taxa de chegada de veículos aos depósitos;
- número de regiões de coleta;
- número de depósitos;
- número de veículos por depósito;
- custo por hora de viagem e de tempo de espera.

Para o desenvolvimento do sistema de transporte e coleta de resíduos foi utilizada a técnica de simulação computacional. Algumas das considerações feitas pelo autor, após as rodadas da simulação, é que se for aumentado o número de depósitos finais, o tempo de espera nos depósitos será menor, bem como a taxa de chegada dos veículos. Outra consideração importante, relativa a custos de operação, foi que o número de depósitos não é diretamente proporcional à distância viajada pelos veículos. Como exemplo, o autor cita que se dois de um total de dez depósitos não estiverem operantes a distância viajada pelos veículos não é acrescida de 20% e, sim, de uma média de 11% apenas.

Para o desenvolvimento do artigo, o autor não referenciou as origens dos dados estatísticos utilizados e somente apresentou um esquema gráfico da simulação desenvolvida. Não foram apresentados os cenários das execuções da simulação, bem como a descrição de como o modelo foi validado. As conclusões apresentadas pelo autor são de que o modelo é de fácil utilização (para gestores que possuam familiaridade com métodos quantitativos) e que pode ser utilizado para a tomada de decisão do tipo “o que se”, tanto para decisões a curto, como a longo prazo, ou seja, conclusões óbvias em se tratando de simulação computacional (Law & Kelton, 1991).

O quarto artigo analisado trata do planejamento da alocação do fluxo de resíduos, levando em consideração a incerteza existente neste tipo de planejamento (Huang et al., 1998). Basicamente, o artigo apresenta um modelo e uma aplicação do mesmo, que trata da minimização do custo de transporte dos resíduos para os diversos tipos de disposição final que os mesmos podem ter (compostagem, reciclagem, incineração e aterramento).

Segundo os autores, muitos são os fatores que provocam incerteza na gestão de resíduos sólidos, por sua vez tais fatores podem influenciar o planejamento do fluxo dos

resíduos. Por outro lado, os gestores municipais encarregados dos resíduos sólidos desejam saber: (1) Os padrões existentes de coleta e transferência de resíduos do município são ótimos?, (2) Se não, qual é o ótimo? Tais questões levaram ao desenvolvimento do modelo e a aplicação do mesmo na região de Hamilton-Wentworth (Ontario-Canadá), a qual possui uma área de 1100 km², seis cidades e 450.000 habitantes.

Os principais fatores que provocam incertezas no planejamento da distribuição de resíduos na região são: a quantidade gerada de resíduos, o custo de transporte, a capacidade de armazenamento e o custo de operação dos depósitos de disposição final. Pelo fato de haver incertezas no planejamento a abordagem determinística foi descartada para o desenvolvimento do modelo. Foi utilizada para a modelagem a técnica *Gray Linear Programming* (GLP), a qual é utilizada para a resolução de problemas sob incerteza e, sob este aspecto apresenta-se mais eficiente do que a programação linear tradicional.

Na solução do GLP, primeiramente transforma-se um problema de Programação Linear em dois sub-problemas de programação linear. Dados os parâmetros, o processo de transformação ocorre da seguinte forma:

- Define-se os valores dos coeficientes de custo das variáveis da função-objetivo, os quais correspondem aos limites inferior e superior.
- Define-se os relacionamentos entre variáveis de decisão e coeficientes das restrições (*left-hand-side*).
- Baseado nos limites das variáveis de decisão e nos relacionamentos destas com as restrições, define-se os limites dos coeficientes das restrições.
- Baseado nos passos anteriores formula-se dois sub-modelos correspondendo aos limites superior e inferior, se o problema é de maximização resolve-se o primeiro modelo, o qual corresponde ao limite superior e vice-versa.
- Quando as restrições do lado direito são incertas, formula-se o modelo com o limite superior do lado direito.

Para a aplicação do modelo às cidades, as mesmas, foram divididas em 17 regiões e a entrega dos resíduos se dava em três estações de transferência. Após a entrega nas estações, os resíduos são destinados para a reciclagem, aterramento ou para a SWARU (do

inglês, *Solid Waste Reduction Unit*), onde os resíduos são incinerados. Devido a questões ambientais (poluição do ar e água), esta unidade de incineração não funciona regularmente e, quando em funcionamento não trabalha com sua capacidade máxima. Por este motivo foram desenvolvidas três aplicações do modelo:

- (1) SWARU trabalhando na taxa atual;
- (2) SWARU trabalhando com capacidade máxima; e
- (3) SWARU não trabalhando.

Os menores custos são obtidos quando a SWARU não está operante e, após a aplicação do modelo constatou-se que as políticas de alocação do fluxo são similares às atualmente utilizadas. Porém, ficou evidente para os desenvolvedores, que se forem executados alguns ajustes no planejamento do fluxo, pode-se ter uma redução de custo de US\$ 200.000 a 300.000 por ano nos gastos com coleta e transferência de resíduos.

O artigo em análise, pouco trata dos veículos que efetuarão o transporte dos resíduos das dezessete regiões em questão até a disposição final, tanto nas estações de transferência, como para reciclagem, aterramento ou incineração, como no caso tratado por (Tung & Pinnoi, 2000), o qual não trata somente do fluxo de resíduos, mas também dos veículos e os turnos para carga e descarga dos mesmos. Porém, no caso dos resíduos recicláveis ou reutilizáveis, não é tratada a capacidade de armazenamento dos depósitos deste tipo de resíduos, o que é importante quando tratamos deste tipo de resíduos, devido ao fluxo de entrada e saída dos mesmos no depósito.

3.1 – Considerações Críticas

Trabalhos envolvendo logística, transporte e destino final de resíduos são amplamente encontrados na literatura da área. Porém, grande parte destes trabalhos é voltada somente para questões ambientais, custos com transporte e menores percursos (figura 3.1), não considerando modelos de decisão para um melhor aproveitamento dos resíduos potencialmente recicláveis (Huang et al., 1998; Tung & Pinnoi, 2000). Cabe ressaltar, que a maioria dos trabalhos que tratam da distribuição dos resíduos sólidos, o fazem como sendo a disposição final destes o aterro sanitário (Chang & Wei, 2000; Tung

& Pinnoi, 2000). Neste tipo de disposição, o fluxo de resíduos é somente de entrada. Portanto, quando a capacidade de armazenamento dos mesmos tende ao esgotamento (ou esgota-se), o aterro entra em estado de desativação. Huang et al. (1998) trata de diversos tipos de disposição de resíduos, tais como, incineração, aterro sanitário e o envio para a reciclagem. Porém, não é efetuado nenhum tratamento especial para os diferentes tipos de resíduos coletados. A pesquisa concentra-se somente no quesito escoamento dos resíduos para os mais diversos tipos de disposição final.

O fluxo dos resíduos provenientes da coleta seletiva, que são o objeto de estudo da pesquisa de doutorado, constitui-se em um caso particular, pois nas usinas de triagem (ou unidades de triagem) o espaço de armazenamento dos resíduos é reduzido e, dependendo da capacidade de processamento destes, pode-se facilmente ter problemas de alocação de espaço físico. Tal fato é desconsiderado pelos autores da área de logística de resíduos sólidos, pois quando tratam deste tipo de coleta, a fazem como se fosse o escoamento para o aterro sanitário. No caso da distribuição da coleta seletiva de resíduos, não se pode tratar somente a minimização do custo de deslocamentos ou a distância percorrida pelos caminhões, tem-se de levar em consideração a capacidade física e de processamento de resíduos das unidades de triagem de resíduos, pois, muitas vezes pode existir uma solução com um custo menor do que outra em termos de transporte, mas que a unidade de triagem em determinado momento não suporte tal carregamento (figura 3.2).

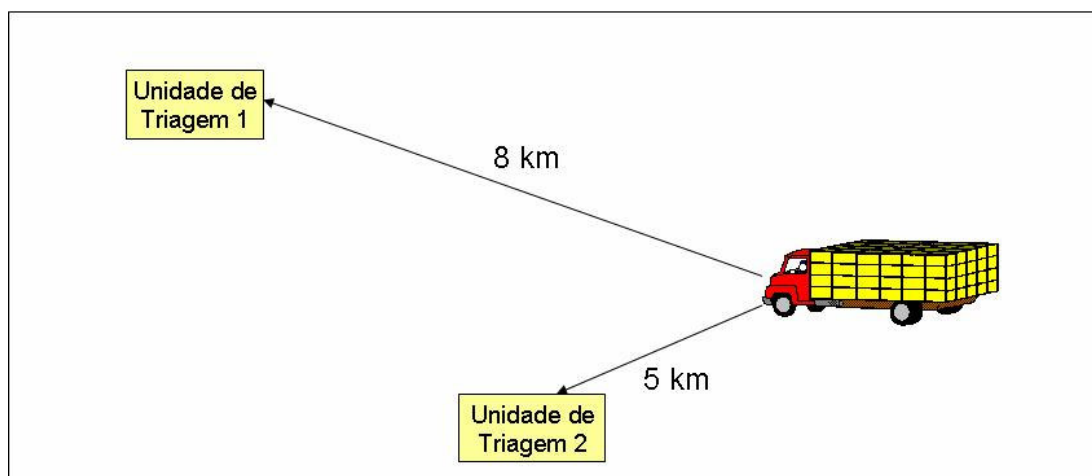


Figura 3.1 – Transporte de resíduo considerando somente a distância a ser percorrida

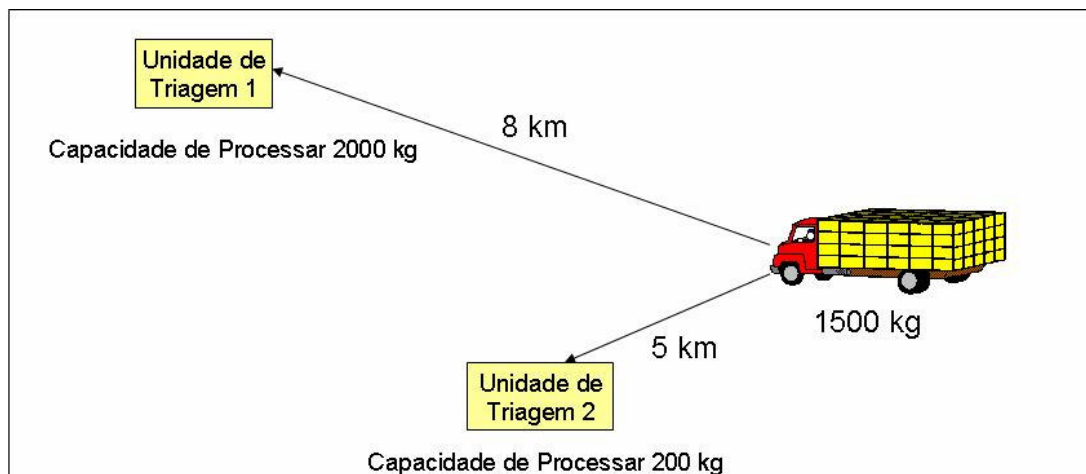


Figura 3.2 – Transporte de resíduo considerando a distância percorrida e a capacidade de processamento

Muitas vezes estes resíduos são destinados diretamente ao aterro sanitário, assim, deixando de serem reaproveitados e não gerando renda para os trabalhadores da unidade. Ao mesmo tempo, uma outra unidade de triagem por ser menos vantajosa em termos de custo, pode não ter material para trabalho, isto resulta em menos quantidade de lixo reaproveitada, mão-de-obra ociosa e uma sobrecarga desnecessária ao aterro sanitário.

Com o desenvolvimento do *SCOLDSS*, pretende-se auxiliar no planejamento e distribuição da coleta seletiva de resíduos sólidos, buscando, como em outros trabalhos, a redução dos custos de transporte dos resíduos sólidos, mas também, objetivando reduzir a quantidade de resíduos recicláveis desperdiçados devido à falta de controle na capacidade de armazenagem e processamento de trabalho nas unidades de triagem deste tipo de resíduo. Especificamente, o sistema de apoio à decisão em desenvolvimento buscará contemplar os seguintes objetivos:

- Alocar os veículos para a coleta diária;
- diminuir o percurso total percorrido pelos veículos de coleta;
- simular o controle do estoque de resíduos nas unidades de triagem, para o melhoramento da distribuição de resíduos;
- evitar ao máximo do desperdício de resíduos a serem reciclados ou reutilizados, através do controle da distribuição dos mesmos.

4. Sistemas de Apoio à Decisão e a Pesquisa Operacional

Segundo Trahand & Hoppen (1998), o sistema de apoio à decisão (SAD) é uma ferramenta destinada ao uso de um ou mais decisores que trabalham num ambiente econômico, social e temporal bastante complexo, portanto o objetivo de um SAD é, pois, auxiliar os decisores no que diz respeito ao aprendizado de como reagir rapidamente e, de maneira eficaz ao ambiente e à pressão cronológica. Conseqüentemente, o objetivo de um SAD não é a automação do processo decisório do gestor, mas, ao contrário, consiste na assistência e na ampliação da sua capacidade de intuição.

Para Alter (1996), um SAD é um sistema interativo que ajuda as pessoas a tomar decisões, usando julgamentos. Tal tipo de sistema visa a apoiar os decisores em tarefas não estruturadas ou semi-estruturadas, gerando informações, modelos ou instrumentos para manipular dados. Um SAD resolve parte dos problemas e colabora em situações isoladas nas quais julgamentos e experiências são necessários. Ele deve apoiar decisores, definindo procedimentos e formatos, mais ainda permitindo aos usuários decidirem como e onde usar a capacidade do sistema. O autor destaca que o alcance de um SAD vai desde a utilização de ferramentas comuns como planilhas, gráficos e banco de dados, até as mais sofisticadas simulações otimizadas para determinadas situações de negócios.

Quanto ao aspecto de arquitetura de um SAD, Sprague & Watson (1991) destacam que o arquiteto de um SAD tem a responsabilidade de desenhar e gerar, utilizando ferramentas e técnicas baseadas em computador, o suporte à decisão solicitada por gerentes.

4.1 - Arquitetura de um Sistema de Apoio à Decisão

A arquitetura de um SAD deverá conter, segundo Sprague & Watson (1991) e Glover et al. (1992) necessariamente, uma base de dados, um modelo e um sistema de *software* para ligar o usuário ao sistema de informação. Especificando a arquitetura, esta revela que, entre a base de dados e a de modelo, há alguns componentes inter-relacionados, e que o sistema de software compreende uma série de três capacidades em se

tratando dos Sistemas de Apoio à Decisão (SAD) (Ver figura 4.1): (1) gerenciamento da base de dados; (2) gerenciamento da base de modelo; e (3) gerenciamento e geração de diálogo. Estes três subsistemas permitem uma estrutura conveniente para identificar capacidades técnicas que um SAD deve contemplar. Alguns aspectos-chave de cada subsistema são relacionados a seguir:

⇒ **Subsistema Dados:** É outro importante aspecto da arquitetura de um SAD, principalmente, em função da rápida evolução tecnológica do gerenciamento de banco de dados e na sua importância no desenvolvimento do sistema. Os dados devem vir tanto de fontes externas como internas, já que decidir, principalmente, em níveis mais elevados da organização, depende fortemente, tanto de fontes externas como de dados econômicos. Alguns aspectos chaves: (1) habilidade para combinar uma variedade de fonte de dados através de um processo de captura e extração; (2) habilidade para adicionar e apagar rapidamente e facilmente as fontes de dados; (3) habilidade para representar estruturas lógicas de dados aos usuários e que os mesmos possam entender o que está disponível e possam especificar necessidades adicionais ou remover desnecessárias; (4) habilidade para manusear dados pessoais e não oficiais e que o usuário possa simular com alternativas baseadas em julgamentos pessoais; e (5) habilidade para administrar uma grande variedade de dados e com uma larga amplitude de funções de gerenciamento de dados.

Como a disponibilidade de dados *on-line* tem crescido os administradores têm explorado esta fonte de informações para melhorar a tomada de decisão, do tipo: quais itens devem permanecer em estoque, como atender melhor seus usuários para aumentar as vendas. A maioria das consultas pode ser feita utilizando-se apenas a SQL. Recentemente, os administradores vêm sentindo a necessidade de um suporte à decisão mais amplo, baseado na análise de dados, extração de dados (*Data Mining*) e na descoberta de conhecimento. Também tem sido muito discutida a questão da integração de bases de dados provenientes de diversas fontes da mesma empresa para melhorar o processo decisório (*Data Warehouse*).

⇒ **Subsistema Modelos:** Um grande aspecto promissor de um SAD é uma habilidade de integrar acesso a dados com modelos de decisão. Isto é feito embutindo modelos de decisão em um sistema de informação que usa um banco de dados como um integrador e um mecanismo de comunicação entre os modelos. O processo de criação de um modelo

deve ser flexível, com uma forte linguagem de modelagem e uma série de blocos, com muitas seqüências iguais de dados que podem ser agrupadas para ajudar no processo de modelagem. Alguns aspectos-chave: (1) habilidade para criar de forma rápida e fácil novos modelos; (2) habilidade para acessar e integrar modelos (construir blocos); (3) habilidade para catalogar e manter uma larga faixa de modelos; suportando todos os níveis dos usuários; e (4) habilidade de inter-relacionar esses modelos com ligações apropriadas através de bancos de dados.

⇒ **Subsistema Diálogo (Interface):** Além de características de consistência, flexibilidade e aplicabilidade, um SAD deve contemplar a capacidade de interação entre o sistema e o usuário. Todas as capacidades do sistema devem ser articuladas e implementadas através do diálogo. Os autores relacionam, entre as capacidades desejáveis para um gerador de SAD suportar um diálogo usuário/sistema, (1) a habilidade para manipular uma variedade de estilos de diálogo; (2) a habilidade para acomodar ações dos usuários com a variedade de dispositivos de entrada; (3) habilidade para apresentar dados com a variedade de dispositivos de formação e saídas; (4) habilidade para gerar suporte flexível para a base de conhecimento do usuário.

Glover et al. (1992) apresenta uma evolução da arquitetura dos SAD, a qual é chamada de SIAD (Sistema Inteligente de Apoio à Decisão), o qual acrescenta mais um subsistema aos três já apresentados que é o subsistema base de conhecimento. Este subsistema tem por características básicas empregar técnicas de inteligência artificial e sistemas especialistas e, utiliza o conhecimento de analistas, tomadores de decisão e dos dados obtidos no subsistema dados. As características básicas deste subsistema são: (1) Analisar dados de entrada no sistema, (2) Mudanças de parâmetros – automatizar o tipo de decisão “o que se”, (3) Análise de pós-otimalidade – extrair informações chaves junto ao sistema e produzir relatórios que facilitem a avaliação das recomendações do sistema.

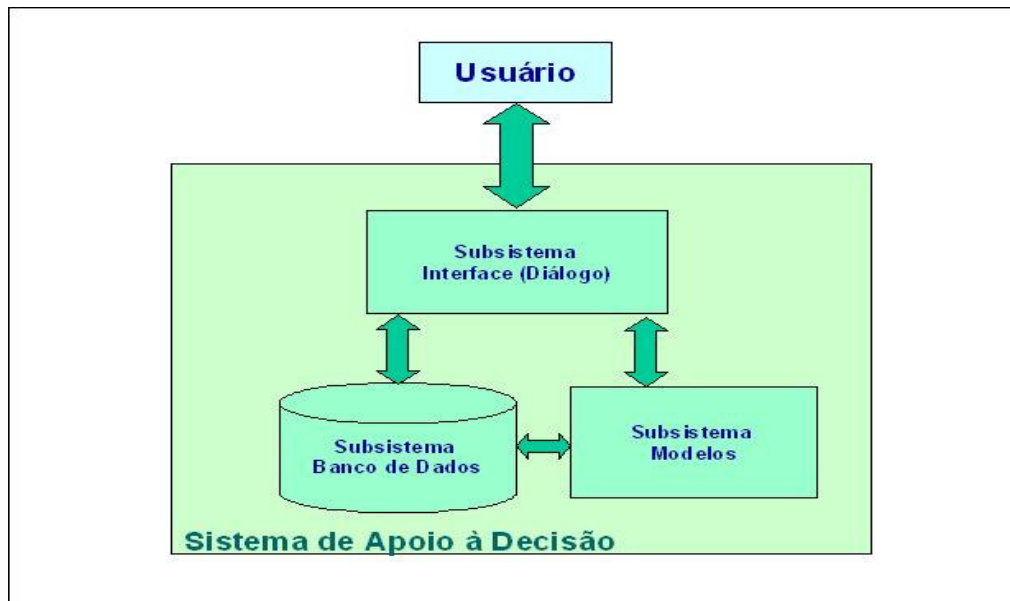


Figura 4.1 – Arquitetura básica de um sistema de apoio à decisão

Dada a importância da Pesquisa Operacional para o desenvolvimento do projeto, no próximo item apresentaremos o seu histórico, bem como dois tópicos de pesquisa que são a Simulação Computacional e a Teoria dos Grafos (roteamento de veículos), as quais fornecerão ferramentas para a concepção do modelo decisório a ser futuramente desenvolvido.

4.2 – Pesquisa Operacional

A Pesquisa Operacional (PO) teve suas origens na II Guerra Mundial, como resultado do trabalho de equipes multidisciplinares na busca de soluções para problemas operacionais e de alocação de recursos escassos. Após o final do conflito, essas técnicas começaram a ser aplicadas a diversos problemas de gerenciamento de atividades produtivas e à análise de situações complexas envolvidas nessas atividades, o que permitiu grande economia no uso dos meios de produção e popularizou o seu uso nesta área de conhecimento. (Ravindran et al., 1987)

Diversos conceitos de Pesquisa Operacional são encontrados na literatura referente à área (Wagner, 1986; Eck, 1976), dentre os quais podemos citar o de Ackoff, (1968), "a Pesquisa Operacional é a aplicação do método científico a problemas envolvendo o

controle de sistemas, de forma a fornecer soluções que interessam a determinada organização”.

Atualmente, ao contrário da década de 40, as aplicações de Pesquisa Operacional não são utilizadas somente a problemas de caráter militar e sim, a diversas áreas do conhecimento, dentre as quais destacam-se as áreas de energia (petróleo e eletricidade), telecomunicações, siderurgia, transporte e com crescente participação nas áreas de agropecuária e na indústria de manufatura. Como ferramentas para a resolução de problemas de PO, podemos citar a: Teoria dos Grafos, Teorias das Filas, Teoria dos Jogos, Programação Dinâmica, Programação por Objetivos, Programação Inteira, Programação Não-Linear, Algoritmos Genéticos, Redes Neurais, Programação Linear e a Simulação Computacional. Devido à complexidade do Sistema de Apoio à Decisão, foi utilizada na concepção do subsistema modelo a combinação de duas técnicas de resolução de problemas de decisão, que são: a simulação computacional de eventos discretos e a teoria dos grafos (problema do roteamento de veículos). Nas próximas seções serão abordados os tópicos referentes a estas duas subáreas da Pesquisa Operacional.

4.3. A Simulação Computacional

A simulação computacional de sistemas consiste na utilização de um conjunto de métodos e técnicas matemáticas, com o objetivo de imitar o comportamento de sistemas reais, geralmente utilizando-se computadores e softwares para tal (Kelton et al., 1998). Ela pode ser definida como um processo de projetar um modelo de um sistema real e, de procedimentos de experimentos com este modelo, com o propósito de verificar o comportamento do sistema, ou até mesmo avaliar estratégias para a sua operação (Pegden et al., 1995).

Através do uso da simulação, pode-se imitar o comportamento de, praticamente, qualquer tipo de operação ou processo do mundo real (Law & Kelton, 1991). Uma das principais etapas de um estudo de simulação consiste na criação de um modelo lógico. Assim, um modelo lógico consiste em um conjunto de suposições e aproximações, devidamente quantificadas e estruturadas, que visam representar o comportamento do

sistema real sob determinadas condições, utilizando-o para prever e comparar alternativas lógicas passíveis de serem simuladas.

Um modelo é utilizado também quando se deseja aprender alguma coisa sobre o sistema real que não se pode observar ou experimentar diretamente, ou pela inexistência do sistema real, ou pela dificuldade de manipulação do mesmo, ou pela impossibilidade de sujeitá-lo ao ensaio sem incorrer em custos elevados e gastos de tempo. A quantidade de simplificações impostas ao modelo influenciará em razão direta na distorção entre os resultados obtidos pelo modelo e pelo sistema real.

A simulação permite também a utilização de variáveis aleatórias, de modo a representar com maior veracidade o comportamento do sistema real. Portanto, este método se constitui numa das ferramentas de análise mais poderosas disponíveis para a representação de sistemas complexos (Kelton et al., 1998). A simulação possui várias aplicações no cotidiano, nas áreas mais diversas, que vão desde o controle de produção em na área de alimentos (Pidd, 1987), do controle do fluxo de papéis em um escritório (Davies, 1994), do controle do trânsito nas cidades (Salt, 1991) até ao controle do transporte de instrumentos cirúrgicos dentro de um hospital (Ceric, 1990)

A simulação computacional será utilizada no projeto para determinar a demanda dos depósitos de resíduos e da quantidade gerada de resíduos nas fontes, pois estas variáveis possuem um alto grau de aleatoriedade, devido à sazonalidade, perfil de consumo da população, dentre outros fatores que contribuem para tal incerteza. O *software* utilizado para a construção do modelo de simulação foi o *Arena 3.5*, devido a interoperabilidade deste com a linguagem *Borland Delphi 7.0*, que foi a linguagem de programação utilizada para o desenvolvimento do sistema.

4.4. O Problema do Roteamento de Veículos

O problema do roteamento de veículos, introduzido por Dantzig & Ramser (1959), é de grande importância na gestão da distribuição de produtos e um dos problemas mais amplamente estudados em otimização combinatorial (Cordeau et al., 2002).

O problema do roteamento de veículos clássico pode ser definido da seguinte forma: Dado um grafo $G=(V, A)$, onde $V=\{v_0, v_1, \dots, v_n\}$ é um conjunto de vértices e, $A=\{(v_i, v_j) : v_i, v_j \in V, i \neq j\}$ é um conjunto de arcos. O vértice v_0 representa um depósito, enquanto que os outros vértices correspondem aos clientes. Com A é associada uma matriz de custo (c_{ij}) e uma matriz de tempo de viagem (t_{ij}) . Se as matrizes forem simétricas, como geralmente é o caso, então definimos o problema do roteamento de veículos sobre um grafo não-dirigido da seguinte forma: Dado um grafo não-dirigido $G=(V, E)$, onde $E=\{(v_i, v_j) : v_i, v_j \in V, i < j\}$ é um conjunto de arestas.

Cada cliente possui uma demanda não-negativa q_i e um tempo de serviço t_i . Uma frota de m veículos idênticos com capacidade Q é associada a um depósito. O número de veículos é definido com antecedência ou pode ser tratado como uma variável de decisão. O problema de roteamento de veículos consiste em definir um conjunto de m entregas ou coletas tais que:

- (1) Cada rota inicie e termine em um depósito;
- (2) cada cliente seja visitado somente uma vez e por somente um veículo;
- (3) o total de demanda de cada rota não exceda Q ;
- (4) a duração total de uma rota não exceda um limite pré-definido D e;
- (5) o custo total da rota seja minimizado.

Uma variante comum do problema de roteamento de veículos é onde uma janela de tempo $[a_i, b_i]$ é imposta sobre a visita a cada cliente. Várias outras extensões têm sido estudadas, como por exemplo: a frota de veículos ser heterogênea (Gendreau et al., 1999), veículos podendo fazer coletas e entregas em uma mesma rota (Mingozzi et al., 1999), alguns veículos poderem estar desabilitados de visitar certos locais (Cordeau & Laporte, 2001), determinados clientes necessitarem mais de uma visita em um mesmo período (Cordeau et al., 1997), a existência de mais de um depósito (Cordeau et al., 1997), as entregas serem divididas entre vários veículos (Dror et al., 1994). Na área de coleta de resíduos sólidos pode-se citar os trabalhos desenvolvidos por Kulcar (1996) e Tung & Pinnoi (2000).

O problema do roteamento de veículos é um problema *NP-hard* (Campello & Maculan, 1994) de otimização combinatória e somente instâncias relativamente pequenas podem ser resolvidas por critérios de otimalidade (Goldbarg & Pacca Luna, 2000). Atualmente, não existem algoritmos capazes de resolver, consistentemente, instâncias com mais de cinquenta clientes (Cordeau et al., 2002). Porém, algoritmos exatos (utilizando *branch and bound* ou programação dinâmica) apresentam uma lenta taxa de convergência, o que torna estas abordagens geralmente inadequadas e pouco utilizadas. Por este motivo as abordagens heurísticas são as mais utilizadas na prática.

No princípio das *heurísticas clássicas* a ênfase estava na obtenção rápida de soluções possíveis e na possibilidade da aplicação destas heurísticas em procedimentos de pós-otimização (Cordeau et al., 2002). Nesta classe encontram-se o algoritmo *savings* (Clarke & Wright, 1964), o algoritmo *sweep* (Gillet & Miller, 1974) e o algoritmo de Fisher & Jaikumar (1981). Nos últimos dez anos os esforços de pesquisa concentraram-se basicamente no desenvolvimento de algoritmos baseados em metaheurísticas, usando basicamente dois princípios: busca local e busca na população (Cordeau et al., 2002).

Nos métodos de busca local, uma intensiva exploração do espaço de soluções é executada a cada etapa, partindo de uma solução atual para uma outra promissora solução, na sua vizinhança. *Simulated Annealing* (Kirkpatrick & Gellatt, 1983) e a Busca Tabu (*tabu search*) (Glover, 1987) são exemplos deste tipo de busca. A busca na população consiste em manter um conjunto de boas soluções *pais* e recombinar estas soluções para gerar novas soluções *filhas*. Um exemplo clássico deste tipo de busca é a busca genética (*genetic search*) (Holland, 1975), a qual combina duas soluções para gerar uma nova solução filha.

4.4.1. Taxonomia para o Problema do Roteamento de Veículos

O problema do roteamento de veículos, segundo Goldbarg & Pacca Luna (2000), está intrinsecamente ligado ao problema de seqüenciamento. O resultado do roteamento além da seqüência de visitas ou a rota pode depender da ordem que as visitas sejam executadas. É de grande importância a tarefa de definir qual abordagem a ser utilizada dentre os diversos tipos de modelagens possíveis, devido a complexidade de cada etapa do

problema. A taxonomia a ser utilizada neste trabalho, para a classificação e definição dos problemas de roteamento, será a taxonomia de Bodin & Golden (1981), devido esta ser uma das mais simples e mais completa para utilização (Tabela 4.1). Segundo Goldbarg & Pacca Luna (2000), a principal vantagem desta sistematização é facilitar a identificação do problema via características e restrições empregadas. O problema de roteamento pode ser classificado segundo os seguintes critérios:

| Critério | Classificação |
|--|--|
| 1. Tempo para servir um determinado Nó ou Arco | <ul style="list-style-type: none"> • Tempo especificado e pré-fixado • Janela de tempo (<i>time window</i>) |
| 2. Número de Domicílios | <ul style="list-style-type: none"> • Um domicílio • Mais de um domicílio |
| 3. Tamanho da Frota de Veículos | <ul style="list-style-type: none"> • Um veículo • Mais de um veículo |
| 4. Tipo de Frota Disponível | <ul style="list-style-type: none"> • Homogênea • Heterogênea |
| 5. Natureza da Demanda e Parâmetros | <ul style="list-style-type: none"> • Determinística • Estocástica |
| 6. Localização da Demanda | <ul style="list-style-type: none"> • Nos vértices • Nos Arcos |
| 7. Grafo de Substrato | <ul style="list-style-type: none"> • Direcionado • Não Direcionado • Misto |
| 8. Restrições nas Capacidades dos Veículos | <ul style="list-style-type: none"> • Todos sujeitos às mesmas restrições • Restrições diferentes |
| 9. Tempo de Roteamento | <ul style="list-style-type: none"> • O mesmo para todos os veículos • Tempos diversos • Sem restrições de tempo |
| 10. Custos | <ul style="list-style-type: none"> • Variáveis (associados à rota escolhida) • Fixos |
| 11. Operação | <ul style="list-style-type: none"> • De entrega • De recolhimento • Ambas |
| 12. Objetivos | <ul style="list-style-type: none"> • Minimizar custos fixos • Minimizar custos de operação na rota • Minimizar o número de veículos |
| 13. Restrições na capacidade dos arcos | <ul style="list-style-type: none"> • Imposta a todos os arcos • Imposta a um subconjunto de arcos • Sem restrições |
| 14. Outras | |

Tabela 4.1 – Taxonomia para classificação dos problemas de roteamento de veículos

Para o desenvolvimento do sistema de apoio à decisão foram utilizados as heurísticas *sweep* e o problema de roteamento de veículos com vários depósitos, os quais são apresentados nas seções referentes ao desenvolvimento do modelo decisório do SCOLDSS. Porém, cabe ressaltar que o modelo decisório, devido a sua generalidade, pode ser implementado com qualquer outra abordagem para a resolução do problema do roteamento de veículos.

4.4.2. Atributos Básicos para Algoritmos de Resolução do Problema de Roteamento de Veículos

Os algoritmos para a resolução do problema de roteamento de veículos são avaliados segundo dois critérios: *acurácia* e *rapidez*. Cordeau et al. (2002) apresenta mais dois critérios para a mensuração de algoritmos, os quais são a *simplicidade* e a *flexibilidade*, que segundo o autor, são atributos essenciais para o desenvolvimento de bons algoritmos.

A acurácia mede o grau de proximidade de uma solução de um algoritmo da solução ótima, como o ótimo é usualmente indisponível no caso de problemas de roteamento de veículos, a maioria das comparações têm sido feitas utilizando-se dos melhores valores atualmente conhecidos para o problema. Uma das dificuldades da mensuração da acurácia é que na maioria das vezes os autores não levam em consideração o número de casas decimais no desenvolvimento de suas soluções. Estudos reportam que existe uma grande variação nos resultados finais dos algoritmos quando se varia o número de dígitos após a parte inteira dos custos.

A rapidez, diz respeito à velocidade do tempo de execução do algoritmo. Este critério é totalmente dependente do nível de planejamento que o problema é resolvido e do grau de acurácia requerida. O nível de planejamento da estratégia de roteamento de ambulâncias é diferente do planejamento de uma transportadora para entregas em um mês. O tempo que se leva para determinar a rota de uma ambulância é em média três minutos (Gendreau, 2001). Portanto, segundo Cordeau et al. (2002), neste critério é muito importante avaliar a situação em que se está aplicando o algoritmo, para determinar se a

rapidez é um critério de natureza crítica, como no exemplo da ambulância, ou se existe tempo para investir na execução do algoritmo na busca de melhores resultados.

A simplicidade diz respeito à facilidade de entendimento e codificação dos algoritmos para resolução do problema de roteamento. Cordeau et al. (2002) ressalta que muitas das heurísticas existentes, raramente são implementadas devido à dificuldade de compreensão das mesmas por parte dos programadores e, que isto deve-se basicamente a forma como são descritas as heurísticas nos artigos científicos. O autor, ainda, atribui o sucesso do algoritmo *savings* de Clark & Wright (1964) à sua facilidade de codificação e entendimento.

Um algoritmo para a resolução do problema de roteamento deve possuir flexibilidade suficiente, de modo que represente em seu contexto as várias restrições que são encontradas em aplicações da vida real. A literatura dos problemas de roteamento foca-se basicamente em restrições de capacidade e, algumas vezes, de comprimento de rotas. Cordeau et al. (2002) salienta que as mudanças que precisam ser feitas em alguns dos algoritmos, como restrições adicionais, nem sempre podem ser executadas e, muitas vezes comprometem o desempenho do algoritmo e, podem também deteriorar os resultados obtidos.

O problema do roteamento de veículos será utilizado para a determinação do escoamento dos resíduos levando em consideração a frota disponível para a coleta dos resíduos recicláveis, bem como os pontos a serem percorridos pelos veículos nos diferentes dias da semana. Esta técnica auxiliará na determinação:

- Das rotas de coletas a serem percorridas;
- das rotas a serem percorridas por determinado veículo de coleta; e
- da associação de um determinado ponto de coleta a uma unidade de triagem (Problema de Roteamento de Veículos com Múltiplos Depósitos).

Cabe ressaltar, que no sistema desenvolvido, os conceitos utilizados na literatura referente à área de roteamento de veículos são substituídos, no caso dos depósitos, utilizar-

se-á denominação de unidades de triagem e, ao invés de clientes será utilizado locais de coleta.

5. SCOLDSS – O Sistema de Apoio à Decisão Proposto

O sistema de apoio à decisão *SCOLDSS* foi construído com base nas pesquisas bibliográficas e observações *in loco* do processo de coleta e distribuição dos resíduos sólidos provenientes da coleta seletiva. Com o desenvolvimento deste sistema busca-se subsidiar o processo de tomada de decisões operacionais (Goldbarg & Pacca Luna, 2000) dos gestores da área de resíduos sólidos no que se refere à logística dos resíduos sólidos, desde a fase de coleta até a fase de entrega dos resíduos, nas unidades de triagem. Especificamente, apoiando as seguintes tarefas: reduzir a quantidade de resíduos sólidos destinada ao aterro sanitário, garantir um percentual de chegada de resíduo em cada unidade de triagem, alocar veículos de coleta, definir o percurso dos mesmos e, ainda, estimar a capacidade de trabalho (produtividade) das unidades de triagem, em relação à chegada e ao processamento (separação) de resíduos. Basicamente, o sistema contribuirá através da geração e análise de possíveis cenários de operação deste tipo de coleta. Considera-se, no estudo desenvolvido, que as etapas para implantação da coleta seletiva (equipamentos, recursos humanos, áreas e periodicidade da coleta seletiva) já estejam devidamente definidas.

Devido ao fato do *SCOLDSS* utilizar a arquitetura de sistemas de apoio à decisão proposta por Sprague & Watson (1991), composta pelos subsistemas básicos apresentados no capítulo quatro, primeiramente foi desenvolvido o subsistema modelo de dados, o qual armazenará os dados necessários ao processo decisório sobre a gestão de resíduos sólidos recicláveis. Este modelo foi concebido para o *SICOLSE* – Sistema de Informação para a Gestão da Coleta Seletiva (Simonetto, 2003) e, não necessitou nenhuma modificação para ser adequado ao *SCOLDSS*.

A abordagem utilizada para o desenvolvimento do sistema foi a metodologia estruturada (Yourdon, 1990), a qual possui esta denominação devido ao fato de que cada passo é construído sobre o passo anterior e, em grande parte, são *lineares* porque cada procedimento é executado apenas após o término do seu antecedente, onde as saídas de um dado módulo servem de entrada para o módulo subsequente. Outras características dessas

metodologias incluem a consideração de uma hierarquia (são, tipicamente, *top-down*) e o interesse sobre o modo como os dados são processados.

Apesar do *SCOLDSS* ter sido desenvolvido com o uso metodologia estruturada, para ilustrar o funcionamento básico do sistema foi utilizada uma das técnicas de diagramação oriunda da metodologia orientada a objetos. A construção de um diagrama de atividades (Booch et al., 2000) serviu para representar a interação do usuário com o sistema. O diagrama de atividades do *SCOLDSS* é apresentado na figura 5.1.

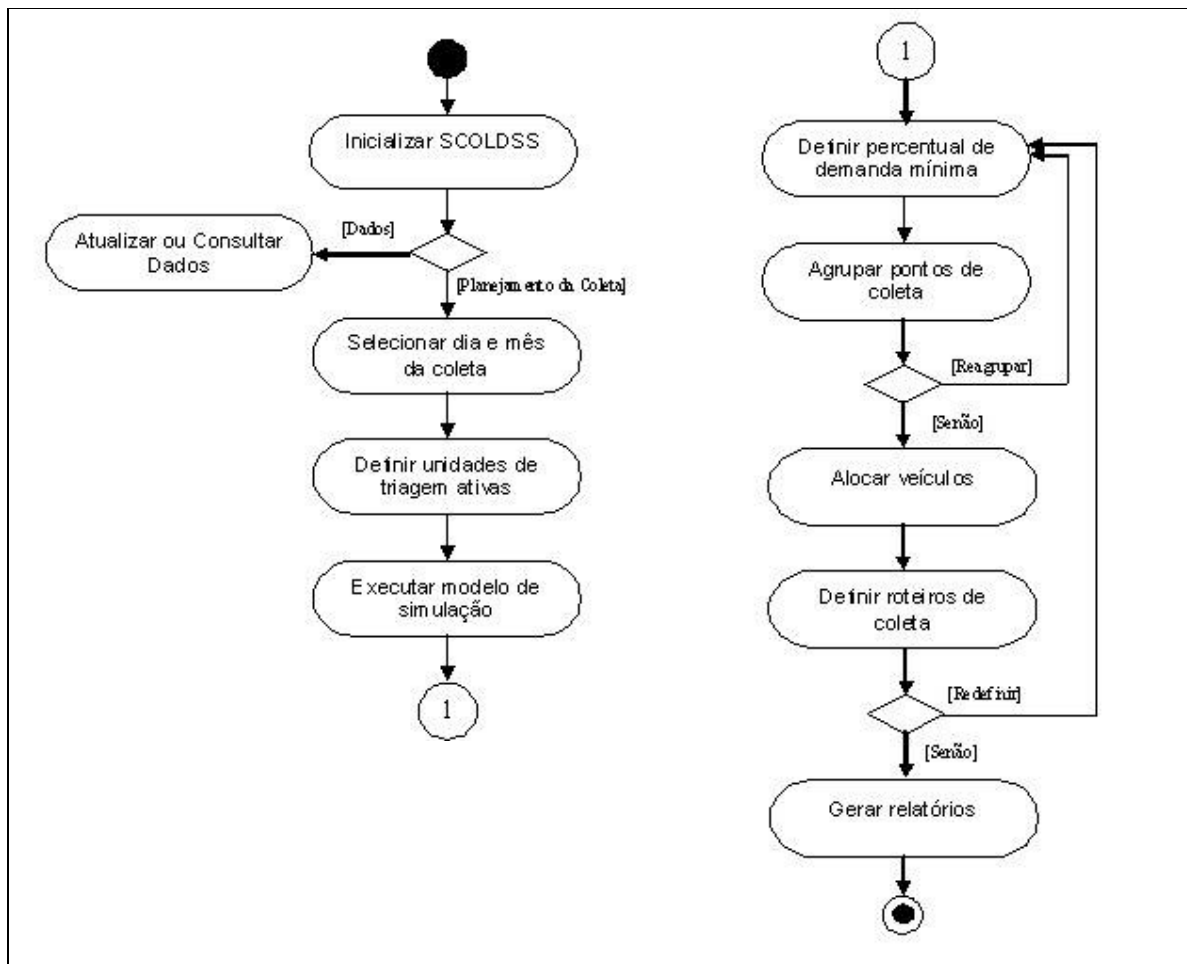


Figura 5.1 – Diagrama de Atividades do *SCOLDSS*

A apresentação do subsistema banco de dados dar-se-á na seção 5.1. Já o subsistema modelo decisório, desenvolvido através da combinação de técnicas distintas da Pesquisa Operacional, será descrito na seção 5.2. A subseção 5.3 e o Anexo A apresentam o subsistema interface, no qual é executada toda a interação dos usuários finais com o

sistema desenvolvido. Na seção 5.4 é dado início à discussão sobre a possibilidade da utilização do *SCOLDSS* em diferentes tipos de coleta seletiva existentes. A arquitetura do *SCOLDSS* pode ser visualizada na figura 5.2.

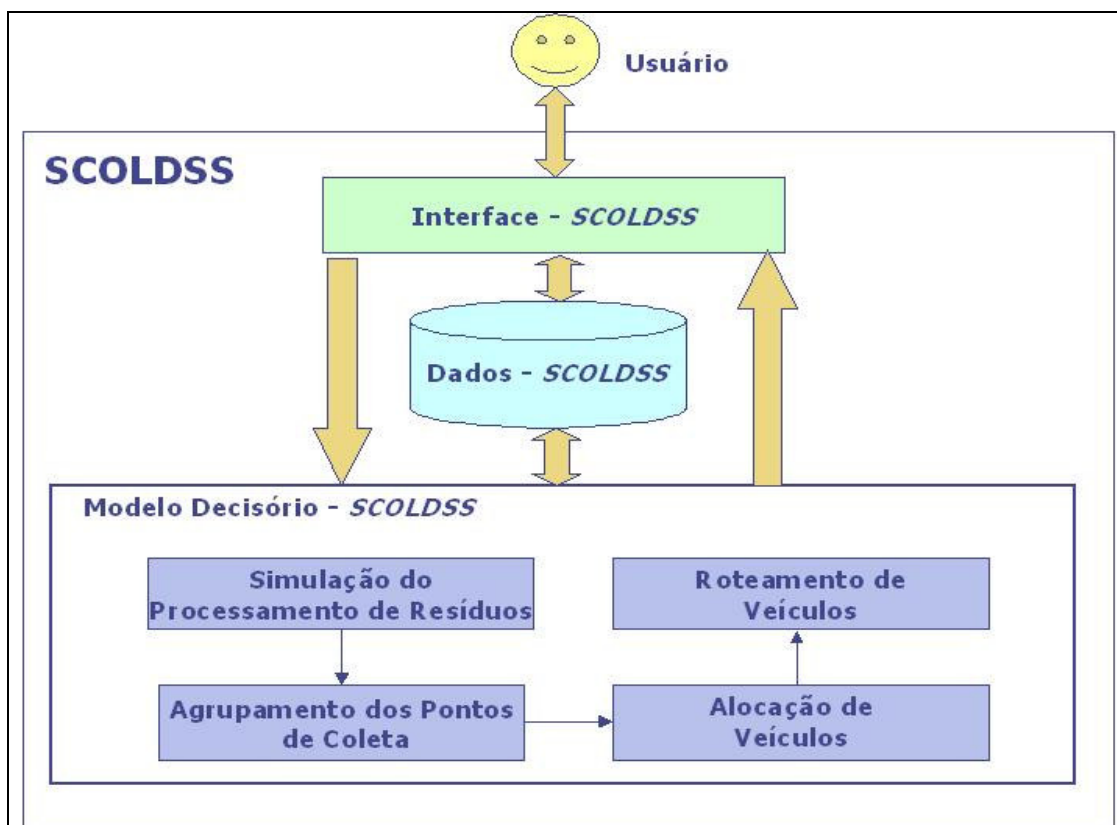


Figura 5.2 – A relação entre os subsistemas do sistema de apoio à decisão

5.1 – Subsistema banco de dados

Um banco de dados deve ser projetado para armazenar todos os dados relevantes da aplicação para a qual o mesmo se destina, permitindo rápido acesso e fácil modificação. As funções da organização para a qual o banco de dados se destina é que determina os dados que serão coletados, quem irá acessá-los e como os usuários poderão usar estes dados. A construção de um banco de dados exige dois tipos diferentes de projeto: o projeto lógico e o projeto físico. Neste trabalho não será dada atenção especial ao projeto físico, pois não é de interesse, neste estudo, saber como os dados são armazenados fisicamente no disco rígido e, também pelas reduzidas e simples dimensões das estruturas de dados geradas pelo mesmo.

Para auxílio, no desenvolvimento do projeto lógico, na etapa de modelagem de dados foi utilizada a técnica de diagramação entidade-relacionamento, a qual utiliza símbolos gráficos para representar e mostrar a organização e o relacionamento entre os dados, onde os retângulos são as entidades e os losangos são os relacionamentos. O modelo de dados desenvolvido pode ser visualizado no diagrama de entidade-relacionamento, desenvolvido utilizando-se a ferramenta CASE DB-Main (DB-Main, 2003) apresentado na figura 5.3.

A premissa básica para a construção do subsistema banco de dados do *SCOLDSS* foi a de selecionar dados, os quais fossem de vital importância à geração de informações para os gestores, bem como para o subsistema modelo, que trabalhará, basicamente, utilizando os dados deste subsistema. Para o desenvolvimento do banco de dados foram utilizados: trabalhos realizados anteriormente a este estudo (Huang et al, 1998, Tung & Pinnoi, 2000, Bhat, 1996, Everett & Shahi, 1997; Chang & Wei, 2000), manuais técnicos relativos à área de Gestão de Resíduos Sólidos (O'Leary et al., 1999; Monteiro et al., 2001), assim como entrevistas para levantamento de requisitos junto à especialistas em gestão de resíduos sólidos. Esta estrutura também foi utilizada como base de dados para o desenvolvimento do Sistema de Informação para a Coleta Seletiva de Resíduos (*SICOLSE*) (Simonetto et al., 2003).

Na literatura referente ao modelo de banco de dados (Korth et al., 1999, Date, 2000), são apresentados os modelos de dados hierárquico, em rede, relacional e orientado a objetos. Os modelos hierárquico e em rede estão em profundo desuso, enquanto o orientado a objeto é ainda uma tecnologia bastante promissora. O modelo mais utilizado no mundo inteiro é, sem dúvida, o relacional (Korth et al., 1999), devido a sua forte fundamentação matemática e a sua facilidade de uso. Os produtos de banco de dados baseados no modelo relacional dominam o mercado de banco de dados. E, mais que isso, a vasta maioria das pesquisas científicas em banco de dados ao longo dos últimos trinta anos também se baseou nesse modelo.

Podemos definir, de modo sucinto, um sistema relacional como sendo aquele no qual (Date, 2000):

- 1) Os dados são percebidos pelo usuário como tabelas, nas quais as linhas são chamadas de tuplas e as colunas de atributos;
- 2) os operadores à disposição dos usuários (por exemplo, para recuperação dos dados) são operadores que geram novas tabelas a partir de tabelas antigas. Por exemplo, há um operador *restrição*, que nos permite extrair um subconjunto das tuplas (linhas) de uma tabela e, outro operador, *projeção*, que extrai um subconjunto das colunas de uma tabela. Um subconjunto de linhas e um subconjunto de colunas de uma tabela podem ser considerados uma tabela.

A linguagem padrão para definição e manipulação de dados é a SQL (do inglês, *Structured Query Language*). Esta abordagem (relacional) foi aplicada para o desenvolvimento do subsistema banco de dados do *SCOLDSS*.

Para a implementação do subsistema banco de dados foi utilizado o SGBD (sistema de gerência de banco de dados) relacional MS-Access da Microsoft. Porém, a partir da estrutura e do modelo de dados apresentados a seguir é possível desenvolver o mesmo em qualquer sistema de banco de dados relacional disponível no mercado, tais como, Oracle, MS-SQL Server, Sybase, dentre outros.

O modelo relacional, desenvolvido após a especificação de requisitos do sistema (Pressman, 2002), do *SCOLDSS* constitui-se das seguintes estruturas, atributos e descrições, conforme pode ser visualizado nas tabelas 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6:

| Estrutura de Dados: Local de Coleta | |
|--|---|
| Atributo | Descrição |
| Código do Local | Identificador único do local de coleta |
| Nome do Local | Descrição do local onde é realizada a coleta |
| Coordenada X | Representação do ponto X do local de coleta no mapa |
| Coordenada Y | Representação do ponto Y do local de coleta no mapa |

Tabela 5.1 – Estrutura de dados Local de Coleta

| Estrutura de Dados: Coleta | |
|-----------------------------------|--|
| Atributo | Descrição |
| Código do Local | Identificador único do local de coleta |
| Data / Hora | Data e hora que foi realizada a coleta |
| Quantidade | Quantidade de resíduos (em kg) coletada no local |
| Código do Veículo | Identificador único do veículo que realizou a coleta |

Tabela 5.2 – Estrutura de dados Coleta

| Estrutura de Dados: Veículo | |
|------------------------------------|---|
| Atributo | Descrição |
| Código do Veículo | Identificador único do veículo de coleta |
| Placa | Placa do veículo de coleta |
| Tipo de Veículo | Identificador do tipo de veículo |
| Código da Unidade de Triagem | Identificador da unidade de triagem, ao qual o veículo será alocado |
| Custo por Km | Custo por quilômetro rodado do veículo |

Tabela 5.3 – Estrutura de dados Veículo

| Estrutura de Dados: Distância | |
|--------------------------------------|---|
| Atributo | Descrição |
| Local Origem | Identificador do local de coleta / Unidade de Triagem |
| Local Destino | Identificador do local de coleta / Unidade de Triagem |
| Distância | Distância entre os locais em quilômetros |

Tabela 5.4 – Estrutura de dados Distância

| Estrutura de Dados: Tipo de Veículo | |
|--|--|
| Atributo | Descrição |
| Tipo de Veículo | Identificador do tipo de veículo |
| Capacidade | Capacidade de transporte do veículo em quilogramas |

Tabela 5.5 – Estrutura de dados Tipo de Veículo

| Estrutura de Dados: Unidade de Triagem | |
|---|--|
| Atributo | Descrição |
| Código do Local | Identificador da Unidade de Triagem |
| Capacidade Máxima | Capacidade máxima em quilogramas da unidade de triagem |

Tabela 5.6 - Estrutura de dados Unidade de Triagem

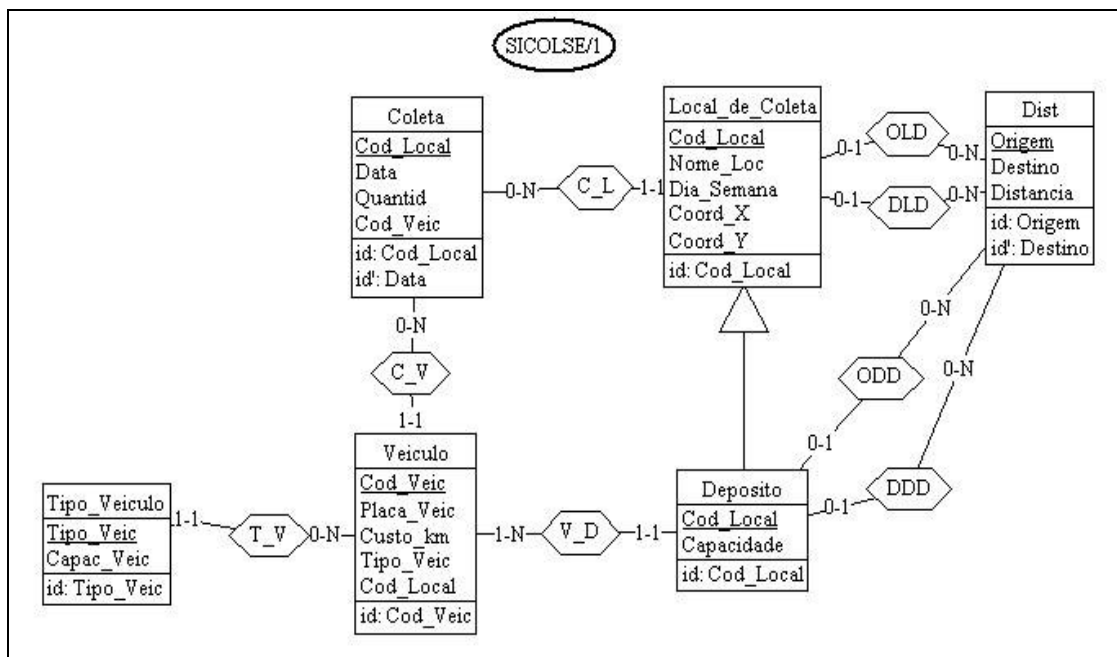
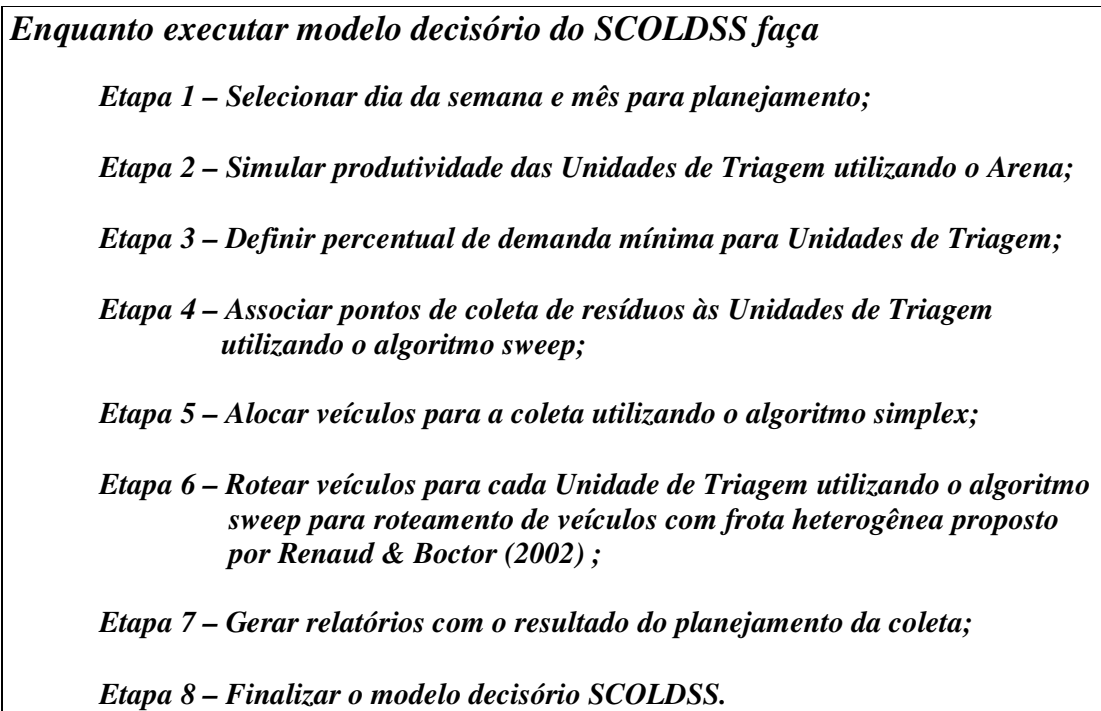


Figura 5.3 – Modelo Entidade-Relacionamento do SCOLDSS

5.2. Subsistema Modelo

O subsistema modelo do SCOLDSS foi concebido utilizando-se técnicas distintas de modelagem quantitativa: a simulação computacional de eventos discretos e o desenvolvimento de algoritmos para a alocação e roteamento de veículos (Figuras 5.3 e 5.4), pois se tem denotado um típico problema de roteamento de veículos com vários depósitos e frota heterogênea, onde os locais de coleta ofertam resíduo sólido a ser demandado por uma unidade de triagem. Além do problema de roteamento, também utiliza-se a simulação computacional na concepção do modelo, no que se refere ao auxílio na determinação das demandas das unidades de triagem. Afinal, as mesmas apresentam um perfil bastante dinâmico de comportamento, basicamente atribuídos à sazonalidades e ao perfil de consumo da população.

O uso destas técnicas é justificado pela natureza distinta dos problemas tratados. Primeiro, a determinação da capacidade de processamento de resíduos; segundo, a determinação do escoamento do fluxo de resíduos (veículos e rotas), em consequência, do resultado das simulações. Com base na interação da simulação do processamento de resíduos nas unidades de triagem, para a determinação da capacidade de processamento de resíduos em um dia e, a execução do problema do roteamento de veículos com múltiplos depósitos e frota heterogênea, serão determinados os percursos dos veículos de coleta de resíduos, bem como o destino final dos resíduos por eles transportados. As estruturas básicas que denotam o funcionamento do modelo decisório do SCOLDSS são apresentadas no quadro 5.1 e na figura 5.4.



Quadro 5.1 – Estrutura linear do funcionamento do modelo decisório do SCOLDSS

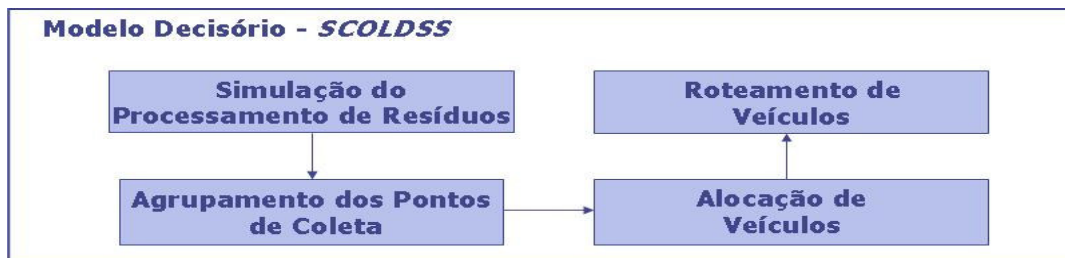


Figura 5.4 – Ilustração gráfica do modelo decisório do SCOLDSS

5.2.1 - Formulação Matemática do Modelo Decisório

A formulação matemática do problema de roteamento de veículos não é um problema trivial (Goldbarg & Pacca Luna, 2000). Assim, utilizou-se no desenvolvimento da formulação matemática do modelo decisório, como base inicial, o modelo de Fisher & Jaikumar (1981) para o problema do roteamento de veículos. Posteriormente, alterações básicas no modelo original se fizeram necessárias devido às características peculiares ao problema em questão, no caso, à coleta seletiva de resíduos. Foram identificadas as necessidades de modificações, logo após as mesmas foram implementadas e agregadas ao modelo básico. As mudanças consistiram, basicamente, no tratamento da existência de mais de uma Unidade de Triagem, ou seja, a inserção de restrições para o tratamento do caso de haver mais de uma unidade de triagem e, a integração de dados originados do modelo de simulação do processamento das unidades de triagem. As restrições, para o tratamento do caso da existência de mais de uma Unidade de Triagem e para a integração dos valores da simulação são, respectivamente, as restrições (1) e (6). O modelo e sua descrição são apresentados a seguir no quadro 5.2.

$$\text{Mimizar } z = \sum_{ij} \left(c_{ij} \sum_k x_{ijk} \right)$$

Sujeito a:

$$\left(\sum_j l_{ij} - \sum_j l_{ju} \right) \leq 0 \quad i = 1, \dots, nd \quad j = nd+1, \dots, n \quad T = \{i \cup j\} \quad u \in T \quad (1)$$

$$\sum_k y_{ik} = 1 \quad i = nd+1, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_k y_{ik} = m \quad i = 1, \dots, nd \quad (3)$$

$$\sum_k x_{ik} = 1 \quad i = 1, \dots, nd \quad (4)$$

$$\sum_i q_i y_{ik} \leq Q_k \quad k = 1, \dots, m \quad (5)$$

$$\sum_i q_j l_{ij} \leq C_i, \text{ onde } \begin{cases} C_i = \mu_i^t, \text{ se } \lambda_i > \mu_i \\ C_i = \lambda_i^t, \text{ se } \mu_i \geq \lambda_i \end{cases} \quad i=1, \dots, nd \quad j=nd+1, \dots, n \quad (6)$$

$$\sum_i q_i l_{ij} \geq C_i p \quad i = 1, \dots, nd \quad j = nd+1, \dots, n \quad (7)$$

$$\sum_j x_{ijk} = \sum_j x_{jik} = y_{ik} \quad i = 1, \dots, nd \quad j = nd+1, \dots, n \quad k=1, \dots, m \quad (8)$$

$$\sum_{ij \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subseteq \{nd+1, \dots, n\} \quad k = 1, \dots, m \quad (9)$$

$$y_{ik} \in \{0,1\} \quad x_{ijk} \in \{0,1\} \quad l_{ij} \in \{0,1\} \quad k = 1, \dots, m \quad (10)$$

$$i, j = 1, \dots, n \quad (11)$$

Quadro 5.2 – Formulação matemática do modelo decisório do SCOLDSS

Onde:

x_{ijk} - variável binária que assume o valor 1 quando o veículo k visita o local de coleta j imediatamente após o local de coleta i , 0 em caso contrário;

l_{ij} - variável binária que assume o valor 1 quando um local de coleta j é associado a uma unidade de triagem i , 0 em caso contrário ;

y_{ik} - variável binária que assume o valor 1 se o local de coleta i é visitado pelo veículo k , 0 em caso contrário;

q_i - a oferta do local de coleta i ;

Q_k - a capacidade do veículo k ;

C_i - a capacidade de demanda máxima da unidade de triagem i ;

p - o percentual mínimo de recebimento de resíduos da demanda máxima da unidade de triagem;

λ_i - o ritmo médio de chegada de resíduo à unidade de triagem;

μ_i - o ritmo médio de processamento de resíduo na unidade de triagem;

t - o tempo total simulado.

A restrição (1) garante que um local de coleta está associado à somente uma unidade de triagem. A restrição (2) assegura que um determinado veículo passará por cada

local de coleta uma única vez. A restrição (3) garante que a unidade de triagem receba uma visita dos veículos associados a ela. Já a restrição (4) dá a garantia que um determinado veículo pode servir a uma única unidade de triagem, por vez a restrição (5) garante que a oferta de um determinado local de coleta não seja maior que a capacidade de carga de um veículo. A restrição (6) assegura que a capacidade de uma unidade de triagem não seja excedida pelas ofertas dos locais de coleta. Nesta restrição ocorre a inserção dos dados provenientes do modelo de simulação do processamento de resíduos. A restrição (7) assegura que uma determinada porcentagem mínima de carga de resíduos irá chegar à unidade de triagem. A restrição (8) garante que os veículos não terão um local de coleta como etapa final da suas rotas e, sim uma unidade de triagem. Já a restrição (9) tem por finalidade garantir a eliminação de *subtours*. As restrições (10) e (11) são restrições complementares ao modelo decisório.

No desenvolvimento do *SCOLDSS* optou-se pela utilização de abordagens heurísticas para a resolução do problema do roteamento de veículos com múltiplos depósitos (Bodin & Golden,1981), ao invés da utilização de programação linear inteira. Tal opção deu-se em virtude da grande quantidade de variáveis inteiras componentes do modelo decisório. Um prático exemplo pode ser visualizado em um dia de coleta seletiva (tabela 5.7) onde possui-se 30 locais de coleta a serem percorridos, 10 unidades de triagem (atualmente) e 24 veículos (dois turnos por dia) aptos a realizar a coleta. Ou seja, os resíduos coletados em qualquer um destes locais podem ser enviados para qualquer unidade de triagem e, podem ser coletados por qualquer um dos veículos disponíveis.

Somente neste exemplo, tem-se 14400 variáveis inteiras a serem analisadas pelo sistema, o que, utilizando-se a programação linear inteira, provavelmente, comprometeria o desempenho computacional do mesmo. Por tal motivo, utilizou-se a abordagem heurística na implementação do *SCOLDSS*, de forma a obter um processamento mais rápido do modelo e de evitar possíveis explosões combinatórias no espaço de soluções possíveis.

| Locais de Coleta | Unidades de Triagem | Veículos |
|------------------------------|---------------------------------|--|
| Vila Ingá R1 Vila Ingá R2 | Aterro Zona Norte Cavallhada | Existem 24 veículos aptos a trabalhar dois turnos por dia. O |

| | | |
|---|--|--|
| Vila Ipiranga R2 Petrópolis R1 Passo das Pedras R1 Santana R1 Ipanema R1 Cidade Baixa R1 Vila Ipiranga R1 Ipanema R2 Cidade Baixa R2 Petrópolis R2 Moinhos de Vento Lami Vila Nova R1 Passo das Pedras R2 Vila Nova R2 Vila Ipiranga R3 Vila Elisabeth R1 Vila Ipiranga R4 Jardim Ipu Hospital I Petrópolis R3 Jardim Leopoldina R1 Rubem Berta Santana R2 Jardim Leopoldina R2 Vila Elisabeth R2 Petrópolis R4 Condomínios –Seg | Ilha dos Marinheiros Padre Cacique Restinga Santíssima Trindade Campo da Tuca Rubem Berta Lomba do Pinheiro São Pedro | número de viagens, portanto, pode ser de 48 viagens diárias. |
|---|--|--|

Tabela 5.7 – Estrutura para um dia de coleta seletiva em Porto Alegre (Fonte:DMLU)

Um exemplo da forma como são integradas as diversas partes componentes do modelo decisório pode ser visualizada no Anexo E da tese. Nas próximas seções serão apresentados os modelos de simulação e heurísticos desenvolvidos, bem como o processo de interação entre estes para o funcionamento do *SCOLDSS*.

5.2.2 – A Simulação do Processamento de Resíduos nas Unidades de Triagem

Quando da utilização do sistema de apoio à decisão, o usuário irá informar: o dia da semana para o qual será efetuado o planejamento da coleta seletiva, o mês do ano (de forma a considerar as eventuais sazonalidades existentes no processo), as unidades de triagem de resíduos operantes, para que seja determinada a quantidade máxima de resíduos sólidos (em kg), que cada unidade em operação é capaz de processar diariamente.

Para auxílio na determinação da produtividade das unidades de triagem (quantidade de resíduos processados diariamente por cada pessoa) foi utilizado o modelo proposto por Lajolo (2003). No referido modelo, basicamente, são levados em consideração o total de resíduos processados diariamente e o número de horas trabalhadas diárias para obtenção da produtividade. Um fato que merece destaque é a variação na produtividade de um separador para outro, pois foram verificados casos, em uma mesma unidade de triagem, que um separador processou 330 kg/dia, enquanto outro processou somente 125 kg (Lajolo, 2003).

Nesta primeira etapa, de acordo com a seleção efetuada na interface do *SCOLDSS* (Figura 5.5) executa-se um modelo de simulação computacional de eventos discretos para a sua resolução e, no caso, é utilizado o simulador *Arena 3.5* (Arena Software, 2003) (veja Figura 5.5). A determinação da capacidade de processamento é uma particularidade do caso de resíduos potencialmente recicláveis e, é originado pelo fluxo de entrada e saída deste tipo de resíduo nas unidades de triagem. Fato este, não verificado no caso dos resíduos sólidos que são direcionados ao aterro sanitário, pois não existe a saída dos resíduos sólidos (somente entrada de resíduos) neste tipo de disposição final (Chang & Wei, 2000; Huang et al., 1998; DMLU, 2003).

O modelo de simulação do *SCOLDSS* é composto, basicamente, pelas seguintes variáveis: quantidade de resíduos potencialmente recicláveis a serem coletados, quantidade de resíduos armazenados por unidade de triagem e quantidade de resíduos processados por unidade de triagem. As variáveis aleatórias componentes do modelo de simulação são: taxa média de geração de resíduo por pessoa em área de coleta, taxa média de chegada de resíduos na unidade de triagem e a taxa média de processamento de resíduo em cada unidade.

Para ilustrar o desenvolvimento do processo de modelagem da simulação discreta no *SCOLDSS* será utilizado o Diagrama de Ciclo de Atividade, pois segundo Pidd (1998), a diagramação auxilia a compreensão do modelo e suas interações. No diagrama de ciclo de atividades os estados ativos são representados por retângulos e têm sua duração estabelecida por eventos, cuja duração é determinada a partir de uma distribuição

probabilística. Já os estados inativos, também chamados de estado de espera, são representados por círculos e ocorrem quando uma entidade está esperando que algo aconteça no sistema, por isso são conhecidos também por “fila”. O diagrama de ciclo de atividade da simulação no *SCOLDSS* é apresentado na figura 5.6.

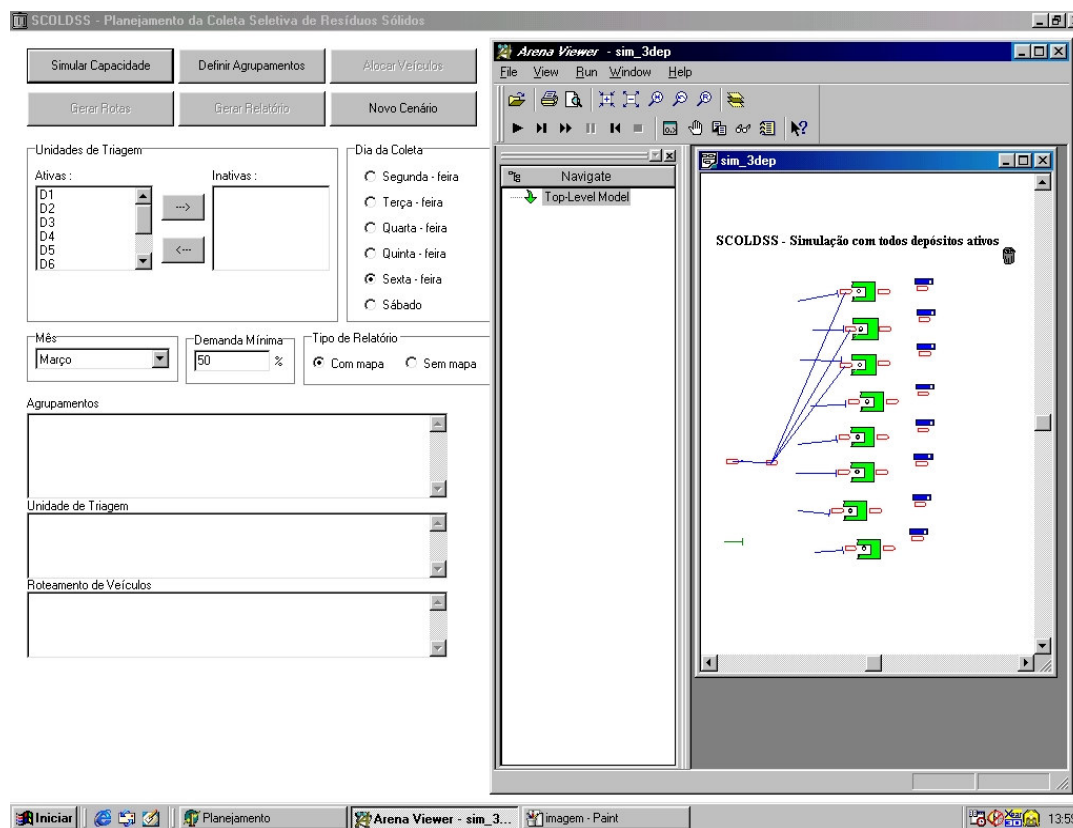


Figura 5.5 – Interface referente à execução do Arena no *SCOLDSS*



Figura 5.6 - Diagrama de Ciclo de Atividade da simulação no *SCOLDSS*

O processo de execução da simulação no sistema consiste, primeiramente, da identificação da *quantidade média de resíduos potencialmente recicláveis gerados em*

cada minuto por habitante nas áreas atingidas pela coleta. A quantificação desta variável, influenciará diretamente na variável de estado *total de resíduos a ser coletado* em um determinado dia. Após a definição deste valor é executada a distribuição dentre as unidades de triagem operantes dos resíduos coletados.

Para a distribuição dos resíduos sólidos entre as unidades, durante a simulação, foi utilizado o componente *Pickstation* do simulador *Arena 3.5*, o qual seleciona a unidade para enviar a matéria-prima (resíduo), em ordem de precedência, de acordo com: o número de recursos (pessoas) utilizados (de modo a evitar ociosidade) e, pela quantidade de matéria-prima pós-consumo aguardando para ser processada, pois em cada unidade de triagem é definida uma capacidade máxima de armazenamento de resíduos. Nesta seleção, no modelo de simulação, podem ser consideradas eventuais interrupções no trabalho (almoço, troca de equipe de trabalho) e a variação da produção de um turno para outro.

Ao definir-se o destino dos resíduos é executada a etapa de chegada destes à unidade de destino, aonde os mesmos chegam de acordo com uma *taxa média de chegada* (quilograma por minuto). Os resíduos são armazenados (*quantidade de resíduos em espera por processamento*) e aguardarão para serem posteriormente selecionados, onde será efetuada mais uma mensuração na qual são identificados os *ritmos médios de processamento de resíduos* pelos selecionadores. A identificação do ritmo médio de processamento de resíduos pelos trabalhadores influenciará na *quantidade total de resíduos processados* por dia / turno na unidade de triagem.

Nesta última etapa (quantidade total de resíduos processados), tanto os resíduos selecionados para retornarem ao mercado, como os resíduos que terão como destino o aterro sanitário, têm de serem levados em consideração pela simulação, pois ambos ocupam espaço físico temporariamente e também consumiram um determinado tempo para serem processados pelos trabalhadores.

Basicamente, para o desenvolvimento do modelo de simulação são necessárias as seguintes informações:

- Média total diária de resíduos a serem coletados pelos veículos (em kg);

- depósito dos resíduos em espaço físico limitado (em kg);
- seleção dos resíduos pelos trabalhadores (em kg por minuto);
- resíduos já processados armazenados (em kg).

A informação gerada pela primeira fase do modelo decisório é a demanda de resíduos sólidos (em kg) que cada unidade de triagem é capaz de processar em um determinado dia de trabalho, obtida pela média das n rodadas da simulação. Para a geração do arquivo com os resultados foi utilizado o módulo de integração do simulador Arena a partir de arquivos textos.

A capacidade de processamento de resíduos em cada unidade de triagem é integrada ao modelo decisório na forma de restrição ao problema do roteamento de veículos com vários depósitos e frota heterogênea. A restrição, conforme pode ser visualizada na formulação matemática do modelo, garante que nenhuma unidade de triagem receba uma quantidade de resíduos maior que a sua capacidade de processamento simulada. Além de garantir que nenhuma unidade receba material a mais do que sua capacidade, também foi inserida no modelo decisório uma restrição que garantisse um percentual mínimo de chegada de resíduo em cada unidade de triagem, na forma de percentual, a qual foi denominada Restrição de Demanda Mínima, como pôde ser visualizado na formulação matemática.

5.2.3 – A Associação de Pontos de Coleta e Veículos às Unidades de Triagem

A fase subsequente da utilização do modelo decisório caracteriza-se por possuímos n unidades de triagem (com a demanda já definida pela primeira fase do modelo) e m pontos de coleta com oferta de resíduo sólido reciclável a serem coletados pelos veículos. Tal descrição denota claramente o problema do roteamento de veículos com vários depósitos (Bodin & Golden, 1981), onde, para a resolução, foi utilizada a abordagem proposta por Gillet & Johnson (1974), implementada na forma de heurísticas do tipo “agrupar para depois rotar”. Nesta abordagem, primeiramente, devem ser associados pontos de coleta às unidades de triagem específicas, através de determinações do tipo “os resíduos do ponto de coleta x serão enviados para a unidade de triagem y ”.

Segundo Larson & Odoni (1999) e Boffey (1982), a abordagem mais conhecida e utilizada é a desenvolvida por Gillet & Johnson (1974), que consiste da associação de pontos (locais de coleta) aos depósitos (unidades de triagem) da seguinte forma: para cada ponto de coleta i é calculado $r(i)$ da seguinte forma:

$$r(i) = \frac{d'(i)}{d''(i)}$$

Onde $d'(i)$ e $d''(i)$ são as distâncias do local de coleta i em relação à unidade de triagem mais próxima e à segunda mais próxima, respectivamente. O valor σ ($0 < \sigma < 1$) é especificado e comparado para cada $r(i)$. Se $r(i) \leq \sigma$, então o ponto de coleta i é imediatamente associado à unidade de triagem mais próxima, assim dando origem aos agrupamentos em redor das unidades de triagem. Entretanto, se $r(i) > \sigma$, é feito um novo processamento, utilizando-se pontos de coleta intermediários para determinar a associação dos pontos às unidades, de modo que, não exista nenhum ponto não associado a uma unidade de triagem. No desenvolvimento do *SCOLDSS* foi utilizado 0,9 (90% mais próximo) como valor padrão de σ . Este valor foi estabelecido devido ao fato básico de que é apresentada uma diferença de distância de, no mínimo, 10% em relação ao ponto mais próximo ao segundo ponto mais próximo do depósito.

Quando todos os agrupamentos estiverem formados (locais de coleta associados às unidades de triagem) é aplicada uma heurística desenvolvida para alocação de veículos em tempo de execução do sistema. Sendo, logo após, executado o algoritmo para a resolução do problema de roteamento de veículos com um único depósito e frota heterogênea. Como resultado desta fase tem-se, separado por unidade de triagem, os pontos de coleta que enviarão resíduos para cada uma delas. Nesta etapa também é garantido o percentual mínimo de chegada de resíduo (em kg) em cada uma das unidades de triagem, de acordo com a capacidade máxima de processamento fornecida pela primeira fase do modelo decisório.

A restrição de demanda mínima possui a finalidade de garantir a chegada de uma determinada quantidade de material de trabalho a cada uma das unidades de triagem, pois na simulação estima-se a capacidade de processamento. Desta forma, não garantindo que uma determinada quantidade de resíduo tenha por destino uma unidade específica. Exemplificando, podemos citar que uma Unidade Fictícia 1 tenha como capacidade

máxima de processamento diário 6.000 kg de resíduo e a Unidade Fictícia 2 tenha como capacidade diária 12.000 kg, suponha-se que o total de resíduo produzido no dia tenha sido de 15.000 kg. Tal quantidade é suportada pelas unidades, pois as mesmas têm capacidade de processar, no dia, 18.000 kg. Se o planejamento destinar 12.000 kg para a Unidade 2, a Unidade 1 ficará com 3.000 kg, apenas 50% do total diário, ou seja, metade da sua capacidade de produção estaria ociosa. Com a restrição de demanda mínima, pretende-se atingir um melhor balanceamento na distribuição do material, portanto se for estabelecido que 75% da capacidade de cada uma delas (unidades), no mínimo, deve ser destinado para cada unidade. No caso, com a aplicação da restrição, seria destinada à Unidade 1 a quantidade de 4.500 kg e, os outros 10.500 kg à Unidade 2.

Para a determinação da oferta de resíduo em cada ponto de coleta, a qual é uma das restrições componentes do problema de roteamento de veículos, foi utilizada a média de coleta (em kg) no ponto e, executada da seguinte forma:

- 1) Seleciona-se o ponto de coleta;
- 2) o dia da semana em que é executada a coleta do ponto;
- 3) o mês para o qual está sendo realizado o planejamento da coleta;
- 4) por fim, executa-se o cálculo da média do peso de resíduos coletada no ponto, levando em consideração os itens anteriores.

Os itens 2, 3 e 4 são gerados através de uma consulta SQL (*Structured Query Language*) ao modelo de dados do SCOLDSS e, esta é apresentada no quadro 5.3.

```
select avg(quant_colet)
from coleta
where cod_local like : local and dia_semana = :dia and
      month(datahora_colet)=:mes;
```

Quadro 5.3 – Consulta SQL necessária para auxílio à geração dos agrupamentos

Nos quadros 5.4 e 5.5 podemos visualizar a estruturação dos agrupamentos e um exemplo de agrupamento gerado pela heurística.

| |
|---|
| $ \begin{array}{c} UT1 \quad pc1, \dots, pcn \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ UTi \quad pc1, \dots, pcn \end{array} $ <p>Onde: <i>i</i> - número total de unidades de triagem; <i>n</i> - número total dos pontos de coleta.</p> |
|---|

Quadro 5.4 – Estrutura genérica dos agrupamentos a serem gerados pela heurística de Gillet (1974)

| |
|--|
| $ \begin{array}{l} UT1 \quad 002 \quad 008 \\ UT2 \quad 001 \quad 004 \quad 015 \quad 006 \\ UT3 \quad X \end{array} $ |
|--|

Quadro 5.5 – Exemplo dos agrupamentos gerados pela heurística no SCOLDSS

Após o procedimento de agrupamento dos pontos de coleta, é efetuada a rotina de alocação dos veículos para a coleta seletiva. Para o desenvolvimento da alocação foi implementado no *SCOLDSS* o algoritmo Simplex (Goldbarg & Pacca Luna, 2000), de forma que não se considerasse no modelo decisório cada veículo individualmente, mas sim por tipos, classificados conforme suas capacidades de carga. Com isto, consegue-se um processamento mais rápido do modelo, evitando possíveis explosões combinatórias no espaço de soluções.

Como resultado final do processamento desta etapa, tem-se estipulada a quantidade de resíduos que um determinado tipo de veículo *k* irá transportar para uma unidade de triagem *i*. Entretanto, se a resolução envolver vários tipos distintos de veículos é necessário utilizar abordagens avançadas (metaheurísticas) para a resolução da alocação, tais como, a busca-tabu, algoritmos genéticos ou *simulated annealing*, pois o algoritmo simplex comporta-se bem somente em problemas com um número reduzido de instâncias. Após a execução do algoritmo de alocação dos veículos é, então, atualizado o subsistema banco de dados com os respectivos tipos de veículos associados a uma unidade de triagem específica. Esta atualização se dá em tempo de execução do *SCOLDSS*. O modelo matemático é apresentado a seguir no quadro 5.6.

| | | | |
|---|--|--|--|
| <p>Mimizar $z = \sum_{ik} (c_{ik} x_{ik})$</p> <p>Sujeito a:</p> $\sum_k q_i x_{ik} \leq Q_k \quad k = 1, \dots, t \quad i = 1, \dots, nd \quad (1)$ $\sum_i q_i x_{ik} \geq D_i \quad i = 1, \dots, nd \quad k = 1, \dots, t \quad (2)$ | | | |
|---|--|--|--|

Quadro 5.6 – Formulação do modelo matemática para alocação de veículos

Onde:

c_{ik} – custo de alocar um veículo do tipo k para uma unidade de triagem i ;

x_{ik} – variável binária que assume o valor 1 se o veículo do tipo k é alocado à unidade de triagem i , e o valor 0 em caso contrário;

q_i – quantidade de material transportada para a unidade de triagem i ;

Q_k – quantidade total de carga que podem ser transportados por veículos do tipo k ;

D_i - demanda mínima da unidade de triagem i ;

Na formulação matemática (quadro 5.6) do modelo de alocação de veículos para a coleta seletiva de resíduos sólidos, a restrição (1) garante que a demanda das unidades de triagem não seja maior que a quantidade total de carga dos veículos do tipo k . Já a restrição (2) garantirá que não chegará uma quantidade de carga menor que a demanda mínima da unidade de triagem.

5.2.4 – O Roteamento de Veículos com Frota Heterogênea

O objetivo, nesta etapa, é gerar as rotas de coleta a serem percorridas, bem como as atribuições de qual veículo deve percorrer cada rota. Após o processamento das rotinas é gerada uma resposta com a seguinte estrutura: para a unidade de triagem x , o veículo n irá percorrer os pontos de coleta a , b e c (nesta ordem). No *SCOLDSS*, o resultado é apresentado na forma de rotas em um relatório gráfico com mapa ilustrativo dos locais a serem percorridos, de modo a facilitar a comunicação com os usuários.

Para o desenvolvimento da solução foi utilizada uma heurística para o problema de roteamento de veículos com frota heterogênea (Renaud & Boctor, 2002), no caso de existência de veículos com capacidades distintas de carregamento. A heurística empregada foi uma variação do *sweep*, porém adaptado a veículos com capacidades distintas de carregamento.

A heurística *sweep* assume que os vértices (locais de coleta) possam ser acessados por qualquer ponto da área a ser roteada, a fim de que possam ser visitados pelos veículos (Boffey, 1982). A unidade de triagem é identificada como o ponto inicial do roteamento, ou também, denominada origem do sistema de coordenadas. Os locais de coleta são colocados em ordem crescente de ângulo em relação à unidade de triagem. Um raio é então traçado da unidade de triagem até um ponto aleatório chamado de *seed* (o primeiro ponto a ser visitado). Inicia-se o agrupamento de pontos para a rota de um veículo partindo-se do ponto *seed* e, continua-se agrupando até a unidade de triagem ou, até onde o veículo suportar a oferta dos locais de coleta. Para escolha dos pontos a serem visitados, geralmente, são escolhidos os pontos de menor custo em relação ao ponto atual onde o veículo encontra-se e, o processo continua até que todos os pontos tenham sido agrupados.

Após o término do agrupamento de pontos, o problema apresenta uma analogia com o famoso *Traveling Salesman Problem*, ou problema do caixeiro viajante, para se determinar uma melhor ordem de visita aos pontos agrupados de cada rota. Vários trabalhos utilizam o método *2-Opt*, *3-Opt* de Lin e Kernighan (Lin & Kernighan, 1973) para a determinação da ordem de visita aos pontos a serem percorridos (Boffey, 1982). O *sweep* é um problema clássico do tipo “primeiro agrupar para depois rotar”.

No caso da heurística desenvolvida por Renaud & Boctor (2002), as etapas básicas de processamento são: determinação da ordem de distância em relação à unidade de triagem, geração de rotas utilizando-se os diferentes tipos de veículos disponíveis e seleção da combinação de menor custo dentre as rotas geradas. Após, tenta-se ainda, melhorar a solução obtida até se chegar a uma melhor solução ou permanecer uma já obtida, após n tentativas do procedimento de melhoria.

Devido à execução do algoritmo de roteamento realizar-se nesta etapa do modelo, necessita-se que as estruturas básicas para o funcionamento do mesmo também sejam desenvolvidas, necessitando-se as seguintes informações:

- 1) A unidade de triagem para a qual será realizado o planejamento;
- 2) os pontos de coleta selecionados para enviarem o resíduo à unidade (oriundos da fase de agrupamento);
- 3) a distância entre os pontos de coleta, bem como a distância destes até a unidade de triagem (cabe ressaltar, que a distância percorrida a partir da garagem está sendo levado em consideração na distância referente às unidades de triagem);
- 4) a média de oferta de resíduo de cada ponto de coleta para o mês determinado na seleção;
- 5) os veículos alocados à unidade de triagem (oriundos da fase de alocação de veículos);
- 6) a capacidade de carga de cada veículo alocado.

Os itens 1 e 2 são originados quando da aplicação da heurística proposta por Gillet & Johnson (1974) para o problema do roteamento de veículos com mais de um depósito e, caracteriza-se por construir os agrupamentos por unidade de triagem (*clusters*) para posteriormente ser executado o roteamento dos mesmos. Os itens 3 e 4 são gerados através de consultas SQL, as quais são apresentadas, respectivamente, nos quadros 5.7 e 5.8.

```
select distancia
from distancia
where origem like :origem and destino like :destino;
```

Quadro 5.7 - Consulta SQL necessária para geração do roteamento de veículos

```
select avg(quant_colet)
from coleta
where cod_local like : local and month(datahora_colet)=:mes;
```

Quadro 5.8 - Consulta SQL necessária para geração do roteamento de veículos

Após esta fase, os resultados são apresentados aos usuários para que apliquem no planejamento ou sirvam de auxílio para a geração de novos cenários. Os resultados são gerados de forma textual ou através de relatórios gráficos, com mapas do planejamento diário de coleta. O formato genérico do arquivo textual pode ser visualizado no quadro 5.9, bem como um exemplo de resultado gerado pela heurística pode ser visualizado no quadro 5.10. No Anexo E da tese é apresentado um exemplo de como é feita a interação entre os modelos componentes do *SCOLDSS*.

```
Unidade de Triagem X
Veic Y - 9999 kg - Rota -- UT - A - B - C - UT
Distância Percorrida - yyyy km
```

Quadro 5.9 – Estrutura genérica do arquivo de resultado textual gerado pela heurística

```
Unidade de Triagem 2 - UT2
Veiculo nº 1 (capacidade=2500 kg)= Rota: UT-005-001-004-UT
Distancia percorrida na rota : 39.00 km
Distancia percorrida total : 39.00 km
```

Quadro 5.10 – Exemplo de resultado textual gerado pela heurística de roteamento

5.3. Subsistema Interface (Diálogo)

O uso de computadores pela sociedade tem crescido continuamente. Em alguns casos são transparentes ao usuário como, por exemplo, na alimentação eletrônica de automóveis. Em outros casos, pessoas não especializadas em computação estão usando diretamente computadores. Isto torna as interfaces homem-computador (interfaces, por simplicidade) um elemento relevante na composição de um sistema computacional (Dix, 1998).

Antes da apresentação do processo de desenvolvimento da interface do *SCOLDSS*, será apresentada uma definição do que se entende por interface, segundo a ênfase do desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão.

“Interface é a parte do software de um sistema interativo responsável por traduzir ações do usuário em ativações das funcionalidades do sistema (aplicação), permitir que os resultados possam ser observados e coordenar esta interação. Em outras palavras, a interface é responsável pelo mapeamento das ações do usuário sobre dispositivos de entrada em pedidos de processamento fornecidos pela aplicação, e pela apresentação em forma adequada dos resultados produzidos” (Dix, 1998).

Newman & Sproull (1979) há mais de uma década já descreviam a influência das interfaces no sucesso de sistemas interativos. Aprender a usá-los geralmente implica em investimento razoável de tempo. Uma boa interface torna a interação com o sistema mais fácil de aprender e usar. Em outras palavras, a interface pode influir, positivamente ou negativamente, na produtividade do usuário, que nem sempre prefere um sistema com mais recursos ou eficiência do ponto de vista computacional.

Para o desenvolvimento do subsistema interface do *SCOLDSS* foi levada em consideração a amigabilidade (*user-friendly*) da mesma para com os possíveis usuários finais, os gestores da área de resíduos sólidos, que não possuem a obrigação de serem especialistas na área computacional. A interface do *SCOLDSS* é apresentada no Anexo A da tese.

5.4 – Aplicabilidade do *SCOLDSS* em Diferentes Estruturas de Coleta

No processo de coleta de resíduo potencialmente reciclável, Costa (1998) destaca a importância dos catadores, coletores informais de resíduos, que coletam uma quantidade superior à quantidade de resíduos coletada pelo DMLU. Além disso, os materiais coletados pelos catadores possuem menos impurezas que os selecionados pelas Unidades de Triagem devido à segregação realizada na hora da coleta.

O *SCOLDSS* por apresentar uma estrutura genérica, no que se refere ao tratamento dos dados e modelos decisórios, pode ser aplicado em qualquer tipo de coleta seletiva e, tanto pode servir para planejar coletas seletivas convencionais, como a executada pelo

DMLU em Porto Alegre ou pela Municipalidade Regional de Hamilton-Wentworth – Canadá (Huang et al., 1998), quanto para o planejamento de coletas realizadas por catadores, as chamadas informais, pois em ambas são tratados aspectos básicos das coletas seletivas, tais como: os locais de coleta, a quantidade e os diferentes tipos de veículos para transporte dos resíduos, o tamanho das rotas, a quantidade a ser coletada e a capacidade das unidades para armazenamento dos resíduos. Cabe ressaltar, também, que com a utilização do *SCOLDSS* é possível efetuar o planejamento de ambas as coletas em conjunto (convencional e informal), através da alteração da restrição (2) do modelo matemático do sistema.

6. Validação do Sistema de Apoio à Decisão

A validação tem recebido atenção em várias áreas de pesquisa, tais como Pesquisa Operacional, Análise de Sistemas, Sistemas Especialistas e, também, nos sistemas de apoio à decisão. Conseqüentemente, é bastante difícil encontrar uma definição padrão para “o que é validação”. Seguem algumas das definições encontradas na bibliografia:

“Validação é o teste de compatibilidade do comportamento do modelo desenvolvido com o sistema do mundo real” (Pressman, 2002)

“Um modelo é uma representação do mundo real ou, no mínimo, parte dele. Por isso, a validação é realmente bastante direta – em princípio. Tudo que a validação precisa fazer é verificar se o comportamento do modelo e do mundo real ocorre sob as mesmas condições. Se sim, o modelo é válido. Se não, então o modelo não é válido.” (Pidd, 1998)

A validação de um sistema de apoio à decisão é definida por Finlay (1994) como sendo “o processo de teste de conformidade entre o comportamento do SAD e o sistema do mundo real que está sendo modelado”. Finlay também afirma que não é possível um SAD conseguir representar o sistema do mundo real na sua totalidade, porém, que existe a possibilidade de se definir relacionamentos entre os componentes de um sistema de apoio à decisão, os quais permitam uma representação aceitável do mundo real.

Para o desenvolvimento da validação do *SCOLDSS* foram estudadas as abordagens propostas por O’Keefe et al. (1987) e por Finlay (1994) para validações de SAD. A primeira abordagem (O’Keefe et al., 1987) foi desenvolvida com base na experiência em validações de sistemas de informação, por parte dos autores. Basicamente, são apresentadas duas técnicas que podem ser utilizadas na prática de validações e, consiste de:

- **Validação Qualitativa** – Utiliza comparações subjetivas de desempenho. As abordagens qualitativas são: validação de face, validação preditiva, testes de campo, análise de sensibilidade e interação visual.

- **Validação Quantitativa** – Utiliza técnicas estatísticas para comparar o desempenho do SAD com casos práticos de teste.

A outra abordagem (Finlay, 1994), propõe a validação de SAD através da combinação de dois métodos:

- **Validação Analítica** – Cada parte do SAD é verificada individualmente e, também, a sua integração com as outras partes componentes do sistema.
- **Validação Sinótica** – Neste tipo de validação é analisado o SAD como um todo e, então a execução do sistema é testada. A validação é executada através da comparação dos resultados do mundo real com os resultados (saídas) produzidos pelo SAD. Se o sistema produz resultados “aceitáveis”, de acordo com as entradas fornecidas, podemos dizer que o sistema é válido.

O objetivo principal deste capítulo é apresentar o processo de validação do *SCOLDSS*. Para tanto, será abordada a teoria de base para a validação de sistemas de apoio à decisão utilizada para tal, bem como o processo de validação executado.

A Pesquisa Operacional caracteriza-se pelo uso de modelos quantitativos, entretanto no desenvolvimento da validação do sistema, existe um grau de dificuldade associado à utilização destes tipos de modelos (Borenstein, 1995; Borenstein, 1998). Para contornar tais dificuldades, durante a validação serão utilizadas algumas características da pesquisa qualitativa, mais especificamente durante a validação de requisitos do sistema, na validação da execução das rotinas (quando da codificação) e na validação de face.

O sistema *SCOLDSS* consiste no desenvolvimento de modelos quantitativos para auxiliar o planejamento operacional da coleta seletiva de resíduos sólidos. Visto que um modelo pode ser definido como “representação do mundo real” (Goldbarg & Pacca Luna, 2000) temos que fazer com que o comportamento da representação seja o mesmo (ou mais próximo possível) da realidade em questão, sob determinadas condições especificadas. Este processo denomina-se validação de modelo. Na primeira fase de validação foram utilizados dados de artigos científicos e de manuais técnicos referentes à área de gestão

integrada de resíduos sólidos, combinados a entrevistas com gestores da área e a observações *in loco* do processo. No desenvolvimento da implementação foram validados cada módulo separadamente e, posteriormente foi desenvolvida a validação da integração dos diferentes módulos componentes do *SCOLDSS*, que corresponde a validação analítica apresentada por Finlay (1994).

6.1 - Validação de Face

A validação de face (Finlay, 1994) do *SCOLDSS* foi desenvolvida com a participação de potenciais usuários do sistema (acadêmicos e profissionais) em um laboratório de computação, que, após receberem instruções sobre o funcionamento, o utilizavam com intuito de verificar a facilidade de uso e a corretude do mesmo.

Os experimentos para a validação de face ocorreram segundo o seguinte procedimento: (a) introdução e apresentação do *SCOLDSS*; (b) demonstração da utilização do mesmo em um problema fictício de coleta seletiva; (c) questionamentos por parte dos participantes da validação e, (d) preenchimento do questionário de validação de face, apresentado no Anexo B.

O *SCOLDSS*, segundo os usuários, é de fácil usabilidade e apresenta uma significativa contribuição para os gestores da área. Uma das principais dificuldades encontradas pelos usuários, durante a utilização do sistema, foi no quesito apresentação dos resultados, mais precisamente no que se refere aos relatórios impressos, pois os resultados eram gerados, para todas as unidades, em uma única página. Após a detecção de tal dificuldade e da confirmação (críticas aos formatos dos relatórios) na análise dos questionários preenchidos por parte dos usuários foi projetada uma nova solução, onde o resultado de cada unidade de triagem é apresentado separadamente em páginas distintas.

6.2 – Validação do *SCOLDSS*

Na validação da alocação e do roteamento de veículos os resultados obtidos foram bastante significativos pelo *SCOLDSS*. Para esta primeira validação foi utilizado um problema de coleta de resíduos sólidos apresentado em Larson & Odoni (1999), o qual é

um problema real com dimensões diminutas. O algoritmo utilizado no *SCOLDSS* (Renaud & Boctor, 2002) apresentou significativas melhorias aos resultados apresentados. Para o roteamento, Larson & Odoni (1999) utilizou a heurística *savings* e um procedimento de melhoria do resultado gerado pela heurística. Em ambos os casos, o algoritmo de Renaud & Boctor (2002) foi superior aos resultados apresentados. Em relação ao *savings* o algoritmo apresentou resultados com custos menores na ordem de 14.4 % e, com relação ao procedimento de melhoria *3-Opt* o algoritmo apresentou resultados com custo mais baixos na ordem de 3.4%. Os resultados são apresentados na tabela 6.1.

| Problema | Larson (1999) | SCOLDSS | Diferença |
|-----------------|----------------------|----------------|------------------|
| <i>Savings</i> | 52,0 km | 44,5 km | 14,42% |
| <i>3-Opt</i> | 46,1 km | 44,5 km | 3,47% |

Tabela 6.1 – Comparações entre as soluções de Larson & Odoni (1999) e do *SCOLDSS*

6.2.1 - Validação do *SCOLDSS* utilizando Dados da Coleta Seletiva de Porto Alegre

A reciclagem de resíduos no Município de Porto Alegre se dá através da Coleta Seletiva. Tal atividade é de responsabilidade do Departamento Municipal de Limpeza Urbana e já atinge 100 % da cidade, abrangendo 150 bairros que somados totalizam em torno de sessenta toneladas por dia. A destinação dos materiais colocados à disposição da Coleta Seletiva são as Unidades de Triagem, criados a partir da necessidade de trabalho de grupos de determinadas áreas carentes da cidade, ex-catadores, papeleiros, populações sub-empregadas e desempregados, que através dessa atividade buscam uma forma de gerar rendimentos, garantindo sua sobrevivência. Todos os rendimentos provenientes da venda dos materiais separados revertem-se em renda para os recicladores de cada Unidade, que constituem diferentes associações (DMLU, 2003).

Os agentes envolvidos no processo de reciclagem na cidade de Porto Alegre-RS foram identificados por Hiwatashi (1999), são eles: os consumidores, geradores de resíduos; o Departamento Municipal de Limpeza Urbana (DMLU), que realiza a limpeza das ruas e coleta dos resíduos domiciliares; as Unidades de Triagem, associações de trabalhadores, que na verdade, realizam a triagem do material recolhido pelo DMLU e; as empresas de reciclagem, que processam o material pós-consumo nas Unidades de Triagem

para poder ser usado como matéria-prima no processo produtivo das empresas de transformação.

Os dados da coleta seletiva a respeito de recursos utilizados, capacidade de processamento de resíduos, quantidades coletadas nos locais, distribuição dos resíduos, veículos necessários à validação do *SCOLDSS* foram fornecidos pela Divisão de Projetos Sociais, Reaproveitamento e Reciclagem do DMLU e, podem ser visualizados na tabela 6.2.

| Recurso | Quantidade |
|--|----------------------------------|
| Veículos | 24 |
| Capacidade dos Veículos | Aproximadamente 1600 kg |
| Pessoas por veículo | 1 motorista e 2 coletadores |
| Unidades de Triagem | 10 |
| Turnos de Trabalho | 2 turnos de 8 horas por dia |
| Capacidade de Processamento de Resíduos | 15 kg/h por pessoa |
| Capacidade de Armazenamento de Resíduos nas Unidades | Aproximadamente 2800 kg |
| Custo da Coleta Seletiva | R\$ 180,00 por tonelada coletada |

Tabela 6.2 – Dados referentes à coleta seletiva de Porto Alegre

Os dados sobre distâncias entre os locais de coletas e as unidades de triagem, assim como as distâncias entre os diferentes locais de coleta foram estimadas utilizando-se o Sistema de Georeferência de Porto Alegre (Procempa, 2004). Já os dados referentes ao número de associados em cada unidade de triagem foram obtidos em Farah & Barboza (2001). Os dados sobre percursos médios em cada rota de coleta foram fornecidos pelo Departamento Municipal de Limpeza Urbana de Porto Alegre.

Para a validação do módulo de simulação da capacidade de processamento de resíduos diário das unidades de triagem foram utilizados dados reais de sete das oito unidades e, foram coletados dados referentes a dois meses de processamento. Nesta validação o sistema comportou-se de maneira correta, com um desvio médio de 1,01% dos

dados reais coletados, o que não compromete o desempenho do sistema, tendo em vista que a simulação trata da capacidade máxima de processamento. Na validação do módulo de simulação da capacidade de processamento das unidades de triagem foram utilizadas as técnicas quantitativa e qualitativa proposta por O'Keefe (1987), a técnica quantitativa no que se refere à comparação dos resultados com os dados reais das unidades de triagem e, a abordagem qualitativa no que refere-se a construção do modelo de simulação, ou seja, na verificação se o modelo retrata de uma forma aceitável o processo existente na realidade.

As execuções da simulação do processamento de resíduos foram desenvolvidas utilizando-se o pacote comercial *Arena 3.5* e, foram executadas da seguinte forma: para cada dia da semana executou-se vinte rodadas do modelo de simulação. Após, calculava-se a média das rodadas e, integrava esta ao modelo decisório do *SCOLDSS*, conforme as restrições (6) do modelo matemático (Quadro 5.2) apresentado no Capítulo 5. Cabe ressaltar, que o tempo médio das vinte execuções, utilizando um computador Pentium II de 1.6 GHz de memória RAM, foi de 13 minutos e 16 segundos e, que o desvio médio dos resultados obtidos no *SCOLDSS*, em relação aos dados reais (atuais) de processamento nas unidades foi de 1,01%. Tal desvio é considerado insignificante tendo em vista que são simuladas capacidades máximas de processamento de resíduos. Os resultados referentes à simulação do processamento de resíduos nas unidades de triagem são apresentados na tabela 6.3 e, correspondem ao cálculo médio referente a cem rodadas da simulação. Os valores expressam o total em quilogramas que cada unidade pode processar no dia especificado.

| | Segunda | Terça | Quarta | Quinta | Sexta |
|------------------|----------------|--------------|---------------|---------------|--------------|
| Unidade 1 | 10600 kg | 10700 kg | 10600 kg | 10600kg | 10550 kg |
| Unidade 2 | 7200 kg | 7200 kg | 7320 kg | 7280 kg | 7300 kg |
| Unidade 3 | 7220 kg | 7240 kg | 7200 kg | 7240 kg | 7210 kg |
| Unidade 4 | 5900 kg | 5850 kg | 5800 kg | 5850 kg | 5900 kg |
| Unidade 5 | 7600 kg | 7550 kg | 7600 kg | 7500 kg | 7600 kg |
| Unidade 6 | 6500 kg | 6450 kg | 6450 kg | 6500 kg | 6500 kg |

| | | | | | |
|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Unidade 7 | 6400 kg | 6400 kg | 6480 kg | 6350 kg | 6370 kg |
| Unidade 8 | 10800 kg | 10800 kg | 10820 kg | 10900 kg | 10850 kg |

Tabela 6.3 – Resultados das execuções da simulação do processamento de resíduos

Para a execução da validação do *SCOLDSS* foram selecionadas, quinze datas distintas (5 em março, 4 em abril e 6 em maio) e, as distâncias estimadas entre os pontos de coletas, bem como das unidades de triagem a estes, foram as mesmas, em ambos os sistemas (atual e *SCOLDSS*), de modo a evitar favorecimentos a uma ou outra solução. As tabelas 6.4 a 6.13, descritas a seguir, apresentam os resultados das comparações entre as soluções utilizadas pelo DMLU e as soluções geradas pelo *SCOLDSS*. E, por fim, na tabela 6.14 são apresentadas às médias diárias das dez execuções do planejamento da coleta seletiva utilizando-se o *SCOLDSS*.

| | | |
|----------------------------------|----------------------|-------------------------------|
| Execução: 1 | | |
| Mês: Março | | |
| | Solução Atual | Solução <i>SCOLDSS</i> |
| Percurso Estimado | 545,8 km | 502,2 km |
| Total de Viagens | 29 | 23 |
| Redução de Percurso | 43,6 km (8,29%) | |
| Redução do No. De Viagens | 6 (21,4%) | |

Tabela 6.4 – Dados referentes à primeira execução da validação do *SCOLDSS*

| | | |
|----------------------------------|----------------------|-------------------------------|
| Execução: 2 | | |
| Mês: Março | | |
| | Solução Atual | Solução <i>SCOLDSS</i> |
| Percurso Estimado | 531 km | 483,9 km |
| Total de Viagens | 28 | 24 |
| Redução de Percurso | 47,1 km (8,87%) | |
| Redução do No. De Viagens | 4 (14,29%) | |

Tabela 6.5 – Dados referentes à segunda execução da validação do *SCOLDSS*

| | | |
|--------------------|----------------------|-------------------------------|
| Execução: 3 | | |
| Mês: Março | | |
| | Solução Atual | Solução <i>SCOLDSS</i> |

| | | |
|----------------------------------|-----------------|----------|
| Percurso Estimado | 442,8 km | 400,4 km |
| Total de Viagens | 24 | 19 |
| Redução de Percurso | 42,4 km (9,58%) | |
| Redução do No. De Viagens | 5 (20,83%) | |

Tabela 6.6 – Dados referentes à terceira execução da validação do SCOLDSS

| | | |
|----------------------------------|----------------------|------------------------|
| Execução: 4 | | |
| Mês: Março | | |
| | Solução Atual | Solução SCOLDSS |
| Percurso Estimado | 591,8 km | 537,2 km |
| Total de Viagens | 33 | 27 |
| Redução de Percurso | 54,6 km (9,23%) | |
| Redução do No. De Viagens | 6 (18,2%) | |

Tabela 6.7 – Dados referentes à quarta execução da validação do SCOLDSS

| | | |
|----------------------------------|----------------------|------------------------|
| Execução: 5 | | |
| Mês: Março | | |
| | Solução Atual | Solução SCOLDSS |
| Percurso Estimado | 222,7 km | 203,4 km |
| Total de Viagens | 14 | 11 |
| Redução de Percurso | 19,3 km (8,68 %) | |
| Redução do No. De Viagens | 3 (21,4 %) | |

Tabela 6.8 - Dados referentes à quinta execução da validação do SCOLDSS

| | | |
|----------------------------------|----------------------|------------------------|
| Execução: 6 | | |
| Mês: Abril | | |
| | Solução Atual | Solução SCOLDSS |
| Percurso Estimado | 545,3 km | 497,6 km |
| Total de Viagens | 29 | 23 |
| Redução de Percurso | 46,2 km (8,75%) | |
| Redução do No. De Viagens | 6 (20,69%) | |

Tabela 6.9 – Dados referentes à sexta execução da validação do SCOLDSS

| | | |
|--------------------|--|--|
| Execução: 7 | | |
| Mês: Abril | | |

| | Solução Atual | Solução SCOLDSS |
|----------------------------------|----------------------|------------------------|
| Percurso Estimado | 441 km | 402,6 km |
| Total de Viagens | 28 | 24 |
| Redução de Percurso | 384 km (8,71%) | |
| Redução do No. De Viagens | 4 (14,29%) | |

Tabela 6.10 – Dados referentes à sétima execução da validação do SCOLDSS

| Execução: 8 | | |
|----------------------------------|----------------------|------------------------|
| Mês: Maio | | |
| | Solução Atual | Solução SCOLDSS |
| Percurso Estimado | 568,4 km | 522,2 km |
| Total de Viagens | 30 | 24 |
| Redução de Percurso | 46,2 km (8,13%) | |
| Redução do No. De Viagens | 6 (20,00%) | |

Tabela 6.11 – Dados referentes à oitava execução da validação do SCOLDSS

| Execução: 9 | | |
|----------------------------------|----------------------|------------------------|
| Mês: Maio | | |
| | Solução Atual | Solução SCOLDSS |
| Percurso Estimado | 514,6 km | 472,9 km |
| Total de Viagens | 27 | 24 |
| Redução de Percurso | 41,7 km (8,10%) | |
| Redução do No. De Viagens | 3 (11,11%) | |

Tabela 6.12 – Dados referentes à nona execução da validação do SCOLDSS

| Execução: 10 | | |
|----------------------------------|----------------------|------------------------|
| Mês: Maio | | |
| | Solução Atual | Solução SCOLDSS |
| Percurso Estimado | 461 km | 422,3 km |
| Total de Viagens | 29 | 25 |
| Redução de Percurso | 38,7 (8,39%) | |
| Redução do No. De Viagens | 4 (13,79%) | |

Tabela 6.13 – Dados referentes à décima execução da validação do SCOLDSS

| | Segunda | Terça | Quarta | Quinta | Sexta | Média |
|---------------------------|---------|-------|--------|--------|--------|------------------|
| Atual Percurso Médio-km | 546,5 | 522,8 | 442,8 | 591,8 | 374,9 | 495,76 km |
| Atual Média de Viagens | 29 | 27,5 | 24 | 33 | 23 | 27,36 |
| Redução Média de Percurso | 45,83 | 44,4 | 42,4 | 54,6 | 31,80 | 43,81 km |
| Redução Média de Viagens | 6,00 | 3,50 | 5,00 | 6,00 | 3,67 | 4,83 |
| Redução Percurso Médio | 8,39% | 8,49% | 9,58% | 9,23% | 8,57% | 8,82% |
| Redução média de viagens | 20,71% | 12,7% | 20,83% | 18,18% | 17,05% | 17,89% |

Tabela 6.14 – Resultados das execuções da validação do *SCOLDSS*

Após a execução das etapas de validação do sistema *SCOLDSS*, tendo por base a tabela anteriormente apresentada (tabela 6.14), que corresponde às médias obtidas em datas distintas de coleta seletiva, pode-se extrair algumas importantes conclusões dos resultados da utilização do sistema para auxílio no planejamento operacional da coleta seletiva.

A primeira das conclusões a ser explorada é a que diz respeito ao agrupamento dos locais de coletas feito pelo *SCOLDSS*. Nos agrupamentos de locais de coleta realizados no sistema atual existem casos em que os locais de coleta estão bastante distantes das unidades de triagem, tal fato contribui em muito para o aumento da distância percorrida pelos veículos de coleta. Com a utilização do *SCOLDSS*, na parte que tange ao problema do roteamento de veículos com vários depósitos foi utilizado o algoritmo proposto por Gillet & Johnson (1974), o qual agrupa os locais de coleta mais próximos às unidades de triagem, desde que estas tenham condições de processar o carregamento.

Outra das conclusões a ser explorada diz respeito ao uso dos veículos de coleta, que na atual estrutura de coleta é designado um veículo para cada viagem. Se o local possuir uma taxa elevada de geração de resíduo para coleta é válida tal designação. No entanto, não se justifica alocar uma viagem para efetuar a coleta de quatrocentos quilogramas, tendo em vista que a capacidade de transporte dos veículos é de aproximadamente um mil e seiscentos quilogramas.

O *SCOLDSS*, após o agrupamento, busca se possível encontrar formas de em uma única viagem percorrer dois ou três locais de coletas distintos, com o intuito de, conforme

pode ser visualizado nas execuções da validação, reduzir o número de viagens e a distância a ser percorrida pelos veículos de coleta. Com a utilização do sistema pode-se visualizar a redução média de 8,82% na distância a ser percorrida pelos veículos de coleta e, a redução de 17,89% no número de viagens dos veículos por semana. Considerando-se que a distância média percorrida pelos veículos, atualmente, é de 494,43 km/dia a redução com o uso do *SCOLDSS* é bastante significativa, já que é estimada em 43,8 km. Por semana seriam reduzidos, em média, 262,8 km, o que em um ano, levando em consideração que um ano possui cinquenta e duas semanas, poderia ser estimado em 13.665 km. Em se tratando de estimativas financeiras, esta redução de quilometragem poderia representar uma economia de valor em torno de R\$ 5.021,88. Tal estimativa foi obtida considerando que os veículos rodam 4 km com um litro de óleo diesel e, o preço do litro de óleo em cerca de R\$ 1,47.

No que diz respeito ao número de viagens, a média atual é de 27,3 viagens por dia (163,8 por semana), com a redução gerada pelo *SCOLDSS* (17,89%), este número passaria a ser de 134,9 viagens semanais, que em um ano resultaria em uma redução de 1502 viagens. Considerando-se que o preço médio de uma viagem realizada atualmente é de R\$ 6,65, com a utilização do *SCOLDSS* o preço médio da viagem eleva-se para R\$ 7,37. Este aumento dá-se devido ao aumento na média de quilometragem percorrida em cada viagem. Para tal cálculo foi considerado somente o consumo de combustível, assim, desconsiderando custos de recursos humanos, manutenção de veículos, dentre outros.

Um fator a ser ressaltado é o de que nos dias com menos locais de coleta a serem percorridos, são obtidas as taxas mais baixas de melhoria no número de viagens, com o uso do *SCOLDSS*. Tal fato deve-se à redução de soluções no espaço de buscas, ou seja, um número menor de opções para combinações de locais a serem percorridos pelos veículos. Os resultados obtidos evidenciam as melhorias, que podem ser realizadas no planejamento operacional do processo de coleta seletiva através da utilização do sistema *SCOLDSS*, no que se refere à redução da distância percorrida, bem como no total de viagens a serem realizadas para a coleta de resíduos.

Outra das conclusões que pode ser extraída aborda o módulo de simulação da capacidade de processamento das unidades de triagem, pois dadas as características das

mesmas, fornecidas pelo DMLU, o *SCOLDSS* comportou-se de forma correta, apresentando um desvio médio de 1,01% da capacidade informada, tal desvio não compromete o desempenho do sistema, pois as mesmas tratam da capacidade máxima do processamento diário de resíduos sólidos. Um fator que merece destaque na parte referente à simulação do processamento é o que diz respeito à distribuição do material coletado entre as unidades de triagem ativas nos dias de coleta. Constatou-se que em alguns dias, determinadas unidades de triagem possuíam capacidade de processamento, porém não recebiam nenhum material para trabalho.

Ao utilizar-se o percentual de demanda mínima de 6% na execução das validações, estas passaram a receber material de outras unidades, porém, sem jamais prejudicar estas unidades, no que tange às suas capacidades de processamento de resíduos. Desta forma, pode-se afirmar que ocorreu uma melhor distribuição dos resíduos, de acordo com a capacidade de processamento de cada unidade de triagem ativa e do percentual de demanda mínimo, no dia de coleta em questão. Uma demonstração de um dia de coleta, onde uma determinada unidade de triagem não recebe material para processamento e, que após a utilização do *SCOLDSS*, a mesma passa a receber pode ser visualizada no Anexo C da tese.

7. Considerações Finais

O objetivo do trabalho foi apresentar a concepção e o desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão através do qual possa-se efetuar o planejamento operacional da coleta e distribuição dos resíduos sólidos potencialmente recicláveis. Para tanto levou-se em consideração as etapas básicas componentes do processo, tais como: a coleta pelos veículos; o destino final após o percurso; e integrando ao modelo, o controle da capacidade de armazenamento e de processamento do material nas unidades de triagem deste tipo específico de resíduo.

Como referencial teórico, foi desenvolvido um estudo introdutório sobre os resíduos sólidos, reciclagem e coleta seletiva (Capítulo 2). Também foram analisados artigos técnicos referentes à aplicação de técnicas de Pesquisa Operacional na Gestão dos Resíduos Sólidos (Capítulo 3). Nesta análise pode-se constatar que os artigos que tratam da distribuição dos resíduos trabalham tendo como disposição final o aterro sanitário, onde não existe a preocupação com o fluxo de resíduos, pois no mesmo só existe a entrada dos resíduos (Chang & Wei, 2000; Tung & Pinnoi, 2000). Para a concepção e desenvolvimento do sistema foram analisados os dados fornecidos pela Divisão de Projetos Sociais, Reaproveitamento e Reciclagem do Departamento Municipal de Limpeza Urbana de Porto Alegre, bem como observações *in loco* do processo de coleta seletiva.

Ainda no que diz respeito ao referencial teórico da tese, foi desenvolvido um estudo referente às teorias utilizadas no trabalho, quais sejam, os sistemas de apoio à decisão e a Pesquisa Operacional e, internamente a esta, a simulação de eventos discretos e o problema do roteamento de veículos (Capítulo 4). Na parte relativa aos sistemas de apoio à decisão foi desenvolvido um estudo referente à arquitetura de Sprague & Watson (1991) utilizada para a concepção e desenvolvimento do *SCOLDSS*. A simulação computacional foi utilizada no projeto para determinar a demanda dos depósitos de resíduos e da quantidade gerada de resíduos nas fontes e, o problema de roteamento de veículos foi utilizado para a determinação do escoamento dos resíduos às unidades, levando em consideração a frota disponível para a coleta dos resíduos recicláveis, bem como os pontos a serem percorridos pelos veículos. Nos capítulos restantes (5 e 6) foi

apresentado o sistema *SCOLDSS*, bem como sua arquitetura e formulação matemática e, por fim, a validação do sistema.

Nas próximas duas seções (7.1 e 7.2) serão apresentadas as limitações da pesquisa desenvolvida, bem como os resultados e conclusões obtidas com o desenvolvimento da mesma.

7.1 – Limitações e Possibilidade de Futuras Pesquisas

No trabalho desenvolvido, apesar dos resultados gerados pelo mesmo terem satisfeitos os objetivos propostos quando da sua concepção, alguns pontos poderiam ter sido mais bem discutidos e tratados. Talvez por se desviarem dos objetivos gerais e específicos ou, até mesmo, pela falta de uma maior elasticidade temporal para seu desenvolvimento, não mereceram a devida atenção na elaboração do mesmo. Para cada uma das limitações da pesquisa apresentadas a seguir é apresentado um possível curso de ação para a incorporação da mesma ao trabalho. São as limitações identificadas:

(a) O sistema parte do princípio que já existam estabelecidos locais de coleta a serem percorridos diariamente.

A utilização do *SCOLDSS* parte do princípio de que, no município onde o mesmo será aplicado, já exista um plano de coleta seletiva em execução, onde determinado bairro já saiba que o veículo coletor irá efetuar a coleta seletiva em suas ruas em um dia estabelecido anteriormente. Uma possível solução a ser analisada (futuras pesquisas) para auxiliar na resolução deste problema é a aplicação do algoritmo apresentado por Gillet (1974), o qual tem por função gerar agrupamentos de locais em torno de um depósito, levando em consideração a distância destes locais em relação aos dois depósitos mais próximos. Formados os agrupamentos, pode-se posteriormente fazer uma análise e determinar em que dias da semana tais locais serão percorridos e, para qual depósito, possivelmente, enviarão o material a ser coletado.

(b) O sistema utilizou dados médios, relativos a percursos nos locais de coleta, fornecidos pela empresa de coleta.

Como consequência, o percurso atualmente utilizado talvez não seja efetivamente o melhor (em termos de distância). Para a resolução desta limitação, poderia-se primeiramente realizar uma pesquisa, onde utilizando-se o sistema de geoprocessamento do município pudessem ser determinadas as distâncias a serem percorridas em cada rua e, de material fornecido pelo departamento de controle do trânsito do mesmo, para identificação dos sentidos de tráfego nas vias. Em uma segunda etapa, após a realização da primeira, para cada local de coleta, poderia ser utilizado o algoritmo do carteiro chinês (*Postman Chinese Problem*), o qual tem por funcionalidade propor um percurso, no caso pelas vias, minimizando a distância total percorrida (Goldbarg & Pacca Luna, 2000).

Outro problema que não foi devidamente abordado no desenvolvimento da tese, foi o da coleta por produto individualizado. Para tal problema pode ser utilizada a abordagem do problema de roteamento de veículos de derivados de petróleo, onde os tipos de combustíveis não podem dividir o mesmo compartimento. Além disso, alguns tipos de derivados, o gás natural, por exemplo, necessitam um tipo de veículo específico para o seu transporte. (Brown & Graves, 1981).

Todavia, no momento em que os itens anteriormente descritos apresentam-se como limites da pesquisa, também instigam o pesquisador a dar continuidade ao trabalho, já em desenvolvimento, para que o mesmo atinja níveis cada vez melhores de qualidade.

7.2 – Conclusões e Recomendações Gerais

A pesquisa desenvolvida para elaboração da tese contemplou os objetivos específicos de: (a) projetar uma solução aceitável para a resolução do problema da coleta e distribuição dos resíduos potencialmente recicláveis; (b) implementar em um ambiente computacional a solução desenvolvida e; (c) avaliar o comportamento e desempenho do sistema de apoio à decisão desenvolvido, utilizando dados de problemas reais da coleta seletiva. Depois de desenvolvidos os objetivos específicos estabelecidos, quais sejam, a concepção e o desenvolvimento do sistema *SCOLDSS*, bem como sua posterior validação utilizando dados reais da coleta seletiva de Porto Alegre, pôde-se extrair resultados, bem

como conclusões a partir destes. Os resultados possíveis de serem obtidos através do uso do *SCOLDSS* são:

- (a) Obtenção da redução da distância percorrida pelos veículos de coleta;
- (b) obtenção da redução do número de viagens;
- (c) obtenção do equilíbrio na distribuição dos resíduos coletados entre as Unidades de Triagem.

Especificamente para o estudo de caso realizado com dados do DMLU, os seguintes resultados foram obtidos:

- Soluções para percursos, em média, 8,82% melhores que as realizadas atualmente;
- redução no número de viagens dos veículos de coleta na ordem de 17,89%;
- através da simulação do processamento de resíduos nas unidades de triagem e da definição do percentual de demanda mínima de resíduos por unidade, pôde-se balancear a distribuição dos mesmos entre estas, por dia de coleta. Desta forma, de acordo com a capacidade de processamento individual, é garantido material de trabalho a cada unidade operante nos dias de coleta seletiva.

Após a análise dos resultados gerados pela *SCOLDSS* uma das recomendações que poderiam ser feitas, é a de que, em determinados dias de coleta, seja feito um aumento do número de locais a serem percorridos pelos veículos de coleta. Pois, em muito dos casos, o número de viagens feitas pelos veículos são de vinte e duas. Considerando-se que o número de veículos disponíveis é vinte e quatro e, que a coleta é realizada pela manhã e tarde, têm-se que, no mínimo, os veículos possam executar 48 (quarenta e oito) viagens por dia (desconsiderando eventuais quebras dos veículos). O aumento no número de viagens de coleta poderia trazer:

- menor taxa de subutilização dos veículos;
- aumento na quantidade de matéria-prima pós-consumo a ser destinada às unidades de triagem para processamento (tendo em vista que, no atual contexto, estas têm capacidade de processar uma quantidade maior de resíduos);
- aumento na quantidade de resíduos reciclados e reutilizados, gerando maior rentabilidade aos associados;

- economia de energia e aumento do tempo de vida útil dos aterros sanitários.

Outra das recomendações diz respeito à aplicação e garantia do sucesso do sistema de apoio à decisão a ser desenvolvido. Para tal obtenção, necessitar-se-á conscientização e apoio da população, no que se refere à coleta seletiva, para que separe os resíduos na origem, acondicione-os de forma a facilitar a coleta e, deposite-os para coleta no dia e local indicado anteriormente pelos responsáveis pela coleta seletiva de resíduos. Tal recomendação é comumente encontrada em artigos que tratam da coleta de resíduos em geral, conforme é relatado em Chang & Wei (2000).

Referências Bibliográficas

Ackoff, R. L. **Fundamentals of Operations Research**. New York: John Wiley, 1968.

Alter, S. **Information Systems: A Management Perspective**. Menlo Park, USA: Benjamin & Cummings, 1996, 2 ed., 728 p.

Arena Software. **Arena – Overview**. Disponível na Web em: <http://www.arenasoftware.com>. Acessado em 16 de dezembro de 2003.

Barlaz, M.A.; et al. **Life-Cycle Study of Municipal Solid Waste Management – System Description**. Washington DC: U.S. Environmental Protection Agency, 1995.

Bhat, V.N. A model for the optimal allocation of trucks for the solid waste management. **Waste Management & Research**, 14, pp.87-96, 1996.

BNDES. **A Coleta seletiva e reciclagem do lixo**. Dicas para o Desenvolvimento Urbano. Disponível na Web em: <http://federativo.bndes.gov.br/dicas/>. Acessado em 17 de junho de 2004.

Bodin, L.D.; Golden, B. Classification in vehicle routing and scheduling. **Networks**, 11, pp. 97-108, 1981.

Boffey, T.B. **Graph Theory in Operations Research**. Mac Millan, 1982.

Booch, G.; Rumbaugh, J.; Jacobson, I. **UML – Guia do Usuário**. Campus, 2000.

Borenstein, D. Towards a Practical Method to Validate Decision Support Systems. **Decision Support Systems**, v. 23, n. 3, p. 227-239, 1998.

Borenstein, D. **Integrated Decision Support System for Flexible Manufacturing System Design**. Tese de doutorado, University of Strathclyde, Glasgow, Escócia, 1995.

Borland Software Corporation. **Borland Delphi**. Disponível na web em: <http://www.borland.com.br/delphi/>. Acessado em 18 de julho de 2003.

Brown, G.G.; Graves, G.W. Real time dispatching of petroleum tank trucks. **Management Science**, 27, pp. 19-32, 1981.

Calderoni, S. **Os bilhões perdidos no lixo**. Editora da USP, 1997.

Campello, R.; Maculan Filho, N. **Algoritmos e Heurísticas**. Editora da Universidade Federal Fluminense, 1994.

Ceric, V. Simulation study of an automated guided-vehicle system in an Yugoslav hospital. **Journal of the Operational Research Society**, 41, 4, pp.299-310, 1990.

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**, 114, pp.133-149, 2000.

Chung, S.S.; Poon, C.S. Evaluating waste management alternatives by the multiple criteria approach. Resources, **Conservation and Recycling**, 17, pp.189-210, 1996.

Clark, G.; Wright, J.R. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. **Operations Research**, 12, pp. 568-581, 1964.

Cordeau, J.F.; et al. A guide to vehicle routing heuristics. **Journal of the Operational Research Society**, 53, pp.512-522, 2002.

Cordeau, J.F.; Laporte, G. A tabu search heuristic for the site dependent vehicle routing problem with time windows. **Informatics**, 39, pp. 292-298, 2001.

Cordeau, J.F.; Gendreau, M.; Laporte, G. A tabu search heuristic for the periodic and multi-depot vehicle routing problems. **Networks**, 30, pp. 105-119, 1997.

Costa, A. C. F. **Os Caminhos dos Resíduos Sólidos Urbanos na Cidade de Porto Alegre/RS: Da Origem ao Destino Final**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1998.

Dantzig, G.; Ramser, J.H. The truck dispatching problem. **Management Science**, 6, pp. 80-91, 1959.

Date, C.J. **Introdução aos Sistemas de Banco de Dados**. Campus, 2000.

DMLU. **Departamento Municipal de Limpeza Urbana de Porto Alegre**. In: <http://www.portoalegre.rs.gov.br/dmlu/coletas.htm>. Acessado em 10/12/2003.

Davies, M.N. Back-office process management in the financial services – a simulation approach using a model generator. **Journal of the Operational Research Society**, 45, 12, pp.1363-1373, 1994.

Dix, A. **Human-Computer Interaction**. Prentice-Hall Europe. 1998

Dror, M.; Laporte, G.; Trudeau, P. Vehicle routing with split deliveries. **Discrete Applied Mathematics**, 50, pp. 239-254, 1994.

Eck, R.D. **Operations Research for Business**. Belmont, CA: Wadsworth Publishing Company, 1976.

Everett, J.W.; Shahi, S. Vehicle and labor requirements for yard waste collection. **Waste Management & Research**, 15, pp.627-640, 1997.

Farah, M.F.; Barboza, H.B (orgs.). **20 Experiências de Gestão Pública e Cidadania**. Editora FGV, 2001.

- Finlay, P. N. **Introducing decision support systems**. Oxford, UK Cambridge, Mass., NCC Blackwell; Blackwell Publishers, 1994.
- Fisher, M.; Jaikumar, R. A generalized assignment heuristic for vehicle routing. **Networks**, 11, pp. 109-124, 1981.
- Gendreau, M.; et al. A tabu search heuristic for the heterogeneous fleet vehicle routing problem. **Computational Operations Research**, 26, pp. 1153-1173, 1999.
- Gillet, B.; Miller, L.R. A heuristic algorithm for the vehicle dispatch problem. **Operations Research**, 22, pp.340-349, 1974.
- Gillett, B.; Johnson, J. Sweep Algorithm for the Multiple Depot Vehicle Dispatch Problem. Proceedings of **ORSA/TIMS Meeting**, San Juan, Puerto Rico, October 1974.
- Glover, F.; Klingman, D.; Phillips, N.V. **Network models in optimization and their applications in practice**. John Wiley & Sons, 1992.
- Glover, F. **Tabu search methods in artificial intelligence and operations research**. ORSA, Artificial Intelligence Newsletter, 1, 1987.
- Goldbarg, M.C.; Pacca Luna, H. **Otimização combinatória e programação linear**. Campus, 2000.
- Goldberg, D. E. **Genetic Algorithms - in Search, Optimization and Machine Learning**. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989.
- Heath, W. Waterfront capacity-planning simulations. In: Proceedings of the 1993 **Winter Simulation Conference**, Los Angeles-CA, 1993.
- Hiwatashi, E. **O Processo de Reciclagem dos Resíduos Sólidos Inorgânicos Domiciliares em Porto Alegre**. Dissertação (Mestrado em Administração) – Programa de Pós-Graduação em Administração, Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1999.
- Holland, J.H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems**. University of Michigan Press:Ann Arbor, MI, 1975.
- Huang, G.H.; Baetz, B.W.; Patry, G.G. Trash-Flow Allocation: Planning Under Uncertainty. **Interfaces**, Vol. 28, No. 6, pp. 36-55, Nov-Dec, 1998.
- Kelton, W. D., Sadowski, R. P., Sadowski, D. A. **Simulation with Arena**, McGraw-Hill, New York, 1998.
- Kirkpatrick, S.; Gellatt, C. Optimization by Simulated Annealing. **Science**, 220, pp.671-680, 1983.

- Korth, H.; Silberschatz, H.; Sudarshan, S. **Sistemas de Bancos de Dados**. Makron Books, 1999.
- Kulcar, T. Optimizing solid waste collection in Brussels. **European Journal of Operations Research**, 90, pp.71-77, 1996.
- Lajolo, R.D. **Cooperativa de catadores de materiais recicláveis: Guia para implantação**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas-Sebrae, 2003.
- Larson, R.C.; Odoni, A.R. **Urban Operations Research**. Massachusetts Institute of Technology, 1999. Disponível na Web em: http://web.mit.edu/urban_or_book/www/book/. Acessado em 16 de fevereiro de 2004.
- Law, A.M., Kelton, W.D. **Simulation Modeling & Analysis**. 2^a Ed., McGraw-Hill, 1991.
- Lin, S; Kernighan, W. An efficient heuristic for the traveling salesman problem. **Operations Research**, 21:298-516, 1973.
- Meadows, D.H. **The limits to growth**. Universe Books, New York, 1972.
- Mingozi, A.; Giorgi, S.; Baldacci, R. An exact method vehicle for the vehicle routing problem with backhauls. **Transportation Science**, 33, pp.315-329, 1999.
- Monteiro, J.H.P.; et al. **Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Administração Municipal, 2001.
- Netto, A. O Desperdício do Lixo. **Jornal Zero Hora**, 09 de setembro de 2001, Página 32.
- Newman, W.M.; Sproull, R.F. **Principles of Interactive Computer Graphics**. McGraw-Hill, 1979.
- O'Keefe, R. M., O. Balci, and E. P. Smith. Validating expert system performance. **IEEE Expert** 2(4):81-90, 1987.
- O'Leary, P.R; et al.. **Decision Maker's Guide to Solid Waste Management**.Vol. 2. Washington DC: U.S. Environmental Protection Agency, 1999.
- Osaka International House Foundation. **Informação para a sua vida em Osaka**. Disponível na Web em:<http://www.ih-osaka.or.jp/enjoy/po/disposal/01.html>. Acessado em 15 de outubro de 2003.
- Pedgen, C. D., Shanon, R. E., Sadowski, R. P. **Introduction to simulation using SIMAN**, McGraw-Hill, 2o. ed., 1995.
- Perrodin, Y.; et al. Waste ecocompatibility in storage and reuse scenarios: global methodology and detailed presentation of the impact study on the recipient environments. **Waste Management**, 22, pp. 215-228, 2002.

Pidd, M. Simulating automated food plants. **Journal of the Operational Research Society**, 38, 8, pp.683-692, 1987.

Pidd, M. **Modelagem Empresarial – Ferramentas para a Tomada de Decisão**. Porto Alegre: Artmed, 1998.

Prefeitura Municipal de São Paulo - Secretaria de Serviços e Obras. **Coleta Seletiva**. Disponível na Web em: http://portal.prefeitura.sp.gov.br/secretarias/servicoseobras/projetos/coleta_seletiva/0003.

Pressman, R.S. **Engenharia de Software**. 5ª ed, McGraw-Hill, 2002.

PROCEMPA – Companhia de Processamento de Dados de Porto Alegre. **Sistema de Georeferenciamento de Porto Alegre**. Disponível na Web em: <http://geo.procempa.com.br>. Acessado em 15 de junho de 2004.

Ravindran, A. et al. **Operations Research, Principles and Practice**, 2ª Ed. New York: John Wiley, 1987.

Renaud, J.; Boctor, F.F. A sweep-based algorithm for the fleet size and mix vehicle routing problem. **European Journal of Operational Research**, 140, pp. 618-628, 2002

Resol Engenharia – Resíduos Sólidos . **Trabalhos Técnicos**. In:http://www.resol.com.br/port/trabTec_port_1.asp. Acessado em 12 de fevereiro de 2004.

Salt, J. Tunnel Vision. **OR/MS Today**, 18, 1, pp. 42- 48, 1991.

Seoul Life. **Waste Management – Collection**. Disponível na Web em: <http://www.seoulife.com/useful/wast-manage.asp> . Acessado em 16 de setembro de 2003.

Simonetto, E.O.;Borenstein, D.;Dotto, B.R. SICOLSE – Um Sistema de Informação para à Gestão da Coleta Seletiva de Resíduos. **Anais do XXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. UFOP-ABEPRO, Ouro Preto-MG, Outubro, 2003.

Sprague, R.; Watson, H. **Sistemas de Apoio à Decisão: Colocando a Teoria em Prática**. Rio de Janeiro, Campus, 1991.

Tanskanen, J-H. Strategic planning of municipal solid waste management. **Resources, Conservation and Recycling**, 30, pp.111-133, 2000.

Trahand J.; Hoppen, N. Sistemas Especialistas e Apoio à Decisão em Administração. **Revista de Administração da Universidade de São Paulo**, v. 23 Abril-Junho 1988, pp 11-20.

Tung, D.V.; Pinnoi, A. Vehicle routing-scheduling for waste collection in Hanoi. **European Journal of Operational Research**, 125, pp.449-468, 2000.

Uris, A . **O Livro de Mesa do Executivo**. São Paulo, Pioneira, 1989.

Wagner, H. **Pesquisa Operacional**. 2^a Ed., São Paulo: Prentice-Hall do Brasil, 1986.

Weintraub, A.; Martell, D.; Gunn, E. Forest Management Challenges for Operational Researchers. **European Journal of Operations Research**, 1998.

Yourdon, E. **Análise Estruturada Moderna**. Campus, 1990.

Zadeh, L. A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. **Fuzzy Sets and Systems**, 1, 3-28, 1978.

Zutshi, A.; Sohal, A. Environmental management systems auditing: auditors' experiences in Auastralia. **International Journal Environment and Sustainable Development**, 1, No. 1, pp.73-87, 2002.

Anexos

Anexo A – Interface SCOLDSS

Neste anexo serão apresentados os diferentes tipos de interface gráfica da SCOLDSS. Para a definição da seqüência da ordem de apresentação será utilizada a ordem do diagrama de atividades apresentado na figura 5.17 no Capítulo 5 da tese.

A interface de inicialização do SCOLDSS apresenta dois itens de menu principal: *Coleta Seletiva* e *Ajuda* (Figura A.1). Ao ser selecionada a opção *Coleta Seletiva* é então aberto um novo submenu, no qual pode-se optar pelos seguintes comandos: *Administração*, *Planejamento*, *Consultas* e *Sair*.

Ao optar-se por *Administração* é então apresentada uma nova interface (Figura A.2) onde é possível aos usuários do sistema a inclusão, alteração e exclusão dos dados referentes à coleta seletiva de resíduos sólidos. Nestes dados incluem-se: locais de coleta, veículos, unidades de triagem, tipos de veículos, bem como as distâncias percorridas pelos veículos entre os diversos pontos (Figura A.3). A interface selecionada pela opção *Administração* é a mesma do SICOLSE - Sistema de Informação para a Gestão da Coleta Seletiva (Simonetto et al., 2003), porém no caso do SCOLDSS, utiliza-se somente o módulo de Cadastro do mesmo.



Figura A.1 – Interface inicial do SCOLDSS



Figura A.2 – Interface de Administração dos dados do SCOLDSS

Ao selecionar a opção *Cadastro* o submenu (Figura.) será apresentado:

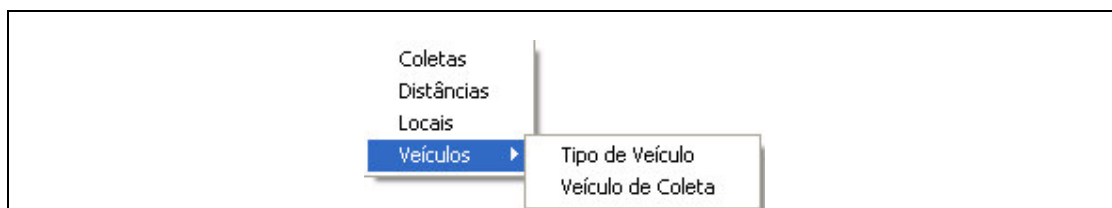


Figura A.3 – Interface para a seleção de cadastro a ser executado

Ao ser selecionada a opção *Coletas* a seguinte interface é apresentada ao usuário (Figura A.5), onde é possível efetuar o cadastro relativo ao local de coleta, quantidade estimada de resíduos coletada, a data da coleta e o veículo que realizou a mesma. Os botões utilizados na interface de cadastro de coleta diária (*Novo*, *Salvar*, *Alterar*, *Excluir* e *Sair*) são padrões em todas as outras interfaces de cadastro do SCOLDSS (Figura A.4).



Figura A.4– Interface relativa aos comandos dos formulários do SCOLDSS

Figura A.5 – Interface de cadastro relativo às coletas diárias

Para o cadastro de locais (unidade de triagem ou local de coleta) foi desenvolvida a interface apresentada na figura A.6. Onde são cadastrados os seguintes dados: Tipo de local (depósito ou coleta), código identificador do local, nome do local, dia (s) da semana em que é realizada a coleta no local, a capacidade máxima de armazenamento ou geração de resíduos do mesmo e as coordenadas às quais representam os locais no mapa da cidade para a qual está sendo planejada a coleta. A interface pode ser visualizada na figura A.6 .

Figura A.6 – Interface relativa ao cadastro de locais de coleta e unidades de triagem

Para o cadastro de dados relativos às distâncias percorridas pelos veículos de coleta, entre a coleta propriamente dita e o deslocamento entre os pontos é utilizada a interface apresentada na figura A.7. Nesta interface, o usuário preenche os dados relativos aos locais, seja de coleta ou unidade de triagem e, à distância percorrida pelo veículo que efetua o serviço.

Figura A.7 – Interface para cadastro das distâncias entre os locais de coleta e/ou triagem

Para o cadastro dos veículos utilizados na coleta seletiva foi desenvolvida uma interface onde são informados: o código identificador do veículo, a placa do veículo de coleta, o custo por quilômetro percorrido pelo veículo e o tipo do veículo, conforme sua capacidade de carga. A interface é apresentada a seguir na figura A.8 .

Figura A.8– Interface utilizada para o cadastro dos veículos utilizados na coleta seletiva

No sistema de coleta seletiva de resíduos sólidos, os veículos poderão ser de diferentes tipos, ou seja, poderão ter capacidades de carga heterogêneas. Para tal foi desenvolvido um cadastro (Figura A.9) onde é possível ao usuário do *SCOLDSS* informar os diferentes tipos de veículos que compõem a frota de coleta.



Figura A.9 – Interface de cadastro dos diferentes tipos de veículos de coleta

Na opção *Planejamento* do menu principal do *SCOLDSS* é selecionada a interface para o apoio à decisão da coleta e distribuição dos resíduos sólidos oriundos da coleta seletiva. Nesta etapa dá-se o diálogo do decisor (usuário) com o sistema com o propósito de obter possibilidades (alternativas) para seu curso de ação no processo decisório em questão. A interface é apresentada na figura A.10.

Basicamente, a interação dá-se da seguinte forma:

1. O usuário seleciona as unidades de triagem que estão ativas (em funcionamento), ou seja, que estão aptas a receber matéria-prima pós-consumo (Figura A.11);
2. Após, o usuário seleciona o mês e o dia da semana para o qual será planejada conforme as figuras A.12 e A.13.
3. Posteriormente, executa-se a simulação da capacidade de processamento de resíduos sólidos nas unidades de triagem que estão em atividade, com um clique no botão *Simular Capacidade*, conforme apresentado na figura A.14.

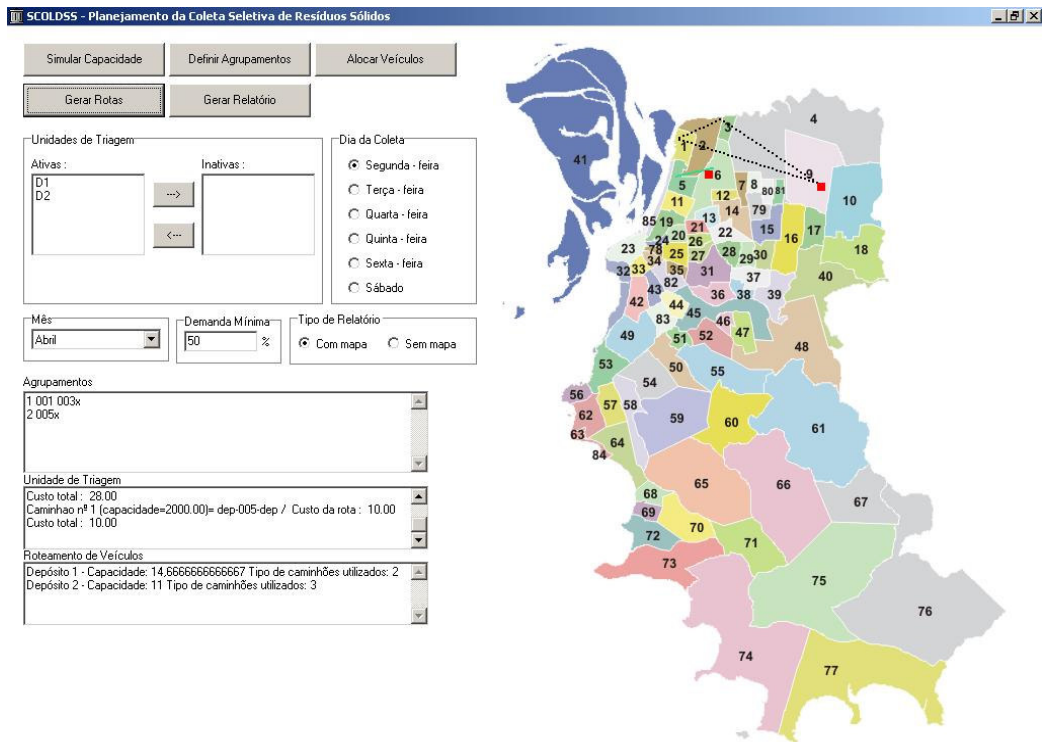


Figura A.10 – Interface para apoio ao processo decisório da coleta/distribuição dos resíduos sólidos

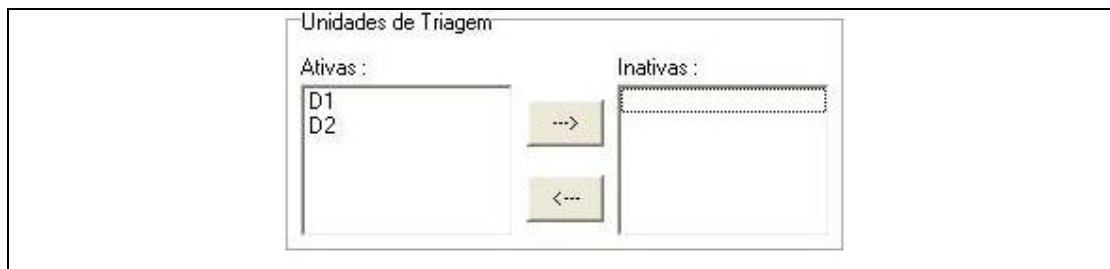


Figura A.11 – Interface para seleção das unidades de triagem ativas



Figura A.12– Interface para a seleção do mês para planejamento

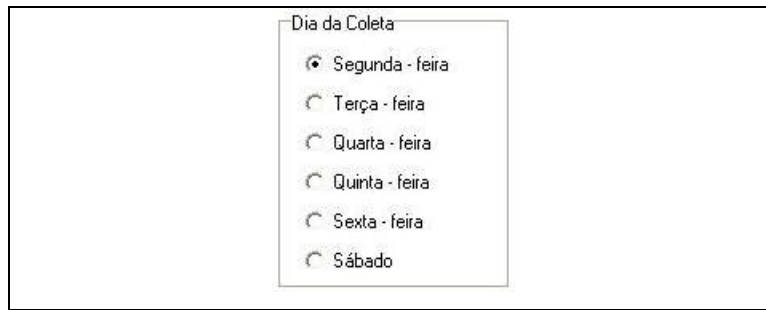


Figura A.13 - Interface para a seleção do dia para planejamento



Figura A.14 – Botão para iniciar a simulação

4. Enquanto o simulador *Arena* está em fase de inicialização é apresentada a seguinte mensagem ao usuário. (Figura A.15)



Figura A.15 – Mensagem para inicialização do *Arena*

5. Enquanto a simulação é executada a interface (ver figura A.16) estará disponível ao usuário. Porém, ao ser concluída esta etapa, mais dois botões estarão disponíveis ao usuário (ver figura A.17)
6. Na seqüência o usuário deve definir o percentual mínimo de chegada de resíduos nas unidades ativas através da interface apresentada na figura A.18.
7. Ao definir o percentual de demanda mínima para as unidades de triagem, o usuário deverá selecionar o botão *Definir Agrupamentos*, o qual disponibilizará o resultado do seu processamento na interface apresentada na figura A.19.

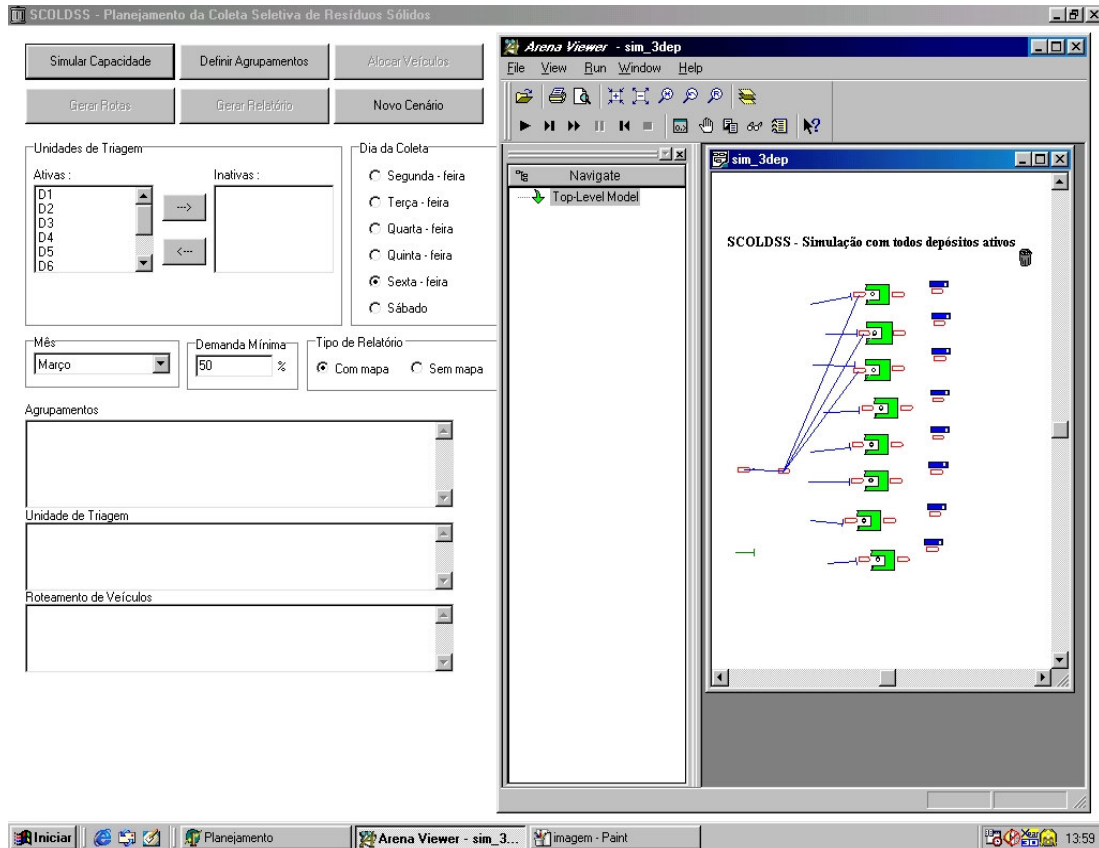


Figura A.16 – Interface do SCOLDSS durante a execução do Arena

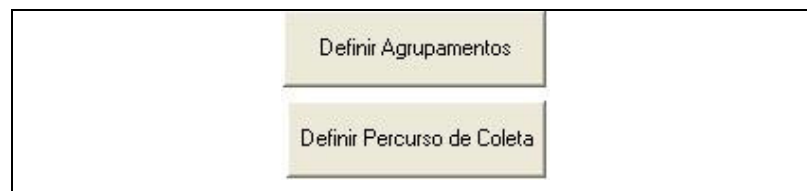


Figura A.17 – Botões do SCOLDSS



Figura A.18– Interface para definição do percentual mínimo de demanda



Figura A.19- Interface para apresentação dos resultados do algoritmo de agrupamento

8. Após o agrupamento dos pontos de coleta às unidades de triagem é executado o procedimento de alocação de veículos a estas. Para efetuarmos a alocação deve-se clicar no botão *Alocar Veículos*, conforme apresentado na figura A.20 .



Figura A.20 – Botão para a alocação de veículos

9. Após definir os agrupamentos (Ponto de coleta / Unidade de Triagem) e alocação de veículos para a coleta seletiva, é executada a definição dos percursos a serem percorridos pelos veículos de coleta. Para tanto, o usuário deverá clicar no botão *Definir Percurso de Coleta*, depois de executada a heurística de roteamento (*sweep*) é apresentada, inicialmente, ao usuário a interface de resultado (Figura A.21).

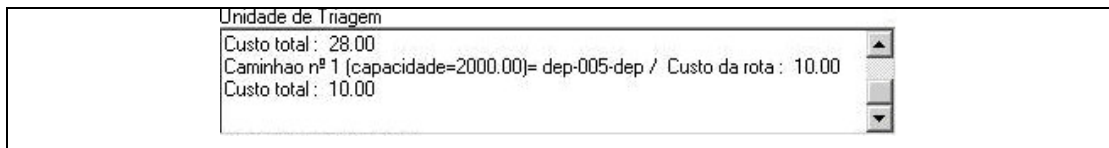


Figura A.21- Interface para apresentação do roteamento dos veículos

O usuário após definir o percurso da coleta, poderá optar em gerar ou não o relatório contendo os resultados gerados pelo *SCOLDSS*. No caso, este relatório poderá ser simplesmente textual ou, em uma forma gráfica com mapa ilustrativo dos locais a serem percorridos pelos veículos de coleta. A opção de relatório é selecionada na interface e, pode ser visualizada na figura A.22. Os relatórios por sua vez são apresentados nas figuras A.23 e A.24.

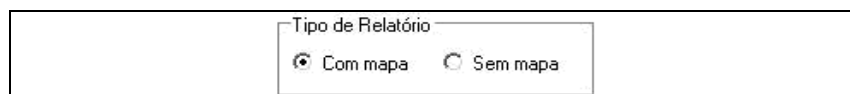


Figura A.22- Interface para seleção do tipo de relatório

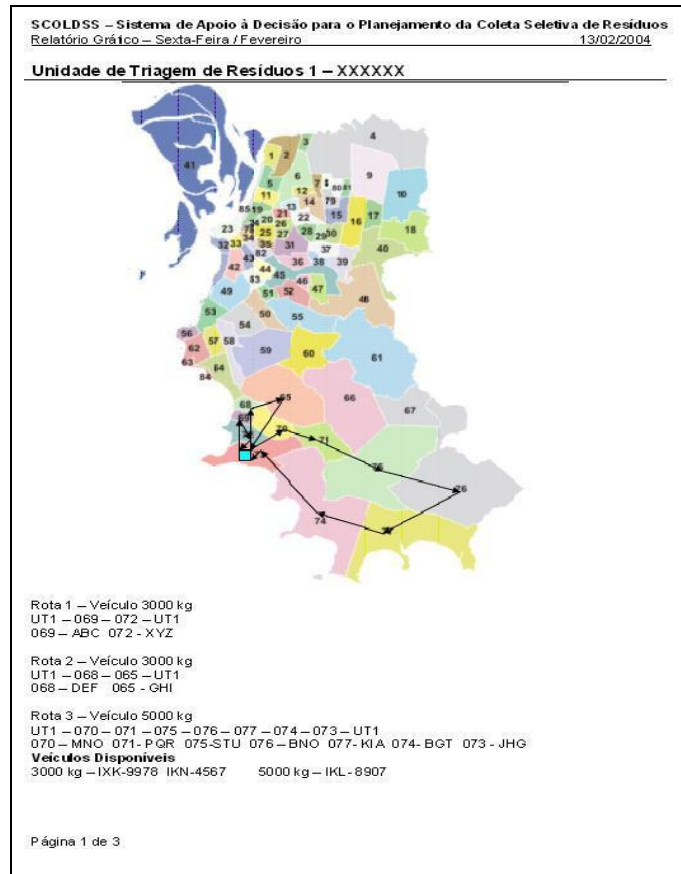


Figura A.23- Modelo de relatório gerado pelo SCOLDSS

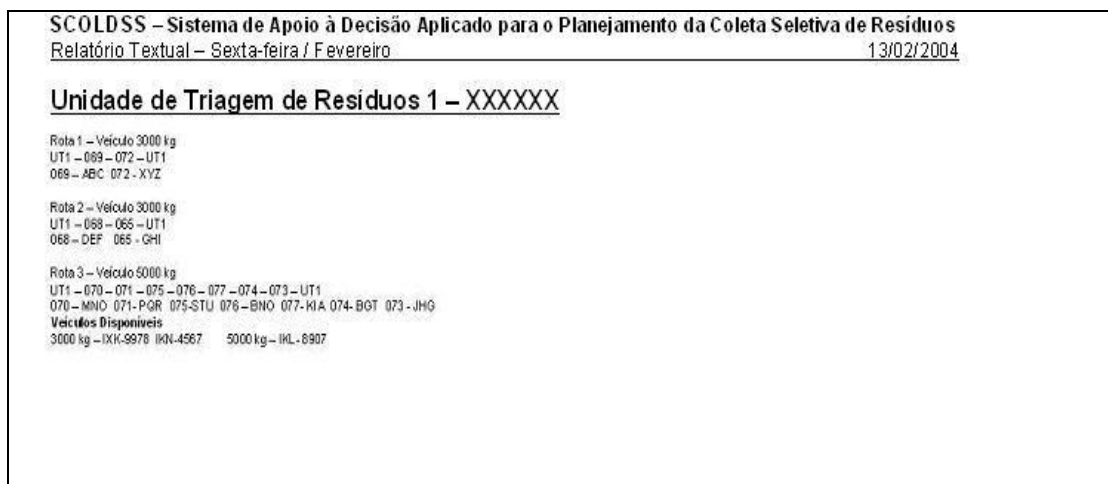


Figura A.24- Modelo de relatório gerado pelo SCOLDSS

Anexo B – Instrumento de Validação de Face do *SCOLDSS*

No. _____

Instrumento para a Validação do *SCOLDSS*

Prezado Sr.,
 Como parte de uma pesquisa acadêmica do curso de Pós-graduação em Administração da UFRGS, pretendemos avaliar o *SCOLDSS* - SISTEMA DE APOIO À DECISÃO APLICADO AO PLANEJAMENTO OPERACIONAL DA COLETA SELETIVA DE RESÍDUOS SÓLIDOS. Para tanto, solicitamos sua colaboração. Desde já agradecemos sua contribuição.

As questões do **número 1** ao **número 6** devem ser respondidas somente **assinlando** a alternativa selecionada.

1. As telas do sistema são de fácil entendimento?
 Sim Em parte Não
2. As mensagens exibidas pelo sistema são explicativas?
 Sim Em parte Não
3. Os botões de navegação são de fácil entendimento?
 Sim Em parte Não
4. Os relatórios e resultados gerados pelo sistema são de fácil entendimento?
 Sim Em parte Não
5. O mapa situado ao lado esquerdo da tela auxilia na visualização dos resultados?
 Sim Em parte Não
6. Em caso de futura utilização você necessitaria de um treinamento maior do que o executado antes da validação?
 Sim Em parte Não

As questões de **número 7** e **número 8** são **dissertativas**, porém são de **preenchimento facultativo**.

7. Você gostaria de efetuar algum tipo de comentário a respeito do *SCOLDSS*? _____

8. Cite alguns pontos críticos, os quais você julga que devam ser melhorados no *SCOLDSS*

