

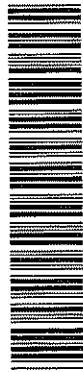
70170195

**O ROTEAMENTO DE VEÍCULOS:**  
***Uma avaliação sobre sua introdução na coleta***  
***de resíduos sólidos urbanos***



PATRICIA SALTORATO

DEDALUS - Acervo - EESC



31100017054

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Produção.

ORIENTADOR: João Vítor Moccellin

São Carlos - SP  
1998

|        |           |
|--------|-----------|
| Class. | TESE/EESC |
| Curr.  | 5057      |
| Tomo   | T0180/98  |

31100017054

st 0980481

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP

S179r

Saltorato, Patricia

O roteamento de veículos : uma avaliação sobre sua introdução na coleta de resíduos sólidos urbanos / Patricia Saltorato. -- São Carlos, 1998.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1998.

Área: Engenharia de Produção.

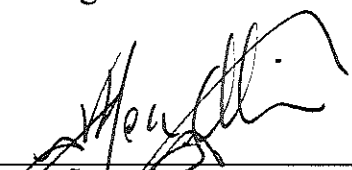
Orientador: Prof. Dr. João Vítor Moccellin.

1. Problemas de roteamento de veículos.
2. Roteamento de veículos por microcomputador.
3. Coleta de resíduos sólidos. I. Título.

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidata: Engenheira **PATRICIA SALTORATO**

Dissertação defendida e aprovada em 17-04-1998  
pela Comissão Julgadora:



---

Prof. Titular **JOÃO VITOR MOCCELLIN (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



---

Prof. Associado **RENATO VAIRO BELHOT**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



---

Prof. Doutor **EDSON MARTINS DE AGUIAR**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



---

Prof. Titular **JOÃO VITOR MOCCELLIN**  
Coordenador da Área de Engenharia de Produção



---

**JOSÉ CARLOS A. CÍNTRA**  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC



*"Mudança é o processo  
através do qual o futuro  
invade nossas vidas"*

*" Que os ganhos  
econômicos com  
tecnologia nunca tragam  
perdas sociais como o  
desemprego"*

## AGRADECIMENTOS

- Ao Professor João Vítor Moccellin, pela compreensão e orientação no desenvolvimento deste trabalho;
- Aos funcionários da empresa Vega Engenharia Ambiental;
- Ao Serviço de Biblioteca da EESC-USP, especialmente à Heleninha, pela ajuda na obtenção dos documentos;
- À Universidade de São Paulo, pela oportunidade de participar do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção;
- À CAPES, pelo apoio financeiro.
- À minha família, pela confiança e incentivo;
- A todos os amigos que direta ou indiretamente participaram da realização deste;
- À Silvana por suas idéias, sua amizade e sua luz;
- Aos amigos Hiro e Vítor, pelas valiosas lições ao longo deste;
- Ao Cleyton, pela companhia e os momentos de alegria.

# SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| LISTA DE FIGURAS.....  | i         |
| LISTA DE TABELAS.....  | ii        |
| LISTA DE SÍMBOLOS.....   | iii       |
| RESUMO.....  | iv        |
| ABSTRACT.....  | v         |
| <b>1. INTRODUÇÃO.....</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1 Pesquisa Operacional no mundo real.....                      | 1         |
| 1.1.1 A transferência de tecnologia de Pesquisa Operacional..... | 2         |
| 1.1.2 Ética no modelamento.....                                  | 4         |
| 1.1.3 As causas das falhas em P.O.....                           | 5         |
| 1.1.4 A utilização de modelos.....                               | 7         |
| 1.2 Logística.....   | 9         |
| 1.2.1 Contextualização.....                                      | 10        |
| 1.2.2 Otimização de redes.....                                   | 13        |
| 1.3 Objetivo do trabalho.....                                    | 16        |
| <b>2. INTRODUÇÃO À TEORIA DOS GRAFOS.....</b>                    | <b>17</b> |
| 2.1 O conjunto de arcos num grafo.....                           | 17        |
| 2.1.1 Casamentos em grafos.....                                  | 18        |
| 2.1.2 Fluxos em redes.....                                       | 19        |
| 2.2 O conjunto de nós num grafo.....                             | 21        |
| 2.2.1 Caminhos mínimos.....                                      | 21        |
| 2.3 Propriedades dos grafos.....                                 | 22        |
| 2.3.1 Mínima árvore gerada.....                                  | 23        |
| 2.3.2 Rotas em grafos.....                                       | 24        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>3. PROBLEMAS DE ROTEAMENTO E AS ESTRATÉGIAS DE SOLUÇÃO.....</b>                                 | <b>28</b> |
| 3.1 Descrição dos problemas de roteamento de veículos.....   | 29        |
| 3.1.1 Critérios básicos para descrição dos problemas.....  | 30        |
| 3.1.2 Algoritmos e sua complexidade computacional.....   | 33        |
| 3.2 Problemas de roteamento de veículos.....   | 35        |
| 3.2.1 Problema do carteiro chinês.....   | 37        |
| 3.2.2 Problema do caixeiro viajante.....   | 39        |
| 3.2.3 Problema de roteamento de nós com um depósito e vários veículos.....                         | 40        |
| 3.2.5 Problema de roteamento de nós com vários depósitos e vários veículos.....                    | 41        |
| 3.2.6 Problema de roteamento de arcos com restrição de capacidade.....                             | 42        |
| 3.2.7 Problema de roteamento de nós com demanda estocástica com um depósito e vários veículos..... | 43        |
| 3.2.8 Problema do carteiro rural.....  | 44        |
| 3.2.9 Problema do carteiro no vento.....   | 44        |
| 3.3 Estratégias de solução.....  | 45        |
| 3.3.1 Dividir-rotear.....  | 45        |
| 3.3.2 Rotear-dividir.....  | 46        |
| 3.3.3 Ganhos.....  | 47        |
| 3.3.4 Inserção.....  | 47        |
| 3.3.5 Melhorias.....   | 48        |
| 3.3.6 Programação matemática.....  | 50        |
| 3.3.7 Otimização interativa.....   | 50        |
| 3.3.8 Técnicas exatas.....   | 51        |
| 3.3.9 Algoritmos de duas fases.....  | 51        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>4. SISTEMAS PARA O ROTEAMENTO DE VEÍCULOS.....</b>   | <b>53</b>  |
| 4.1 Pacotes comerciais para roteamento de veículos.....   | 53         |
| 4.2 Sistemas customizados para roteamento de veículos.....  | 64         |
| 4.2.1 Inteligência Artificial para o roteamento de veículos.....  | 66         |
| 4.2.2 Programação Algorítmica no roteamento de veículos.....  | 68         |
| 4.3 Sistemas de Informação Geográfica.....  | 69         |
| <b>5. PROPOSTAS PARA O ROTEAMENTO DE VEÍCULOS NA COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM SÃO CARLOS – SP.....</b> | <b>73</b>  |
| 5.1 Aspectos gerais da coleta em São Carlos - SP.....   | 73         |
| 5.1.1 Histórico.....  | 74         |
| 5.1.2 Topologia da rede.....  | 75         |
| 5.1.3 O processo da atividade.....  | 77         |
| 5.1.4 Características dos veículos.....   | 78         |
| 5.2 Análise da coleta de resíduos sólidos.....  | 80         |
| 5.3 Propostas para o roteamento de veículos na coleta de resíduos sólidos.....                          | 85         |
| <b>6. CONCLUSÃO.....</b>  | <b>96</b>  |
| 6.1 A prática de P.O pelos países em desenvolvimento.....   | 96         |
| 6.2 A transferência de tecnologia.....  | 97         |
| 6.3 O uso de computadores nas atividades logísticas.....  | 99         |
| 6.4 Sobre o diagnóstico para a geração de rotas.....  | 100        |
| 6.5 Sobre as diretrizes futuras.....  | 103        |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>  | <b>105</b> |



## LISTA DE FIGURAS

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Figura 2.1- Um grafo não-direcionado <math>G</math>.....</i>                      | <i>27</i> |
| <i>Figura 2.2 - Um grafo direcionado <math>G</math>.....</i>                         | <i>27</i> |
| <i>Figura 3.1- Representação das sete pontes em Königsberg.....</i>                  | <i>37</i> |
| <i>Figura 3.2 - Problema do Carteiro Chinês.....</i>                                 | <i>38</i> |
| <i>Figura 3.3<sup>a</sup> - Problema do Caixeiro Viajante simétrico.....</i>         | <i>39</i> |
| <i>Figura 3.3b - Problema do Caixeiro Viajante assímétrico.....</i>                  | <i>39</i> |
| <i>Figura 3.4 - Problema clássico de roteamento de veículos.....</i>                 | <i>40</i> |
| <i>Figura 3.5- Problema de roteamento com vários depósitos.....</i>                  | <i>41</i> |
| <i>Figura 3.6 - Problema de roteamento de arcos com restrição de capacidade.....</i> | <i>42</i> |

## LISTA DE TABELAS

*Tabela 4.1- Os principais pacotes comerciais de roteamento.....66*

*Tabela 4.2- Principais pacotes de roteamento utilizados no Brasil.....67*

## LISTA DE SÍMBOLOS

$G$  - Grafo ou rede

$N$  - conjunto de nós de uma rede ou grafo

$A$  - conjunto de arcos de uma rede ou grafo

$(i,j)$  - arco direcionado do nó  $i$  ao  $j$

$(j,i)$  - arco direcionado do nó  $j$  ao  $i$

$S$  - caminho num grafo orientado

$G'$  - subgrafo de  $G$

$N'$  - subconjunto de  $N$

$A'$  - subconjunto de  $A$

$(t-1)$  - número de arcos de uma rede conexa

$t$  - número de nós de uma árvore conexa

$l(i,j)$  - comprimento de um arco

$L \sum_{i,j} \in S l(i,j)$  - comprimento de um caminho

$d(i, j)$  - distância entre os nós  $i$  e  $j$

$d(x,y)$  - menor distância entre  $x$  e  $y$ , pontos de  $G$

$CPMC$  - Casamento perfeito de mínimo custo

$M$  - Casamento perfeito de mínimo custo

$M^*$  - conjunto de todos os casamentos perfeitos de  $G$

$M'$  - todos os casamentos  $\in M^*$

$C = [c(i,j)]$  - matriz de custo para ir de  $i$  a  $j$ .

$q(i,j)$  - capacidade do arco  $(i,j)$

$s$  - nó origem  $\in N$

$t$  - nó destino  $\in N$

$x(i,j)$  - fluxo máximo de  $s$  para  $t$

$n(i,j)$  - número de vezes que um arco  $(i,j)$  é atravessado

$G = (S, T, A)$  - Grafo bipartido

## RESUMO

SALTORATO, Patrícia. O roteamento de veículos: Uma avaliação sobre sua introdução na coleta de resíduos sólidos urbanos. São Carlos, 1998. 111p.

Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos , Universidade de São Paulo.

Nas últimas duas décadas enormes avanços foram alcançados na área de roteamento de veículos. Uma das características mais intrigantes dos problemas de roteamento é que suas numerosas variações se estendem além das especulações matemáticas incorporando uma série de restrições da vida real em aplicações práticas para a indústria. Embora difíceis de resolver de maneira ótima, os problemas de roteamento de veículos se apresentam bem estruturados para serem abordados através da Pesquisa Operacional através do tratamento heurístico dado a eles. Dentro deste contexto este trabalho apresenta-se como uma síntese da evolução do desenvolvimento das técnicas para solução dos problemas de roteamento de veículos analisando sua adoção na coleta de resíduos sólidos urbanos em São Carlos - SP.

**Palavras-chave:** Problemas de roteamento de veículos, roteamento de veículos por microcomputador, coleta de resíduos sólidos.

## ABSTRACT

SALTORATO, Patrícia. The vehicle routing problem: An evaluation about its introduction in the urban solid waste collection . São Carlos, 1998. 111p.

Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos , Universidade de São Paulo.

In the last two decades enormous advances in the field of vehicle routing have been achieved. One of the most fascinating features in the vehicle routing problems are the untold variations they can take beyond the mathematical assumptions thus incorporating a great deal of real-life constraints that appear in industrial applications. Although hard to solve, the vehicle routing problems present themselves well-structured to the Operational Research approach using heuristics treatment. In this context, this work presents a synthesis of the evolution of the development of technics to solve the vehicle routing problems and, analysing its adoption in the urban solid waste collection in the city of São Carlos-SP.

**Key-words:** Vehicle routing Problems, microcomputer based vehicle routing, solid waste collection.

# 1. INTRODUÇÃO

Pesquisa Operacional é a ciência responsável pelo estudo do modo como se gerenciam os negócios e serviços, da indústria e do governo. Tão importante quanto, é a sua filosofia de modelos que mudou o processo pelo qual se definem e analisam as tomadas de decisão.

O início das pesquisas em Pesquisa Operacional coincide com dois eventos distintos mas sinérgicos; o desenvolvimento matemático e computacional das décadas de 50 / 60 e a II Guerra Mundial, na qual, a P.O. sempre ocupou lugar relevante, uma vez que os pontos avançados de defesa e ataque precisam estar adequadamente abastecidos de munição e provisões, sem os quais dificilmente uma batalha é ganha. Durante este período, uma fração do mundo ocidental se privilegiou do dinheiro e do *insight* de seus governos e companhias privadas que financiaram projetos para que fosse desenvolvida e praticada esta 'nova ciência de eficácia e eficiência'.

Os avanços e as aplicações de P.O. verificados nestes países nas duas décadas seguintes à guerra foram monumentais, criando-se assim uma nova disciplina na maioria das universidades.

## ***1.1 Pesquisa Operacional no mundo real***

Segundo GASS (1991a), a teoria da Pesquisa Operacional, apesar de estabelecida, se encontra em constante avanço; suas técnicas foram codificadas, são acessíveis e suas aplicações, seu sangue para sobreviver, continuam aumentando, pois, uma vasta classe de problemas operacionais, desta disciplina, com todos os propósitos, tem sido resolvida por profissionais da área utilizando seus procedimentos.

O entusiasmo do autor justifica-se, uma vez que refere-se às experiências conduzidas em países do Primeiro Mundo. São experiências com aplicações conduzidas por companhias, governos e outras entidades; publicadas nos muitos periódicos especializados derivados de lá. Tal comportamento, porém, não se verifica em países como o Brasil. Como os países subdesenvolvidos podem alcançar este nível de sucesso é a pergunta mais importante a fazer e a tentar responder.

### **1.1.1 A transferência da tecnologia de Pesquisa Operacional**

Nos anos 50, muitas técnicas matemáticas baseadas na Pesquisa Operacional se cristalizaram. Durante a década de 60 estas técnicas foram disseminadas pelo mundo inteiro apoiadas pela disponibilidade crescente dos computadores. Nessa época, os praticantes desta nova ciência se entusiasmaram com algum sucesso, principalmente com a programação linear, mesmo havendo muitas falhas. Nos anos 70, as técnicas da Pesquisa Operacional ameaçavam se tornar a própria Pesquisa Operacional, o que frustrou os pesquisadores que insistiam que a P.O. deveria ser orientada ao problema e não às técnicas. Já na década de 80 assimilada a frustração dos pesquisadores e com o aumento cada vez maior da utilização da P.O., recursos do Banco Mundial e outras organizações estavam disponíveis para que pesquisadores dos países desenvolvidos se empenhassem em projetos que visavam transferir seus resultados bem sucedidos e modelos de planejamento para países em desenvolvimento especialmente para a África e América do Sul. Houve até alguma atividade, porém escassa. Hoje, a situação mudou e tal assistência é procurada principalmente por países do Leste Europeu.

A maior dificuldade para os países em desenvolvimento não está em aprender as técnicas, e sim em empreender a prática desta ciência. Porque é tão difícil aplicar a Pesquisa Operacional à realidade de cada país? Certamente, a P.O. praticada nos Estados Unidos não será a mesma se aplicada em outros países. A Pesquisa Operacional difere das outras

ciências como a física, química ou matemática, no sentido da sua universalidade porque envolve não só a ciência, mas também estruturas culturais, éticas, comportamentais e burocráticas que influenciam profundamente a tomada de decisões, às vezes até inviabilizando seu uso.

Os pesquisadores dos países em desenvolvimento têm uma tarefa difícil, uma vez que, seus gerentes querem resultados a curtíssimo prazo e retornos iguais àqueles alcançados pelos países desenvolvidos, esquecendo que estes retornos levaram cerca de 40 anos para ocorrer mesmo lá. Com tal expectativa impossível de suprir, as aplicações da P.O. em países como o Brasil se tornam escassas e inviáveis, tanto no setor público como no setor privado.

GASS (1991a) faz as seguintes sugestões para aumentar as chances de sucesso da transferência de tecnologia:

1. o melhor jeito de se acompanhar a transferência de tecnologia é ter tal trabalho realizado pela equipe dos países subdesenvolvido supervisionado por consultores dos países desenvolvidos;
2. o estilo da organização e do gerenciamento do cliente, isto é, seu processo de tomada de decisão, e sua natureza diferenciada devem ser considerados pelo consultor quando no desenvolvimento de modelos;
3. um completo domínio da língua do outro é um pré-requisito, para ser evitado qualquer engano ou mal-entendido;
4. a documentação exigida deve ser providenciada e estar disponível aos 'clientes subdesenvolvidos'.

Já BORNSTEIN & ROSENHEAD (1990) argumentam que os consultores estrangeiros personificam a dependência do Terceiro Mundo e que muitos deles vêm atrás de prestígio e promoção pessoal. Sendo sua presença amplamente adotada na prática de P.O. no Terceiro Mundo devido ao prestígio de suas instituições acadêmicas.



### 1.1.2 Ética na modelagem

Em geral, a preocupação com a modelagem das atividades em P.O. atinge todos os níveis de tomada de decisão nos governos, na indústria e nos negócios nos planejamentos a longo prazo. Os problemas nesta área são caracterizados por não possuírem uma resposta correta. A aceitação dos resultados da política de modelagem está na habilidade do modelador em estabelecer uma base de dados que convença os usuários que o modelo realmente reproduz a realidade, isto é, possui validade, algo complexo de obter.

Quando, um analista faz um modelagem deve assegurar que este seja totalmente imparcial, isto é, sem conter a opinião ou preferência do primeiro. É por isso que a metodologia científica possui filtros que a protegem de estar impregnada de tais inclinações. Muitas vezes, porém, os modelos são complexos demais e nenhuma das partes envolvidas pode atestar o corretismo ou objetividade dos resultados.

GASS (1991a) formulou um código de ética preocupado com os seguintes aspectos:

1. As metas e valores do cliente não devem contradizer os valores básicos da democracia e dos direitos humanos.
2. Não deve haver contradições entre os valores do analista e do cliente.
3. Quando da apresentação de alternativas viáveis o analista não deve esconder uma destas por contradizer seus valores pessoais ou preferências.
4. O analista deve fazer um delineamento cuidadoso dos dados e nunca apresentar dados tendenciosos.
5. Um estudo não deve ser conduzido para somente confirmar a conclusão do cliente já alcançada por outros meios.
6. O analista não deve trabalhar para um cliente que não facilite o acesso aos dados.

7. O analista deve evitar conflitos de interesse, incluindo se envolver em tomadas de decisão onde ele tenha interesses pessoais ou particulares.
8. O analista deve evitar que seu trabalho seja mal interpretado ou usado para outros fins diferentes daqueles para o qual foi desenvolvido.
9. O analista deve fazer todo o possível para assegurar que seus modelos sejam usados de uma forma clara e objetiva. E quando o modelo for usado para amparar suas posições, o profissional de P.O. deve deixá-lo bem explícito.

A preocupação com a ética vem do fato que os modelos de P.O. praticamente têm vida própria e podem ser usados para fins que não os seus. Modelos usados em diferentes organizações para desenvolver conclusões a favor de objetivos específicos põem em dúvida a eficácia da metodologia, a objetividade e a seriedade deste campo científico.

### **1.1.3 As causas das falhas em P.O.**

Nos anos 50 estabeleceram-se muitas técnicas matemáticas baseadas em P.O.. No começo da década de 60, os pesquisadores da P.O. nos Estados Unidos já achavam que podiam resolver problemas sociais, como saúde, educação, segurança, meio-ambiente, justiça, transporte e planejamento urbano, aplicando conjuntamente os procedimentos da P.O. e de Engenharia; apesar de algum sucesso, a maioria dos projetos falhou.

O estudo apresentado por GASS (1991b), conduzido sobre gerenciamento com 57 modelos baseados em computador, tentou determinar as razões de falhas na modelagem e descobrir meios para melhorá-los. Os problemas encontrados se agruparam em três grandes classes. Aqueles atribuídos ao *planejamento gerencial inadequado*, os atribuídos a *equipe de gerenciamento inadequado* e os atribuídos à *coordenação gerencial inadequada*. Os problemas assinalados são questões gerais que os profissionais de P.O. devem reconhecer como prioridades ao se realizar um modelo que leva em consideração as intrusões do mundo real.

Os itens abaixo revelam porque os projetos em modelagem falham. São itens que envolvem desde a aplicação incorreta da metodologia pelo analista até situações que envolvem aspectos do relacionamento entre usuário e analista. Entre parênteses, estão assinaladas com siglas o porquê de tal item estar na lista; (P.O.) indica que a falha pode ser atribuída ao processo de P.O., que inclui desde o problema da falta de fundos para pesquisas, de recursos e documentação até o mal emprego da técnica; (REAL) indica que o problema foi causado por uma intrusão do mundo real ou elemento humano e (P.O. / REAL) que indica que ambos foram responsáveis pela falha encontrada.

**a) Problemas atribuídos ao planejamento gerencial inadequado:**

- . o gerenciamento não definiu claramente o problema a ser modelado, portanto o analista teve que supor o que modelar (P.O.);
- . o analista não obteve os dados suficientes para o modelo funcionar (P.O.);
- . o gerenciamento destinou fundos e recursos escassos para completar o modelo (REAL, P.O.);
- . o gerenciamento não fez previsões para atualizar o modelo para usos futuros até que o modelo tornou-se obsoleto (REAL, P.O.)
- . o gerenciamento não fez previsões para a avaliação do modelo (P.O.);
- . o gerenciamento não esclareceu a documentação necessária para o modelo e como resultado, somente o analista entendia como este funcionava e as relações mantidas pelas variáveis incorporadas a ele. (P.O.)

**b) Problemas atribuídos a equipe de gerenciamento inadequada:**

- . o gerenciamento não participou ativamente no planejamento do modelo, portanto o modelo não refletia suas necessidades. (REAL, P.O.)

- . o gerenciamento não conhecia as técnicas de modelagem em computador e suas aplicações, conseqüentemente, eles não podiam usar as informações obtidas a partir dos modelos. (REAL, P.O.)

**c) Problemas atribuídos à má coordenação gerencial:**

- . o gerenciamento não monitorou o desenvolvimento do modelo continuamente, permitindo que alguns esforços continuassem quando deveriam ter terminado. (REAL, P.O.);
- . o gerenciamento não coordenou o desenvolvimento de esforços com o analista e como resultado, o modelo foi desenvolvido sem uma garantia razoável de que este alcançaria seus objetivos. (P.O.).

Como bem afirmou SAMUELSON (1991), a incorporação do elemento homem dificulta a análise de qualquer sistema e a função da P.O. é analisar os sistemas homem / máquina em todas suas complexidades. Por isso a área de atuação da P.O. é bastante ampla e, portanto sujeita a inúmeras falhas.

#### 1.1.4 A utilização de modelos

A avaliação entre alternativas de modelos para se empregar num programa é sempre um processo altamente subjetivo, porém LARSON & ODONI (1981) enfocam os fatores gerais que influenciam as chances de sucesso na implementação de um estudo baseado em modelos:

- a) A obtenção de dados;** é um dos mais importantes atributos relativos aos modelos. A sua aquisição incorreta é o fator que mais frequentemente leva a falhas de implementação.
- b) A documentação;** é outro fator decisivo para os modelos de P.O.. Os autores especificam o que eles acreditam ser uma documentação razoável para a transferência de um modelo:
- . *Resumo executivo;* contendo uma introdução não-técnica ao modelo, informação para auxiliar o gerente na decisão de usar ou

não o modelo e os detalhes sobre como o programa de computador pode ser obtido.

. *Descrição técnica*; para que o analista entenda a base teórica do modelo.

. *Manual do usuário*; descrevendo passo a passo, como o modelo pode ser operado e instalado num sistema computacional.

. *Manual do programador*; escrito para o pessoal do processamento de dados que contenha informação suficiente para permitir a instalação e modificação do modelo e a construção da base de dados necessária.

**c) A adaptabilidade**; repousa na flexibilidade do modelo. Nenhum modelo deve ser rígido ao ponto de pequenas mudanças tornarem-no obsoleto. O profissional responsável pela construção do modelo deve incorporar flexibilidade suficiente ao seu *design* para permitir mudanças razoáveis na operação de suas regras de modo a não violar as restrições de custo do desenvolvimento e implementação do modelo.

**d) As alternativas operacionais**; sendo uma ferramenta para a tomada de decisões, é de se supor que o modelo explore as conseqüências das alternativas operacionais. Sua base de dados e variáveis de decisão devem ser passíveis de alteração; suas saídas, fáceis de entendimento e sua exploração sistemática do espaço de decisão deve ser simples.

**e) As medidas de desempenho**; ou as 'saídas do modelo' devem ser de fácil compreensão para quem toma as decisões e para o usuário. Estas devem refletir os objetivos relativos a quantidades mensuráveis do sistema atual, ser estatisticamente estável sob um conjunto de operações e se o modelo for usado para comparar alternativas, que seja dependente da política operacional selecionada. Dado um conjunto completo de medidas de desempenho, pode-se começar a discutir os retornos em investimentos trazidos por um modelo. Para a tomada de decisões deve-se pesar objetivamente e subjetivamente uma política operacional adequada, talvez até usando métodos de análise multicriterial.

*f) A acuracidade;* dados os conjuntos de medidas de desempenho, os modelos podem ser avaliados com relação à acuracidade prevista.

GASS (1991a) enfatiza que o futuro da P.O. e dos projetos de P.O. dependem da efetiva transferência de tecnologia para os países em desenvolvimento baseada na idéia de modelos e de seu processo de formulação, desenvolvimento e implementação, levando em consideração os conceitos relacionados à ética neste modelagem.

Utilizando os conceitos de *otimização de redes*, uma área da P.O. muito explorada devido aos resultados práticos alcançados, este trabalho terá para análise um sistema logístico, para o qual caberá decidir sobre a estratégia para implantação do *roteamento de veículos* com o propósito de se coletar e/ou entregar bens ou serviços.

## **1.2 Logística**

Segundo BALLOU (1995), Logística pode ser definida como sendo a provisão de bens ou serviços a partir de um ponto de fornecimento a um ponto de demanda vencendo espaço e tempo de uma forma econômica através da integração dos sistemas físicos, informacionais e gerenciais. Dessa forma, um sistema logístico completo não se atém, como muitos imaginam, aos aspectos físicos do sistema (veículos, armazéns, redes viárias etc), envolvendo também aspectos informacionais como processamento de dados, tele-informática e processos de controle gerenciais.

A Logística se encontra enraizada nas mais diversas áreas; tanto no setor militar como no de negócios e serviços. Esta última é a área de enfoque deste trabalho, embora muitas das técnicas apontadas aqui sejam aplicáveis a problemas de defesa e negócios também. A próxima seção tem a tarefa de introduzir este vasto tema.

### 1.2.1 Contextualização

Durante a primeira metade do século XX, a ênfase da indústria manufatureira recaía sobre a expansão e diversificação dos sistemas de produção. Durante a II Guerra e no período seguinte à esta, tal ênfase deu lugar à realização de estratégias de marketing. Com estas estratégias, começa a surgir uma consciência crescente do papel crucial desempenhado pelas atividades de distribuição física da produção.

Atualmente, as visões de marketing elevam o nível de serviço ofertado durante a distribuição física e a performance atingida passou a ser embasada por fatores históricos, legais e financeiros. Estabeleceu-se assim a importância da Logística na conjuntura econômica e de desenvolvimento tecnológico que vem aumentando de forma acentuada devido ao amplo leque de produtos que exigem tratamento racionalizado dos estoques e do processo de distribuição.

A análise logística dentro da indústria tem início com o processo de recebimento de matéria-prima dos fornecedores, passando pela movimentação interna desta, sua transformação em produtos, seu deslocamento para a estocagem em armazéns e sua eventual entrega aos clientes finais. Ou seja, a logística procura resolver problemas ligados ao suprimento de insumos ao setor produtivo (diversificação, preços, custos de transporte etc.), à política de estocagem, aos meios de transporte utilizados etc. de um lado, e na ponta oposta, trata dos produtos acabados e de problemas que se referem à armazenagem, processamento de pedidos, distribuição etc.

Os aspectos ligados a custo (estoques, transporte, controle, processamento, distribuição) são fundamentais e constituem a espinha dorsal da avaliação das soluções alternativas. A etapa de distribuição na cadeia logística é o elo mais custoso de todo o processo, e para que este seja realizado de uma forma mais eficaz, é necessário que haja um completo entrosamento entre as atividades de transporte e a área financeira da empresa.

O gerenciamento das atividades de distribuição apresenta uma série de problemas relativos à tomada de decisões tanto em nível de planejamento *estratégico*, como *tático* ou *operacional*. Decisões relacionadas à localização de depósitos, armazéns, fábricas etc., podem ser vistas como estratégicas, enquanto os problemas de dimensionamento de frotas podem ser chamados de táticos. Finalmente, no nível operacional estão as decisões que dizem respeito ao roteamento e à programação dos veículos e da tripulação de tais veículos. A distinção entre planejamento estratégico, tático e operacional não deve ser interpretada de forma muito rígida, em vista da grande interação que deve haver entre as decisões a serem tomadas.

Muitas empresas do setor privado realizam as atividades pertencentes ao sistema produção / estocagem / distribuição. Nestas empresas, estudos detalhados dos problemas de distribuição envolvem a consideração das rotas dos veículos, o tamanho da frota disponível e o tamanho da tripulação necessária. Estes são então analisados em conjunto, e desta análise resulta uma estimativa dos custos com transporte. A partir desta estimativa, buscam-se meios para tornar o processo mais econômico, ou seja; tenta-se otimizá-lo tendo em vista parâmetros ou medidas de desempenho que não só os econômicos, mas que refletem-se sobre estes no final.

Dadas as complexas relações entre os componentes de um sistema logístico e sua interação com o mundo em evolução, ampliar a visão científica através dos Transportes e de outras disciplinas da Engenharia de Produção, torna-se essencial para entender e explorar as numerosas oportunidades existentes. Sendo assim, uma retrospectiva do assunto torna-se ponto de partida para uma melhor compreensão do tema abordado.

#### ***a) O cenário brasileiro***

Na década de 50, iniciaram-se esforços mais estruturados para atacar de forma sistemática os problemas logísticos de natureza industrial e comercial. Segundo BALLOU (1995) embora as empresas não negassem a importância da distribuição, há pouca evidência que antes desta década as



indústrias organizavam ou gerenciavam suas atividades logísticas de forma integrada. Diversos foram os fatores condicionantes que contribuíram para o enfoque logístico no cenário atual. NOVAES (1978) enumera alguns deles:

- a) *A crise do petróleo*; a partir de 1973, os derivados do petróleo começam a sofrer aumentos constantes, o que leva as empresas a aumentar suas preocupações com transportes, buscando saídas mais racionais;
- b) *Os congestionamentos*, se tornam crescentes nos grandes centros urbanos, inviabilizando os custos com manutenção, combustíveis, rendimento da frota etc;
- c) *Os aumentos dos gastos com de mão-de-obra*, que fizeram aumentar os valores das tarifas do frete;
- d) *Os aumentos nas taxas de juros*, que causaram um forte impacto nos custos associados à estocagem de produtos;
- e) *A evolução tecnológica e mercadológica*, ofertando maior opção de produtos, fato que gera aumento apreciável na variedade dos itens estocados, ocasionando dificuldades de controle e custos. Começam também a surgir novas políticas de administração de recursos dentro das fábricas, como o *just-in-time*, que exige o estoque-zero;
- f) *O desenvolvimento da informática*, verificado tanto em termos de hardware como em software e possibilitando grandes avanços na armazenagem e transmissão de dados;
- g) *Ampliação do espectro de opções de transporte de mercadorias*, passando a oferecer modalidades diversas (rodovia, ferrovia, transporte aéreo, fluvial e marítimo) bem como integrações diversas com serviços melhor estruturados e articulados.

A situação das estradas brasileiras está longe de ser satisfatória, dado confirmado pelas estatísticas sobre acidentes; porém, a rede pavimentada cobre praticamente todo o território nacional, garantindo níveis de confiabilidade razoáveis. Com esta relativa evolução na rede de

transportes no Brasil, os aspectos logísticos já podem ser melhor coordenados.

O empresariado brasileiro sempre desejou soluções a curto prazo, o que muitas vezes torna impraticáveis os métodos de otimização dos sistemas logísticos. Porém as despesas com transporte vêm pouco a pouco aumentando as preocupações gerenciais e estas evoluindo e se tornando um pouco mais flexíveis com relação ao emprego da P.O.

Os recursos da informática em nível nacional estão bastante amplos possibilitando aplicações diversas com micros e sistemas *on-line* interligando terminais a grandes redes e possibilitando a aquisição e implementação de pacotes comerciais de roteamento, já disponíveis no mercado.

Falta, neste cenário, a fusão de todos estes aspectos de forma estruturada e planejada, de modo a garantir os níveis de confiabilidade dentro dos níveis de custos otimizados.

### **1.2.2 Otimização de redes**

Otimização de redes é uma área da Pesquisa Operacional muito rica em teoria e aplicações que está intimamente relacionado com a *Teoria dos Grafos*. Uma conexão óbvia, uma vez que redes são grafos a culos as arcos foram associados valores. GOLDEN *et al.* (1983) enumeram algumas das aplicações de otimização de redes:

- a) *Roteamento de veículos;*
- b) *Programação de tripulação e veículos;*
- c) *Programação de projetos usando PERT/CPM;*
- d) *Estudos de equilíbrio de tráfego;*
- e) *Lay-out e projeto de oleodutos;*
- f) *Redes de computadores;*
- g) *Localização e lay-out de postos de serviço;*

*h) Projeto de sistemas regionais de abastecimento de água;*

*i) Gerenciamento de fluxo de caixa;*

*j) Marketing;*

*k) Distribuição.*

A bibliografia sobre o roteamento de veículos é bastante vasta e amplamente documentada e, para o pesquisador que almeja empreitar-se nesta área do conhecimento, o estudo detalhado do que já foi produzido se torna um caminho indispensável para atingir um alicerce teórico sólido.

### ***O ROTEAMENTO DE VEÍCULOS***

Unindo-se ao que foi dito os elevados preços dos combustíveis no mercado internacional, as perspectivas de globalização, a busca por soluções mais inteligentes no setor de transportes se faz emergente. A ótima alocação de recursos para sustentar o nível de serviço nas atividades de distribuição é um problema muito bem estruturado acessível à abordagem tradicional da Pesquisa Operacional.

Dentro desta abordagem, a informática desempenha papel primordial pois, vem trazendo amplas possibilidades na gestão e racionalização dos processos logísticos, através da automação de atividades burocráticas e de controle, agilização de operações, transmissão e armazenamento de dados possibilitando inclusive o roteamento eficaz de veículos.

A área de roteamento de veículos se destaca por seu alto grau de interação entre a teoria e o desenvolvimento prático de sistemas eficientes para a indústria. E foi chamada pelos especialistas no assunto de 'uma das grandes histórias de sucesso da Pesquisa Operacional na última década'. E realmente o roteamento de veículos se tornou uma área de bastante interesse pelos pesquisadores de P.O. tanto dentro das universidades como fora delas.

O roteamento de veículos é a mais importante decisão logística à curto prazo. A importância das atividades de roteamento de veículos dentro das organizações tem se tornado mais e mais aparente devido à grande parcela que estas operam sobre o valor do produto final. Estudos realizados por LEINBACH (1995), mostram que os custos associados à distribuição física são responsáveis por 16% do valor de venda de um item. Destes, um quarto é devido à etapa final de distribuição aos clientes. O uso, então, de técnicas e modelos analíticos de roteamento de veículos se tornaram instrumentos valiosos para a otimização de sistemas de distribuição. Quando unido a um sistema de informação gerencial eficaz, o roteamento de veículos assume um papel crucial no planejamento operacional das atividades de distribuição.

As questões colocadas acima, não se limitam ao setor privado. O problema de distribuição também surge no setor público. Nos sistemas de transporte coletivo há que se decidir, por exemplo, onde localizar as garagens para os ônibus, como oferecer um serviço com qualidade e ao mesmo tempo econômico, como utilizar racionalmente a frota e os trabalhadores ligados à esta, etc. O mesmo acontece com a localização de unidades de emergência, isto é, o corpo de bombeiros, o departamento de polícia e os hospitais. Na coleta de lixo também aparecem vários aspectos que podem ser otimizados, como a localização de aterros e incineradores, a alocação da frota, o número da tripulação e também o roteamento da frota.

Dentro dos problemas de roteamento de veículos, apesar da minimização do custo se apresentar como o objetivo primário, outros podem assumir igual ou maior importância especialmente no contexto de operações de serviços. Por exemplo, ao se rotar um ônibus escolar, tem-se como objetivo principal, minimizar o tempo que os estudantes permanecem dentro do veículo, uma vez que esta medida está diretamente relacionada com segurança. Segurança e conforto são outros objetivos onde certos problemas devem manter seu foco. Um estudo mais detalhado sobre os problemas de roteamento de veículos permitirá entre outras, a escolha de uma função-objetivo mais adequada.

### **1.3 Objetivo do trabalho**

Explicitar como a empresa-base de estudos pode explorar os recursos oferecidos por cada uma das alternativas computadorizadas a serem apresentadas na busca por alternativas viáveis para a futura geração de rotas de veículos, bem como também analisar as limitações do emprego de cada uma dessas alternativas e as saídas proporcionadas pelos vários sistemas para que a empresa possa selecionar algo que julgue mais adequado segundo seus próprios critérios.

A empresa utilizada como base do estudo, considerada representativa do setor, realiza a coleta de resíduos sólidos na cidade de São Carlos - SP.

Nos capítulos subsequentes serão relatadas as etapas básicas que foram desenvolvidas tendo em vista o objetivo proposto. Tais etapas são:

- . O estudo da *Teoria dos Grafos*, importante ferramenta para a modelagem dos problemas de otimização de redes.
- . Estudo dos *problemas de roteamento de veículos* e das principais abordagens para sua solução, com ênfase à coleta de resíduos sólidos.
- . A introdução de abordagens baseadas em *sistemas computacionais* desenvolvidos para o roteamento de veículos.
- . Análise da natureza da realização da atividade através das características presentes no processo de coleta de resíduos sólidos na cidade de São Carlos - SP.
- . Apresentação de propostas de sistemas computacionais como alternativas para o roteamento mais adequado à frota de veículos da empresa prestadora de serviço.
- . Considerações gerais sobre o trabalho e conclusões.

## 2. INTRODUÇÃO À TEORIA DOS GRAFOS

A *Teoria dos Grafos* é uma rica ferramenta capaz de traduzir uma situação real, permitindo o modelamento de um grande número de problemas práticos em otimização de redes. Neste capítulo serão introduzidos os termos, notações e as definições básicas referentes à Teoria dos Grafos integrantes fundamentais dos processos de geração de rotas para os problemas em geral.

Neste capítulo também serão introduzidos os conceitos sobre *casamentos em grafos fluxos caminhos mínimos e mínima árvore gerada*. Estes conceitos, intimamente relacionados, aparecem constantemente na forma de subproblema em quase todo problema de rede e os procedimentos para sua determinação são usados como subrotinas para resolver muitos problemas de roteamento de veículos.

Abaixo estão definidas as principais características dos conjuntos componentes de um grafo. Um *grafo* ou uma *rede* é uma entidade  $G = (N,A)$  constituída por um conjunto de *nós* (pontos de intersecção de dois ou mais arcos) representado por  $N$  e um conjunto de *arcos* (elos de ligação entre dois nós) representado por  $A$ . Os arcos que compõem a rede podem possuir ou não orientação o que resultará numa rede *orientada* ou *não-orientada* respectivamente. Ou ainda as redes podem ser *mistas*, isto é formadas por ambos os tipos de arcos.

As figuras 2.1 e 2.2 no final do capítulo ajudarão a identificar estes componentes.

### 2.1 O conjunto de arcos de um grafo

Um arco  $(i,j)$  é dito *orientado* quando sua orientação vai do nó  $i$  ao nó  $j$ . Um arco ainda pode ser dito *incidente* sobre os nós sobre os quais possui uma de suas extremidades e *adjacente* em relação a outro arco (orientado ou não) unido ao primeiro através de um nó.

Numa rede orientada, os *caminhos* serão sequências de arcos, também orientados, com arcos adjacentes chegando nos nós e saindo deles. Os caminhos podem ser indicados como uma sequência de nós adjacentes (por exemplo,  $S = \{a, b, c, \dots, i, j, k\}$ ) ou de arcos adjacentes (por exemplo,  $S = \{(a,b), (b,c), \dots, (i,j), (j, k)\}$ ).

Um caminho é dito *simples* se cada arco aparece uma vez só nesta sequência e é chamado *elementar* se cada nó aparece uma vez só na sequência. Uma *cadeia* é um caminho onde não são consideradas as orientações dos arcos. Um *ciclo* é um caminho onde os nós finais e iniciais coincidem, isto é, é um caminho fechado.

Num grafo são especificadas as características dos elementos, isto é, os nós são enumerados e aos arcos são associados *comprimentos*, que podem ser unidades de distância, tempo, custo etc. Os comprimentos dos arcos serão indicados por  $l(i, j)$ , onde  $(i, j) \in A$ . O comprimento do caminho  $S$  entre dois nós sobre  $G$  é dado por  $L(S) = \sum_{(i,j) \in S} l(i, j)$ . A notação  $d(x, y)$  será usada para indicar a *menor distância* entre dois pontos  $x, y \in G$  ( $x$  e  $y$  não estão restritos ao conjunto de nós  $\in G$ , podendo ser quaisquer pontos  $\in G$ ). A notação  $d(i, j)$  será usada para indicar a menor distância entre dois pontos que pertençam ao conjunto de nós  $N$  de  $G$  ( $N, A$ ).

A seguir serão introduzidos dois problemas de operação com grafos associados à manipulação do conjunto de seus arcos.

### 2.1.1 Casamentos em grafos

DANTZIG (1957) descreve este importante problema de forma popular através de sete moças que devem escolher entre sete rapazes para se casar. Cada uma elabora um *ranking* dos sete rapazes em ordem decrescente de preferência e o objetivo é designar os pares de forma a maximizar a satisfação das noivas em suas escolhas.

Considere um grafo  $G = (N, A)$  cujo conjunto de arcos  $A$  pode ser dividido em dois subconjuntos  $S$  e  $T$ , de tal forma que todo arco  $(i, j)$  possua seu nó destino em  $S$  e seu nó origem em  $T$ . E ao grafo  $G = (S, T, A)$  dá-se o nome de *grafo bipartido*. Uma aplicação prática para este tipo de problema é a atribuição dos elementos pertencentes a  $S$  aos elementos pertencentes a  $T$ , como por exemplo na alocação de atletas às provas dentro de uma competição (HANNAN & McKEOWN, 1979).

Um casamento é um subconjunto  $M$ , de arcos  $\in A$  tal que se forem tomados dois arcos não-orientados quaisquer pertencentes a  $M$ , não existe um nó comum a ambos, isto é dois nós estarão *casados* se o arco que os une possuir uma extremidade (um nó) num subconjunto  $S$  e outra extremidade num subconjunto  $T$ . Os nós chamados *solteiros* são aqueles que não fazem par com nenhum outro nó, isto é eles estão 'soltos' e não constam em  $M$ .

A idéia básica consiste em encontrar o conjunto de arcos  $M$  de pares de nós que ofereça a melhor solução, isto é um *grafo par* resultante que ofereça o *casamento perfeito de mínimo custo (CPMC)* sendo os primeiros trabalhos sobre casamentos desenvolvidos por EDMONDS & JONHSON (1973).

Um casamento é *perfeito* quando todos os nós  $i \in N$  são casados. Seja  $M^*$ , o conjunto de todos os casamentos perfeitos de  $G$ . É chamado *casamento perfeito de mínimo custo*, o casamento  $M$ , cujo custo analisado em termos do comprimento total é o menor dentre todos os casamentos  $M'$  pertencentes a  $M^*$ . Uma condição necessária para a existência do CPMC é que o grafo possua número par de nós para que nenhum nó fique solteiro.

### 2.1.2 Fluxos em redes

Uma questão natural, mas não elementar, vem à mente quando do estudo de grafos: o valor ótimo de uma função de fluxo entre dois pontos. Ou seja, a *capacidade de (tráfego) de um arco*.



Dado um grafo  $G = (N, A)$ , com capacidades  $q(i,j)$ , associadas aos arcos  $(i,j)$ , um dos problemas mais comuns relacionado com fluxos é o de se determinar o valor do fluxo máximo que pode ser transportado do nó inicial, denominado *origem*, para o nó terminal, o *destino*.

Dois problemas básicos relacionados com fluxos em redes serão abordados aqui, o primeiro consiste em determinar o *fluxo máximo* que percorre os arcos de um grafo, o outro, um *fluxo de mínimo custo* que percorra o grafo da origem ao destino. Os problemas citados acima são resolvidos de forma *heurística* pelos algoritmos desenvolvidos por FORD & FULKERSON (1962) e BUSACKER & GOWEN (1961) *apud* COSTA (1982) respectivamente.

#### **a) Fluxos máximos**

Tem-se o grafo  $G = (N,A)$ , com capacidade  $q(i,j)$  atribuídas aos arcos  $(i,j)$ , um nó origem  $s \in N$  e um nó destino  $t \in N$ . Sendo  $x(i,j)$  a quantidade de fluxo máximo de  $s$  para  $t$  que atravessa o arco  $(i,j)$ , torna-se claro que  $0 \leq x(i,j) \leq q(i,j)$ .

#### **b) Fluxo de mínimo custo**

Considerando um grafo  $G = (N,A)$ , com custos  $c(i,j)$  e capacidades  $q(i,j)$  associadas aos arcos. O problema do fluxo de mínimo custo pretende obter o fluxo de mínimo custo para percorrer o grafo do nó origem ao nó destino, respeitando um fluxo padrão pré-estabelecido.

São exemplos de aplicação destes problemas, uma rede distribuidora de gás natural interessada no volume máximo de gás que pode ser fornecido à um cliente específico ou uma rede distribuidora de energia elétrica interessada na quantidade de energia a ser transmitida da estação geradora até uma localidade específica a mínimo custo.

## 2.2 O conjunto de nós de um grafo

Todo nó possui duas importantes propriedades associadas a si. O primeiro chama-se *grau*. O grau de um conjunto de nós num grafo não-orientado será igual ao número de arcos incidentes sobre ele, ou seja o número de arcos que terminam ou acabam neste nó, assim cada nó terá um grau. Para os grafos orientados podem ser definidos ainda o *grau de entrada* de cada nó. Este será igual ao número de arcos que *chegam* ou seja, são orientados em direção à este nó. Já o *grau de saída* de um nó corresponde ao número de arcos que *saem* deste nó, ou seja, são orientados em direção oposta ao nó.

Os nós pertencentes a um grafo não-orientado podem ainda apresentar *grau par ou ímpar*. Um nó com grau par (ímpar) possui número par (ímpar) de arcos não-orientados incidindo sobre si.

Outro importante parâmetro associado aos nós chama-se *déficit*. A diferença entre os graus de entrada e de saída de cada nó de uma rede orientada definirá o *déficit* destes nós. Se o *déficit* dos nós de uma rede orientada for igual a zero significa que o mesmo número de arcos que entram no nó saem dele.

Associado ao conjunto de nós está o problema do cálculo dos caminhos mínimos sobre um grafo, próximo assunto.

### 2.2.1 Caminhos mínimos

Um dos aspectos mais importantes, relativos ao estudo de grafos, diz respeito à determinação dos *caminhos mínimos entre nós*. Existem diversos métodos disponíveis para se determinar os caminhos que minimizam o tempo de viagem, custos ou a distância percorrida entre dois nós específicos sobre um grafo (POLLACK & WIEBENSON (1960), DANTZIG (1960), GOLDEN (1976), DANTZIG & RAMSER (1959) etc).

Dado um grafo  $G = (N, A)$  com a matriz  $C = [c(i,j)]$  correspondente aos custos de se atravessar os arcos  $(i,j)$ , o problema do caminho mínimo consiste em elaborar o caminho entre dois nós de forma que a soma dos custos envolvidos seja mínima. Vale lembrar que a matriz de custos acima poderá representar também distâncias ou tempos de viagem e os valores associados aos arcos serão sempre *não-negativos* para impedir que o método indique um caminho onde seu valor tenda para menos infinito.

Generalizando ELMAGHRABY (1970) classifica os problemas de determinação dos caminhos mínimos em quatro categorias principais:

- a) *Problema do caminho mínimo entre dois nós específicos  $s$  e  $t$*
- b) *Problema dos  $m$ -caminhos mínimos entre dois nós específicos  $s$  e  $t$*
- c) *Problema do caminho mínimo de  $s$  (ou  $t$ ) para todos os nós do grafo*
- d) *Problema do caminho mínimo entre todos os pares de nós do grafo*

Os problemas 2, 3, 4 são generalizações do problema 1 e podem ser resolvidos usando procedimentos semelhantes. Basicamente são dois os procedimentos para resolver estes problemas; o primeiro, de DJKSTRA (1959), que determina os caminhos mínimos a partir de um dado nó do grafo para todos os outros, indicado para resolver os problemas 1,2,3 e o segundo, de FLOYD (1962), que determina simultaneamente os caminhos mínimos entre todos os nós do grafo, indicado para resolver o problema 4, por ser mais eficiente em termos de complexidade computacional. Ambos podem ser usados para grafos orientados, não-orientados ou mistos.

### **2.3 Propriedades dos grafos**

Relacionado ao conceito de caminhos está outro, o de *conexidade*; diz-se de um nó  $i$  onde há um caminho o unindo a um nó  $j$  que estes estão *conexos*. Um *grafo não-orientado conexo* é aquele onde existe um caminho ligando todos os pares de nós  $i, j \in N$ . Similarmente, um *grafo orientado*

*conexo* é aquele cujo seu grafo não-orientado associado, ou seja, o grafo resultante da retirada de suas orientações, é conexo.

Em um grafo orientado conexo qualquer pode não haver um caminho unindo determinado nó  $i$  a um nó  $j$  qualquer, isto é, o nó  $i$  pode estar *desconexo* do nó  $j$ , podendo ainda assim, haver um caminho no grafo que possua esses dois nós. Já no caso de um *grafo orientado fortemente conexo*, há um caminho unindo todos os pares de nós entre si.

Um *subgrafo*  $G'(N', A')$  de um grafo  $G(N, A)$ , é um grafo tal que  $N' \subset N$  e  $A' \subset A$ . Sendo que  $A'$  pode conter arcos que só uma 'ponta' destes esteja em  $N'$ . Isto inclui a possibilidade deste subconjunto de arcos ser um conjunto vazio ou mesmo ser igual ao conjunto original de arcos.

Toda rede não-orientada possui associado a ele um subgrafo conexo chamado *árvore* que não possui ciclos, isto é, numa árvore não há caminhos fechados. Uma árvore conexa com  $t$  nós tem exatamente  $t-1$  arcos e existe um único caminho entre dois nós da árvore. Uma *árvore gerada* de um grafo não orientado  $G(N, A)$  é uma árvore que contem o conjunto completo  $N$  de nós de  $G$ . Os termos redes e grafos serão utilizados alternadamente ao longo do trabalho.

Dos grafos orientados pode ser extraído um subgrafo conexo chamado *árvore orientada*, que possui um *nó raiz* e um único caminho deste nó para qualquer outro nó na árvore. Uma *arborescência* de um grafo orientado  $G(N, A)$  é uma árvore orientada que contem o conjunto  $N$  completo de nós de  $G$ .

### 2.3.1 A mínima árvore gerada

A solução deste problema sobre um grafo não-orientado garante a este a conexidade entre todos seus componentes. Se a rede em mãos é pequena, pode-se concluir à olho se a rede está conexa ou não. Porém em redes muito extensas com centenas de arcos e nós fica difícil atestar pela

conexidade da rede só olhando e algum procedimento para a geração da árvore precisa ser endereçado.

O problema da mínima árvore gerada consiste em achar entre todas as árvores geradas de um grafo aquela de menor extensão total. Este problema é um importante componente para resolução de problemas de roteamento mais complexos.

Um exemplo de sua utilização consiste no seguinte problema: considerando um conjunto de  $n$  localidades rurais às quais existe alguma medida de distância, tempo ou custo associado entre todos os pares possíveis de localidades. O problema da mínima árvore gerada pode ser interpretado como a mínima extensão de estradas necessárias para conectar direta ou indiretamente todos os pares de cidades sem a introdução de *nós artificiais*, isto é sem a criação de outras localidades além das previstas (nós originais).

### 2.3.2 Rotas em grafos

Uma *rota* para um(vários) veículo(s) equivale ao traçado de uma sequência (um ciclo sobre a rede) onde os locais (arcos ou/e nós) que precisam ser visitados a partir de um certo depósito e para onde este(s) retorna(m) depois de cumprida tal rota.

Um *programa* de um(vários) veículo(s) incorpora restrições com relação aos intervalos de tempo chamadas *janelas de tempo*, que DESROSIERS *et al.* (1991) define como o mais 'cedo' e o mais 'tarde' que uma atividade de coleta ou entrega pode começar dentro de uma sequência de locais. Uma janela de tempo pode ser *bilateral*  $[s, t]$  restringindo o tempo de serviço a um intervalo de tempo específico, isto é, de  $s$  para  $t$ . Fica óbvio que se  $s = t$ , teremos um *horário pontual*, isto é, um horário específico de serviço. Uma *janela unilateral*  $[-8, t]$  ou  $[s, 8]$  é aquela que requer que o serviço seja feito antes de  $t$  ou depois de  $s$ . Este assunto é bastante vasto incluindo muitos trabalhos publicados dada sua importância. Destaca-se aqui, o trabalho de BALAKRISHNAN (1993) com um estudo sobre *janelas de*

*tempo soft*, que são janelas de tempo que permitem pequenas violações no seu intervalo, mediante uma pequena penalidade imposta. As janelas de tempo introduzem características mais realistas aos problemas de programação que devem ser incorporadas como observaram também FRIZZELL & GIFFIN (1995) e uma infinidade de autores em seus estudos sobre o assunto.

Numa rede não-orientada  $G = (N, A)$  com os comprimentos  $l(i, j) \geq 0$  associados ao conjunto de arcos  $(i, j) \in A$ , deseja-se encontrar um ciclo que comece e termine no nó  $i$  e passe por todos os arcos de  $G$  pelo menos uma vez minimizando a distância total percorrida, isto é, a soma  $\sum_{\text{todo } (i, j) \in A} n(i, j) \cdot l(i, j)$  deverá ser mínima, onde  $n(i, j)$  é o número de vezes que cada arco é percorrido. Se  $n(i, j) = 1$ , tem-se um ciclo de mínimo custo, onde o custo pode ser uma função da distância, dos tempo de viagem etc...

A este ciclo de mínimo custo convencionou-se chamar *rota de Euler*, devido aos resultados alcançados por EULER (1953), todo ciclo que tenha início em um nó arbitrário de um grafo qualquer, passe por todos os arcos desse grafo e retorne ao nó de partida. Também convencionou-se chamar de *caminho de Euler*, toda rota que percorra todos os arcos de um grafo exatamente uma vez sem no entanto que seus nós inicial e final coincidam. A partir destas observações deriva um resultado para a formulação de um importante teorema para o traçado de rotas sobre grafos:

***Teorema de Euler:*** *Um grafo não-orientado conexo  $G$  possui uma rota de Euler (caminho de Euler), se e somente se  $G$  contiver exatamente zero (exatamente dois) nós com grau ímpar. Já num grafo conexo orientado haverá uma rota de Euler, se os nós de  $G$  tiverem grau de entrada igual ao grau de saída.*

Fica claro, portanto que se o grafo com o qual se trabalha obedece à estas premissas, o problema se torna bastante simples e os métodos de sua resolução também. Caso contrário, serão necessários procedimentos capazes de modificar o grafo original até que este passe a oferecer condições para o traçado de um rota de Euler. O desafio destes

procedimentos reside em se modificar o grafo original (com a adição de arcos artificiais para que este se torne conexo e passe a ter grau par) causando o menor aumento possível no comprimento total a ser percorrido, uma vez que o objetivo principal é justamente a minimização das distâncias envolvidas.

A solução do problema da árvore gerada garante conexidade ao grafo enquanto a resolução do problema de casamentos em grafos tem como objetivo tornar todos os nós de um grafo não-orientado e conexo, pares, transformando assim também o grafo original num *grafo par* não-orientado totalmente conexo, onde segundo PEARN & LI (1995) existe uma rota que passe por todos os arcos do grafo sem repetir arcos.

Similarmente para um grafo orientado  $G = (N, A)$  também são duas as condições necessárias para a existência de uma rota capaz de descrever sobre todos os arcos do grafo um ciclo de mínimo custo agora também respeitando a orientação dos arcos da rede. A conexidade do grafo precisa ser assegurada para que não hajam arcos desconexos do restante da rede impossibilitando o desenho da rota. Além disso, é necessário que o grau de entrada de cada nó seja igual ao seu grau de saída, ou seja o déficit de todos os nós deve ser zero.

Aos grafos orientados será garantida a conexidade se o grafo não-orientado resultante da eliminação de suas direções for conexo. A solução dos problemas de fluxo em grafos orientados permite a realização de operações com o grafo original transformando-o num *grafo simétrico* onde o número de arcos que chegam ao nó  $i$  seja igual ao número de arcos que saem do nó  $i$ , ou seja todos os nós possuem déficit zero. Conforme CRISTOFIDES (1973), se o grafo for simétrico há a garantia que existe uma rota que passe por todos os arcos pode sem repetir nenhum arco.

São condições básicas para a existência de Ciclos Eulerianos em grafos mistos; a sua conexidade, o grau par da rede em questão e uma rede simétrica, o que torna este problema muito mais complexo que os dois anteriores em termos de *abordagem*, de solução (*ele é NP-completo*) e de

complexidade computacional, pois não há algoritmos eficientes para resolvê-lo, ao contrário dos dois primeiros. Foram introduzidos conceitos básicos presentes em muitas soluções dos problemas de roteamento de veículos, próximo tema.

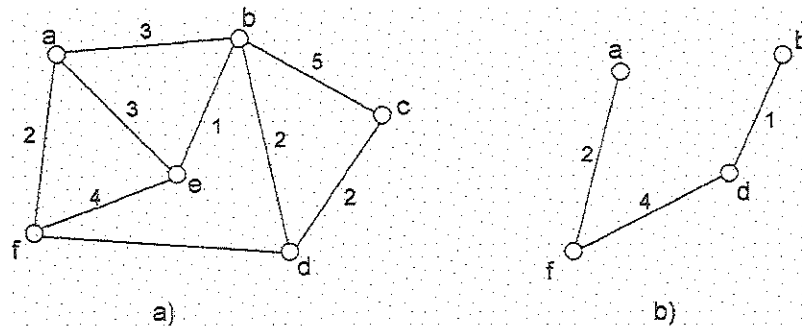


Figura 2.1: (a) Um grafo não-direcionado  $G$  com seis nós e nove arcos. Os nós  $a$  e  $b$  são adjacentes já  $a$  e  $e$  não. O grau do nó  $e$  é 3, uma vez que os arcos  $(b,e)$ ,  $(a,e)$  e  $(f,e)$  são incidentes nele. Um caminho do nó  $a$  ao nó  $b$  é  $\{a, e, f, d\} = \{(a,e), (e,f), (f,d)\}$ ; este caminho é simples e elementar. O caminho  $\{a,b,e,f,d,b,c\}$  contém um ciclo.  $G$  é conexo. Os números nos arcos de  $G$  são os comprimentos dos arcos. A menor distância entre os nós  $a$  e  $c$ ,  $d(a,c)$  é 7. (b) Um subgrafo de  $G$ , que também é uma árvore mas não uma árvore gerada.

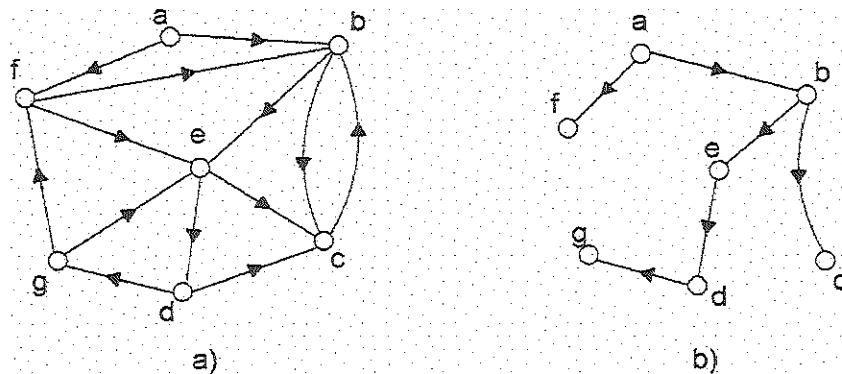


Figura 2.2: (a) Um grafo direcionado  $G$ . Os nós  $f$  e  $e$  são adjacentes; os nós  $a$  e  $d$  não. O caminho  $(a, f, e, d, g, f, b)$  é simples, mas não elementar uma vez que contém um ciclo.  $G$  é conexo, mas não fortemente conexo uma vez que é impossível ir, por exemplo do nó  $g$  ao nó  $a$ . (b) Um subgrafo de  $G$ , o qual também é uma árvore direcionada com raiz em  $a$ . Esta árvore também é uma arborescência uma vez que contém todos os nós de  $G$ . O grau de entrada do nó  $e$  em  $G$  é 3 e o de saída é 2, portanto o seu déficit é 1.



### 3. OS PROBLEMAS DE ROTEAMENTO E AS ESTRATÉGIAS DE SOLUÇÃO

Os problemas de roteamento e programação dividem-se em três categorias: aqueles que englobam os problemas de roteamento puro, os de programação pura e os de roteamento e programação simultâneas, sendo a primeira a categoria de interesse neste trabalho.

Esta categoria é composta por diferentes problemas reais que incorporam ou não determinadas restrições e/ou características dependendo de como se realiza a atividade de transporte em questão. O que não impede, portanto, que problemas muito diferentes entre si, por incorporarem (ou não) esta ou aquela característica em sua formulação pertençam à mesma categoria, isto é, dentro da categoria de roteamento de veículos existem problemas muito diferentes entre si.

Após a categorização inicial do problema, como identificar o perfil do problema que se tem em mãos para posteriormente resolvê-lo eficazmente? Antes de tudo é preciso uma descrição, ainda que breve, das características principais que definem o problema de uma forma sistemática para que outras decisões como, por exemplo, que estratégias de solução melhor associar a este perfil de problema possam ser direcionadas.

Este capítulo está dividido em três partes; na primeira são apontados as restrições e os critérios básicos para uma primeira descrição do problema, na segunda parte, são definidos alguns problemas básicos de roteamento de veículos derivados à partir da análise das restrições e critérios assinalados e numa terceira parte, são apresentadas as principais classes de abordagens onde se enquadram as estratégias aplicáveis à solução dos problemas básicos da literatura.

### 3.1 Descrição dos problemas de roteamento

Como primeiro objetivo deste capítulo está a apresentação de critérios e restrições que embasam o modelamento dos problemas reais. Tais critérios estão divididos em três campos: os *endereços*, os *veículos* e dos *problemas*, contendo informações respectivas a cada campo.

**a) Endereços:** Este campo define as características que podem ser associadas às localizações dos endereços. Todos os endereços estarão localizados sobre um grafo. Existem três tipos de informação neste campo:

- . *característica da rede*, onde será especificado o tipo de grafo com base na orientação de seus arcos;

- . *localização da demanda/fornecimento*, onde será especificado se a demanda/fornecimento se localiza nas ruas (arcos), esquinas (nós) ou ambos, isto é, este dado indica a classe de problema de roteamento se trata;

- . *natureza da demanda*, onde é especificado se a demanda é determinística, estocástica ou parcialmente atendida;

**b) Veículos:** Este campo definirá as características dos veículos e suas rotas. Existem três tipos de informação neste campo:

- . *número dos veículos*, que pode ser tanto uma constante ou uma variável dependendo do problema;

- . *as características físicas dos veículos*, neste serão especificadas a capacidade dos veículos, o tipo da frota e o número de depósitos onde se localiza a frota;

- . *as restrições temporais da rota*, onde serão especificados os tempos de duração das rotas.

**c) Características dos problemas:** Este campo agrupa informações sobre o tipo de atividade desenvolvida, os custos envolvidos e os objetivos a serem alcançados:

- . *atividades envolvidas*, especifica o tipo de atividade a ser realizada, ou seja, coletas, entregas ou ambas, se 'quebras' (entregas ou coletas parciais) são permitidas e se há a possibilidade de numa atividade de coletas e entregas, efetuar as entregas na ida e as coletas na volta (é a chamada *volta carregada*);
- . *custos*, onde há a definição dos custos que podem incorrer sobre as atividades;
- . *objetivos*, especifica que função-objetivo melhor se adapta ao processo de otimização.

A abordagem a seguir proposta por BODIN *et al.* (1983) agrupa sistematicamente as informações básicas necessárias contidas nos campos definidos acima tentando esboçar o perfil da realidade. São estas que se encarregaram de traduzir o problema real para um problema abstrato indicando qual problema (descrito ou não na literatura) melhor contempla a situação real. Na melhor das hipóteses estes critérios conseguirão definir um problema 'conhecido' de roteamento e os potentes algoritmos disponíveis para ele podem ser aplicados, caso contrário, um novo problema estará sendo formulado com base nas suas restrições e outros procedimentos de solução precisam ser endereçados.

### 3.1.1 Critérios básicos para a descrição dos problemas

#### **a) Características da rede:**

- . não-orientada;
- . orientada;
- . mista;
- . euclidiana.

#### **b) Natureza da demanda:**

- . determinística;
- . probabilística;

. parcialmente satisfeita.

**c) Localização da demanda:**

. sobre os arcos mas, não necessariamente em todos;

. sobre os nós mas, não necessariamente em todos;

. mista.

**d) Tamanho da frota disponível:**

.um único veículo;

.vários veículos.

**e) Tipo da frota disponível:**

. homogênea ( só um tipo de veículo);

.heterogênea ( vários tipos de veículos);

.tipos de veículos especiais.

**f) Garagem dos veículos:**

. um único depósito;

. vários depósitos.

**g) Restrições de capacidade do veículo:**

. imposta (todas as mesmas);

. imposta (variada):

. não imposta

**h) Tempos máximos das rotas:**

. impostos (o mesmo para todas as rotas);

. impostos (diferentes para rotas diferentes);

. não impostos.

**i) Tipos de atividades envolvidas:**

. só coletas;

- . só entregas;
- . mistas;
- . 'quebras' permitidas;
- . 'quebras' proibidas;
- . volta carregada.

***j) Custos:***

- . variáveis ou sobre as rotas;
- . fixos ou os custos de aquisição de veículos;
- . custos comuns de transporte

***k) Objetivos:***

- . minimizar os custos totais de roteamento;
- . minimizar a soma total dos custos fixos ou variáveis;
- . minimizar o número de veículos necessários;
- . maximizar a função baseada no nível de serviço e conforto;
- . maximizar a função baseada nas prioridades dos consumidores.

É importante observar que os aspectos apresentados não foram esgotados, isto é, o enfoque dado às características para se classificar um certo problema varia de autor para autor e de realidade para realidade, porém se mantêm sempre presentes as premissas básicas apresentadas para a definição de problemas.

Sendo a matemática uma ciência exata há de se convir que esta não consiga representar a realidade em toda sua complexidade, podem estar aí a causa de muitas falhas de implementação. Porém há vezes que o modelamento de um problema se tornaria inviável se tentasse considerar todas as variáveis envolvidas. Casos como estes onde o modelo é limitado assume-se de antemão que a solução gerada não será a 'ótima'. Porém muitas vezes alcançar uma solução 'melhorada' constitui um grande avanço

onde o importante é conhecer as relações entre as variáveis que atuam no modelo.

Esta seção manteve seu foco no processo de elucidação das características da natureza do problema e nas restrições do projeto das rotas. Este processo pavimenta o caminho para as análises futuras, mas é preciso entender que a tarefa de modelar apropriadamente o problema vai muito além desta primeira análise.

Antes de introduzir alguns problemas resultantes da combinação dos aspectos listados já descritos na literatura, é necessário neste momento definir precisamente outro importante critério relacionado diretamente à natureza de problemas para sua correta formulação, trata-se do fator *complexidade de algoritmo*.

### **3.1.2 Algoritmos e sua complexidade computacional**

Algoritmos são técnicas usadas na resolução de problemas empregando, para isto, uma sequência de passos lógicos. Eles se dividem em *exatos* ou *heurísticos* quanto a qualidade de solução. Enquanto os primeiros garantem uma solução ótima para o problema, os heurísticos (ou aproximados) permitem a obtenção de uma solução factível, não necessariamente ótima, mas uma boa solução. Pode-se dizer que os algoritmos heurísticos 'trocam' garantia da otimalidade por velocidade de obtenção da resposta.

Problemas de larga escala extraídos da realidade, às vezes, não se encaixam nos moldes clássicos e deve-se ficar satisfeito com soluções próximas do ótimo obtidas com o tratamento heurístico dado a estes, mesmo porque, a inexatidão dos dados na prática dada sua natureza probabilística, como nos tempos de viagem entre dois pontos, podem tornar o conceito de solução 'ótima' puramente teórico.

Dentro do tratamento heurístico a ser dado ao problema há um importante fator a ser considerado na formulação e escolha da solução de

qualquer problema, a *complexidade do algoritmo*. Baseada em rigorosos métodos de avaliação e classificação de algoritmos, está o estudo da teoria da complexidade computacional de um algoritmo. Esta teoria está profundamente ligada ao campo da análise combinatorial, que forneceu explicações, motivação e paradigmas.

A carga computacional de certos algoritmos para se resolver problemas pode aumentar com o tamanho do problema. Se este crescimento for muito rápido, a carga computacional deste algoritmo torna-se proibitiva mesmo para problemas de médio porte limitando com isto sua aplicabilidade em problemas reais, uma vez que estes são de larga escala. A natureza deste crescimento em tempo computacional se tornou um tema de grande interesse prático e teórico.

Os cientistas dividem os algoritmos em duas classes de acordo com a sua complexidade, os *polinomiais* e os *exponenciais*. Polinomiais são aqueles cuja complexidade é proporcional à uma função polinomial do tamanho da entrada de dados. Exponenciais (ou não-polinomiais) são aqueles que violam os limites polinomiais para grandes entradas de dados. Os polinomiais são considerados algoritmos eficientes enquanto os exponenciais são considerados algoritmos ineficientes.

Diz-se dos problemas polinomiais que pertencem à classe  $P$  e que os não-polinomiais formam a classe dos problemas NP. Nesta última estão os problemas chamados *NP-completo*. São problemas que formam um universo onde os algoritmos polinomiais não penetraram. Este universo é caracterizado pela propriedade que garante que, se existir um algoritmo polinomial para um problema desta classe então todos os outros problemas da classe serão polinomiais. Isto é, hoje sabe-se que  $NP \supset P$  e, ainda assim descobrir se  $P = NP$  é uma conjectura que instiga os especialistas, apesar de pouco provável. Porém alguns autores consideram, que se um problema é *NP-completo*, tem-se um argumento suficientemente forte para interromper a busca por um algoritmo eficiente para resolvê-lo.

A complexidade de um algoritmo avalia o número de instruções executadas por este algoritmo com relação ao comprimento da codificação dos dados utilizados. Segundo LARSON & ODONI (1981), a complexidade de um algoritmo pode ser medida através do número de operações elementares (adição, subtração, multiplicação e divisão) que um algoritmo requer para chegar à uma solução sob suas 'piores condições', isto é, sua performance sob a pior situação que puder ser imposta e este na entrada de dados.

BODIN *et al.* (1983) salientam que mesmo problemas pertencentes à classe  $P$ , podem sofrer alterações radicais em sua complexidade computacional, se for feita uma pequena alteração em um daqueles aspectos citados. Por exemplo, embora o *problema do carteiro chinês* em redes não-orientadas pertença à classe  $P$ , se as direções forem alocadas a alguns arcos, o problema se torna NP-completo.

LENSTRA & RINNOOY KAN (1981) afirmam que existem vários desenvolvimentos na interface com a programação matemática e a teoria da complexidade que provavelmente influenciarão as áreas de roteamento e programação de veículos causando um impacto direto em seu estudo. Portanto, fica claro que a qualidade de um algoritmo é medida em boa parte por sua complexidade. Ou seja, este pode ser um bom critério para a escolha entre dois (ou mais) algoritmos para resolver o mesmo problema. Este é um, dentre os muitos fatores a se considerar quando da formulação e solução corretas de um problema.

Tendo sido introduzidos tais conceitos a próxima seção detalhará a natureza de alguns problemas básicos de roteamento de veículos e de suas variações.

### **3.2 Problemas de roteamento de veículos**

O problema de roteamento básico é aquele onde se geram rotas factíveis sobre os nós ou arcos de uma rede, visando minimizar algum fator



ligado aos custos totais. Uma vez que não há relações de precedência durante as coletas e entregas nem restrições de tempo, o problema se torna essencialmente espacial. Devido sua natureza relativamente irrestrita estes problemas têm chamado a atenção de muitos pesquisadores ao longo das décadas e três modelos de abordagens básicos foram por eles propostos (DASKIN 1985):

**a) Modelos de roteamento sobre arcos;** Quando a demanda se localiza em pontos próximos entre si como casas ao longo de ruas ou avenidas que representem os arcos do grafo, tem-se o *problema de roteamento de arcos*, onde as entregas ou coletas precisam ser realizadas percorrendo-se todos os arcos. O problema está em encontrar uma rota que percorra todos os arcos do pelo menos uma vez minimizando a distância total percorrida. Tem-se o *problema do carteiro chinês e suas variantes* como exemplos deste modelo. Uma aplicação prática desta abordagem é o roteamento dos caminhões que percorrem as ruas e avenidas (os arcos) fazendo a coleta de lixo doméstico numa cidade.

**b) Modelos de roteamento sobre nós;** Quando as entregas ou coletas precisam ser feitas em um conjunto de pontos frequentemente distanciados entre si o problema de roteamento a ser resolvido se torna um problema de cobertura de nós. Neste, a demanda localiza-se sobre pontos específicos da rede em questão, como esquinas numa rede urbana ou como cidades ao longo de uma estrada, que representam os nós do grafo. O problema se torna encontrar uma rota que passe por todos os nós do grafo pelo menos uma vez minimizando a distância total percorrida. O *problema do caixeiro viajante e suas variantes* se enquadram neste modelo de abordagem. Um exemplo de aplicação desta abordagem é o roteamento dos caminhões da coleta de lixo nos hospitais (os nós) de uma cidade.

**c) Modelos gerais de roteamento de veículos;** Quando a demanda se localiza sobre os nós e arcos do grafo temos este modelo mais geral de roteamento que incorpora o problema de roteamento clássico e suas restrições quanto ao número de depósitos, veículos, capacidade etc.

Serão apresentados problemas básicos e suas variações gerados a partir da definição dos critérios recém-assinalados e sempre que conveniente uma configuração de rotas factíveis será apresentada.

### 3.2.1 Problema do carteiro chinês (PCC)

O PCC é o mais conhecido problema de roteamento sobre arcos e possui uma história interessante. Ele foi examinado primeiramente pelo grande matemático e físico suíço Leonhard Euler em 1736. Em um de seus trabalhos EULER (1956) descreve um problema que enfrentou e que seria mais tarde chamado de Problema do Carteiro Chinês. Na cidade russa de Königsberg sobre o rio Pregel existem sete pontes (ver figura 3.1). O problema de Euler era traçar um roteiro para uma procissão para que esta passasse pelas sete pontes exatamente uma vez e retornasse à sua margem de origem. Muito tempo se passou, as pontes continuam lá, a cidade já mudou de nome duas vezes (passou a se chamar Kaliningrado e voltou a ser Königsberg) e o problema continua sem resposta porque não há solução, fato provado por Euler. Os importantes resultados derivados por Euler dessa experiência motivaram os pesquisadores em busca de uma abordagem para a solução do PCC. Mais tarde, o problema receberia este nome por aparecer pela primeira vez, como é conhecido hoje, no jornal Chinese Mathematics (MEI-KO 1962).

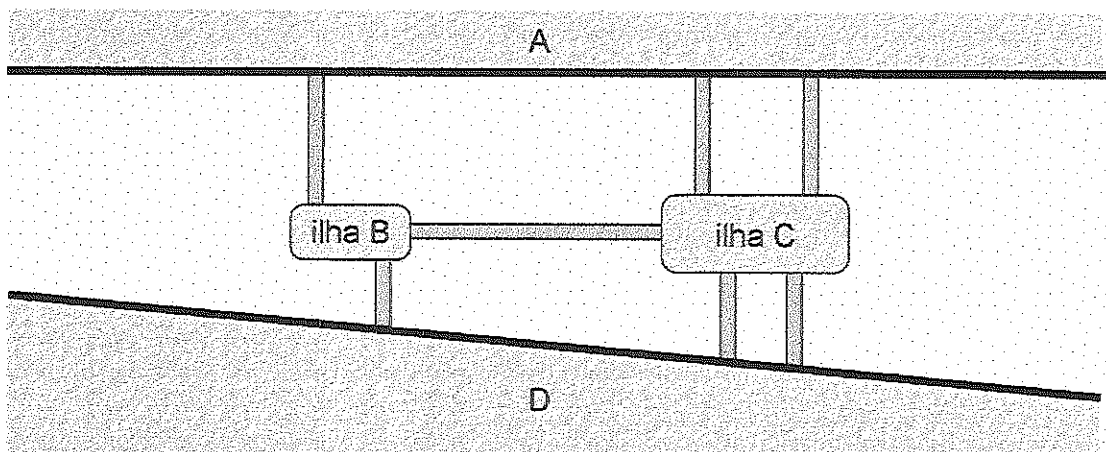
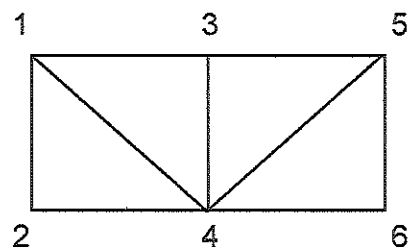


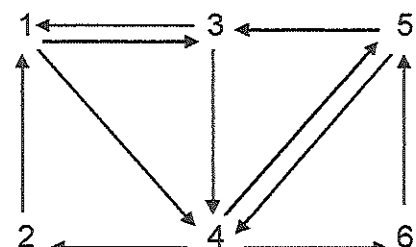
Figura 3.1: Representação das sete pontes em Königsberg

Seja a rede  $G=(N,A)$  onde  $N$  é o conjunto dos nós e  $A$ , o conjunto de arcos aos quais são associados os comprimentos conhecidos  $l(i,j) \geq 0$  para todos os arcos  $\in A$ , dependendo do contexto do problema,  $l(i,j)$  pode representar distância, tempo de viagem ou custos. O PCC requer que cada arco seja atravessado pelo menos uma vez minimizando algum fator associado aos arcos, começando e acabando no mesmo ponto.

Diversas variações do PCC foram estudadas, entre elas, o problema do carteiro chinês com restrição de capacidade, quando é considerada a capacidade do veículo e a demanda deve ser  $q_{ij} \geq 0$ . Há também os problemas em grafos não-orientados, orientados e mistos. Para os dois primeiros, algoritmos exatos foram desenvolvidos, já o último caso pertence à classe *NP-completo* e segundo os especialistas é provável que nunca se encontre um algoritmo exato para este problema. Um exemplo de rotas para o PCC em grafos não-orientados é dado a seguir na figura 3.2.



rede original



possível rota para o problema:

rota 1: nó 1, nó 4, nó 2, nó 1, nó 3, nó 4, nó 6, nó 5, nó 4, nó 5, nó 3, nó 1

Figura 3.2 :Problema do Carteiro Chinês

### 3.2.2 Problema do caixeiro viajante (PCV)

O PCV é o mais famoso problema de roteamento sobre nós. Trata-se de descrever um ciclo *Hamiltoniano*, nome dado pelo matemático irlandês William Rowan Hamilton em 1856, (LAWLER *et al.*, 1983) quando ele inventou o Jogo Icosiano. Neste jogo os seus vinte vértices representavam lugares importantes, (nós) pelos quais o jogador precisava traçar uma viagem. Já o nome do problema, surgido por volta de 1931-32, os autores não sabem ao certo quem introduziu nos círculos matemáticos.

Seja a rede  $G = (N, A, C)$  onde  $N$  forma o conjunto de nós;  $A$ , o conjunto de arcos e  $C = |c_{ij}|$ , a matriz relativa aos custos, onde  $c_{ij}$  é o custo para se ir do nó  $i$  ao nó  $j$ , o ciclo Hamiltoniano deve ser descrito sobre todos os pontos de  $G$  a um mínimo custo total. Algumas das variações deste problema surgem quando os custos de se viajar entre duas localidades é o mesmo independente da direção seguida, então diz-se que se trata do PCV simétrico caso contrário, tem-se um PCV assimétrico.

Este problema é NP-completo por isto muitas heurísticas foram desenvolvidas para resolver o caixeiro viajante. A seguir na figura 3.3 tem-se um conjunto de rotas factíveis para o PCV simétrico e para o PCV assimétrico, neste último caso deve-se notar que há um arco entrando e saindo de cada nó.

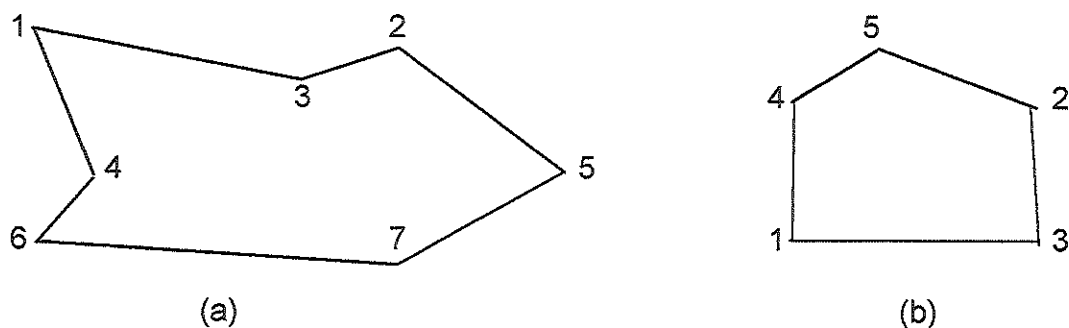
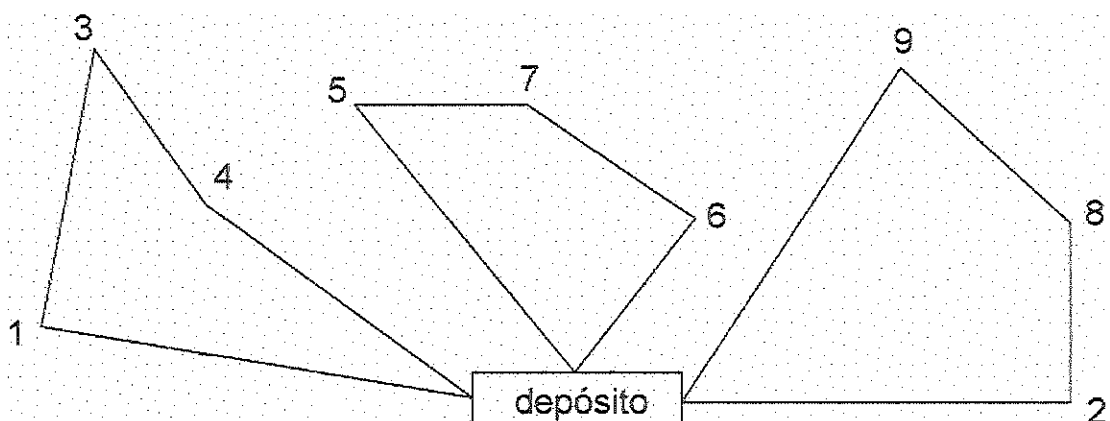


Figura 3.3: Problema do Caixeiro Viajante: (a) simétrico (b) assimétrico

### 3.2.3 Problema de roteamento de nós com um depósito e vários veículos

Este é o problema clássico de roteamento de veículos, ele é *NP*-completo e uma série de rotas para os veículos localizados no depósito central são criadas com o objetivo de servir todos os nós e minimizar a distância total viajada. A demanda de cada nó é considerada determinística e cada veículo tem uma capacidade conhecida. Os veículos idênticos entre si devem respeitar as suas possíveis restrições de capacidade e tempo de rodagem. Também devem sair e retornar ao mesmo depósito. Obviamente o problema descrito refere-se tanto a situações de coleta como de entrega (onde lê-se pontos de demanda leia-se também pontos de fornecimento). É considerado que as quantidades demandadas em cada ponto sejam transportadas inteiramente por um único veículo, isto é, não se pode transportar  $1/3$  da mercadoria e deixar os  $2/3$  restantes para uma próxima viagem.

No exemplo da figura 3.4, está ilustrado um conjunto de rotas factíveis, onde a capacidade de cada veículo é três e a demanda em cada nó é uma unidade.



*rota 1:* depósito, nó 1, nó 3, nó 4, depósito

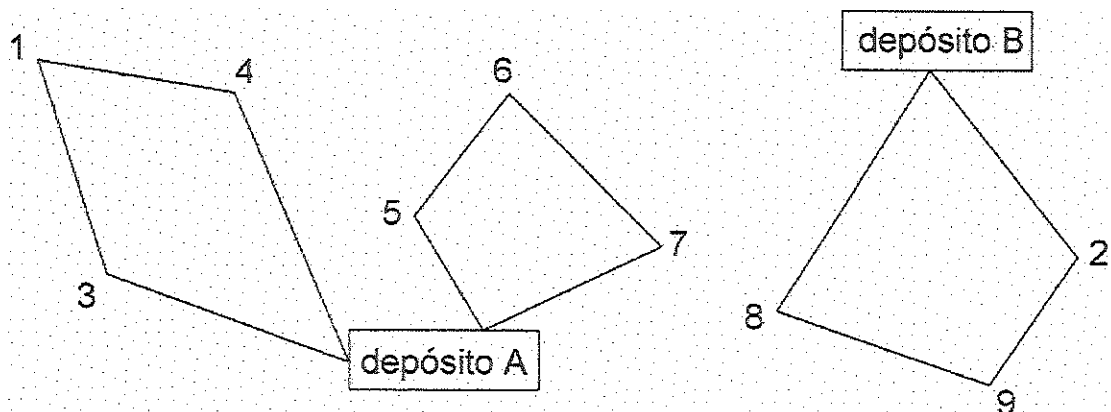
rota 2: depósito, nó 5, nó 7, nó 6, depósito

rota 3: depósito, nó 9, nó 8, nó 2, depósito

Figura 3.4: Problema clássico de roteamento de veículos

### 3.2.4 Problema de roteamento de nós com vários depósitos e veículos

Este é uma generalização do anterior com a diferença que a frota está localizada em vários depósitos. As restrições restantes do problema clássico de roteamento continuam se verificando aqui, inclusive a condição de que cada veículo deve sair do e retornar ao mesmo depósito. A seguir, considerando a capacidade dos veículos, três e a demandas nos nós unitárias, é apresentado um conjunto de configurações de rotas factíveis para resolver este problema na figura 3.5.



rota 1: depósito A, nó 3, nó 1, nó 4, depósito A

rota 2: depósito A, nó 5, nó 6, nó 7, depósito A

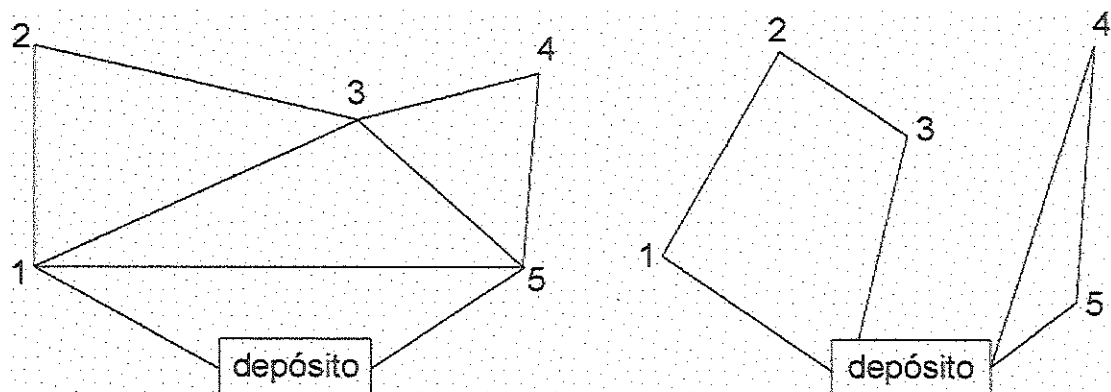
rota 3: depósito B, nó 2, nó 9, nó 8, depósito B

Figura 3.5: Problema de roteamento com vários depósitos

A existência de vários depósitos adiciona dificuldade de designação das demandas aos depósitos específicos. Este novo grau de liberdade aumenta a complexidade computacional do problema, que é NP-completo e as abordagens de resolução são baseadas em tratamentos heurísticos. Enquanto os problemas de depósito único foram amplamente estudados e documentados, os problemas referentes a múltiplos depósitos receberam menor atenção e são muito poucos os trabalhos publicados nesta área.

### 3.2.5 Problema de roteamento de arcos com restrição de capacidade

Neste problema a questão é designar rotas para a frota de veículos homogênea de capacidade  $W$  localizada no depósito único com o objetivo de percorrer os arcos da rede não-orientada, onde se localizam os pontos de demanda ou fornecimento, buscando a minimização da distância total. No exemplo da figura 3.6 abaixo, a demanda em cada arco é unitária e a capacidade do veículo é três.



rota 1: depósito, nó 1, nó 2, nó 3, depósito

rota 2: depósito, nó 4, nó 5, depósito

*Figura 3.6: Problema de roteamento de arcos com restrição de capacidade*

### 3.2.6 Problema de roteamento de nós com demanda estocástica com um depósito e vários veículos

Este problema é uma generalização do problema determinístico clássico de roteamento com a diferença de que as demandas neste advêm de uma distribuição probabilística específica. Por exemplo, pode ser que o nó  $i$  apresente uma demanda descrita pela distribuição de Poisson com média  $\mu$ . Assim este requer algumas modificações:

- . a demanda dos clientes é uma variável aleatória com uma distribuição de probabilidade conhecida;
- . as rotas devem ser projetadas antes que a demanda real se torne conhecida;
- . o objetivo é minimizar a distância percorrida esperada, mas outros custos devem ser incorporados se alguns clientes não puderem ser atendidos numa dada viagem.

A presença de não-linearidade nas restrições e/ou na função-objetivo ocasionadas pela demanda probabilística tornam este problema mais difícil de se resolver e por isto, só métodos de solução heurísticas foram desenvolvidos para este. Também neste caso, há pouca pesquisa conduzida o que torna o assunto um tanto árido. Algumas destas pesquisas concentram-se na transformação do problema de roteamento estocástico num problema determinístico para poder se aplicar as técnicas associadas à resolução do último. Nesta transformação é criada uma capacidade artificial para os veículos menor que a real e o roteamento é executado considerando demandas artificiais como sendo a média das demandas dos clientes. Procede-se ao preenchimento dos veículos até que seja completada a capacidade artificial assumida. Um grande salto para pesquisas logísticas futuras seria a incorporação e representação adequadas de componentes estocásticos. DASKIN (1985) observa que há também a necessidade de se medir o impacto e propagação dos erros de previsão nos modelos.



### 3.2.7 Problema do carteiro rural

O problema do carteiro rural é uma generalização do problema do carteiro chinês. Neste somente um conjunto de arcos de um dado grafo precisam ser visitados a um mínimo custo. Geralmente estes arcos não formam uma rede conectada, situação que ocorre em áreas rurais (daí seu nome) ou subúrbios. O problema se subdivide ainda em carteiro rural direcionado pesquisado por CHRISTOFIDES *et al.* (1986) e não-direcionado por PEARN & WU (1995), ambos NP-completos.

### 3.2.8 Problema do carteiro no vento

MINIEKA (1979) foi quem primeiro analisou este interessante problema onde os custos de ir do nó  $j$  ao nó  $i$  é diferente dos custos de se percorrer do nó  $i$  ao nó  $j$ .

Mais recentemente o problema ganhou mais atenção com PEARN & LI (1994). Este problema também é uma generalização do PCC. Nele, os arcos da rede podem ser atravessados em ambas direções, porém com distâncias diferentes. Esta situação ocorre quando uma direção é descida (a favor do vento) e a outra é subida (contra o vento) ou quando há pedágios (ou outros custos) numa direção e na outra não. O problema é NP-completo pode ser transformado num PCC misto e ser resolvido via algum procedimento para este último.

Foram descritos acima alguns problemas clássicos de roteamento de veículos retirados da literatura e que já tiveram aplicação na solução de problemas reais. Porém é infundável a gama de problemas que resultam da combinação de parâmetros associados à descrição de tais problemas dependendo de cada situação.

O passo que norteia o problema em direção à solução de um problema de roteamento tenta identificar, entre as várias existentes, a estratégia de solução mais adequada ao problema que se analisa.

### ***3.3 Estratégias de solução***

Nesta seção serão introduzidas as classes de abordagens, onde segundo BODIN & GOLDEN (1981), se enquadram as estratégias de solução para os problemas de roteamento básicos.

Serão apresentadas maneiras diferentes de abordar o problema que quando comparadas entre si serão capazes de fornecer subsídios para se optar pela estratégia de solução mais adequada para o problema de roteamento em mãos.

#### **3.3.1 Dividir- Rotear**

Os algoritmos que se enquadram nesta classe de abordagem, num primeiro estágio dividem a rede em  $m$  regiões (igual ao número de veículos da frota) e então resolvem um problema de roteamento de veículo único sobre cada região recém-particionada da rede, ou seja ela resolve  $m$  problemas de roteamento com um único veículo. Esta classe de abordagem é a mais utilizada, porém se o número  $m$  de veículos não é especificado em avanço, a partição da região total é feita subjetivamente, o que faz variar o valor da solução final. Os algoritmos empregados para resolver o PCC e suas variações usam as estratégias de solução que empregam esta classe de abordagem do problema.

BODIN & KURSH (1978) utilizaram-se desta abordagem para designar rotas para as vassouras mecânicas que fazem parte do trabalho de limpeza na cidade de Nova Iorque e Washington D.C. Isto é, a região total a ser servida foi dividida em distritos depois à cada uma destas foi confeccionada uma rota. Este procedimento abrandava a dificuldade de se trabalhar com problemas de rotas múltiplas; se cada região for tratada como

única haverá um problema de rota única que será bem mais fácil de se resolver.

### 3.3.2 Rotear - Dividir

Os algoritmos que empregam esta classe de abordagem trabalham na sequência inversa da anterior. Primeiro, formam uma rota 'gigante' geralmente infactível ignorando as restrições de capacidade e de extensão de rota e depois dividem esta rota gigante em rotas menores onde reconsideram as restrições ignoradas. Esta é outra classe de abordagem na qual os algoritmos que resolvem o PCC e suas variações se enquadram.

No trabalho de STERN & DROR (1979) para rotear os medidores de energia elétrica, o limite máximo de tempo de tempo de serviço é ignorado e um único circuito é projetado cobrindo os arcos a serem atravessados. Num segundo estágio, este circuito é particionado em segmentos onde restringe-se o tempo máximo de horário de trabalho por pessoa por dia, 'quebrando' a rota gigante e originando rotas exequíveis.

BODIN & KURSH (1979) apontam uma limitação do método, uma vez que, criam-se sobreposições de rotas que aumentam o tempo ou a distância totais. Por isso, PANDIT & MURALIDHARAN (1995) optaram por usar a abordagem dividir-rotar no seu trabalho sobre roteamento geral de veículos (que cobre nós e arcos) em redes mistas.

Esta última abordagem tende a minimizar o número de veículos necessários para cobrir certa região, enquanto a primeira especifica esta quantidade em avanço. O *trade-off* entre as duas abordagens apresentadas é o custo de veículos extras (se os fixados de antemão não forem suficientes), para servir uma dada área usando as técnicas que empregam a abordagem *Dividir-Rotear*, versus os custos adicionais a serem criados com a intersecção e sobreposição de rotas se for utilizada as técnicas que empregam a abordagem *Rotear-Dividir*. Escolher entre as duas abordagens dependerá da eficiência dos algoritmos e ferramentas analíticas que se dispõe e das aplicações a que se destinam.

### 3.3.3 Ganhos (ou algoritmos construtivos)

Estes procedimentos constroem uma solução de modo que à cada passo do algoritmo (até e inclusive no penúltimo passo) a configuração corrente provavelmente infactível é comparada com uma configuração alternativa que pode ser infactível também. A configuração infactível alternativa é aquela que fornece os maiores 'ganhos' com relação à alguma função, como custo total ou aquela que insere uma entidade de demanda ainda não incluída na configuração corrente ao menor custo. O procedimento cessa fornecendo uma configuração factível de rotas. Esta classe de abordagem é utilizada para resolver o problema de roteamento clássico e suas variações com respeito a restrições de capacidade e o número de depósitos, já apresentados.

CLARKE & WRIGHT (1964) são responsáveis pelo desenvolvimento da solução heurística mais popular dentro da estratégia de ganhos. À cada passo do algoritmo, um conjunto de rotas é 'trocado' por outro melhor. Inicialmente se supõe que cada dois nós  $i$  e  $j$  são supridos individualmente por dois veículos. Agora em vez de dois veículos, se só um fosse usado, então haveria um ganho nas distâncias totais percorridas igual a  $(2d_{1i} + 2d_{1j}) - (d_{1i} + d_{1j} + d_{ij}) = d_{1i} + d_{1j} - d_{ij}$ . Para cada possível par de nós, haverá um 'ganho' correspondente. Estes deverão ser ordenados de forma decrescente e começando do topo desta lista, deve-se ir unindo os nós  $i$  e  $j$  enquanto as restrições forem respeitadas. Deve-se reiniciar o procedimento até que todos os nós com demanda tenham sido inclusos nas rotas.

### 3.3.4 Inserção

Esta classe de abordagem engloba as técnicas que resolvem o problema clássico de roteamento de veículos e suas variações apresentadas.

GOLDEN & WONG (1981) apresentam um algoritmo para o problema de cobertura de arco que se enquadra nesta classe de abordagem. Este

problema envolve situações realistas, levando em consideração a restrição de capacidade do veículo. Este algoritmo é bastante simples e lógico; num primeiro passo, todas as demandas dos arcos são servidas em circuitos separados, depois começando pelo maior ciclo disponível, verificar se os arcos demandados de ciclos menores podem ser servidos por estes, num terceiro passo, fundir dois ciclos que garantam maior economia observando as restrições de capacidade. Os problemas que podem ser resolvidos via este algoritmo incluem: coleta de lixo, entregadores de gás, medidores de consumo de energia elétrica etc.

GOLDEN *et al.* (1983) propuseram no terceiro passo do algoritmo apresentado por GOLDEN & WONG (1981), que se escolha aleatoriamente uma das três melhores uniões, em vez de se optar pela melhor, com isto alguma variabilidade foi introduzida no algoritmo, porém esta abordagem do problema que também emprega a estratégia de *inserção* não melhora muito o original. Só uma tentativa entre as seiscentas tentadas, melhorou a solução obtida. Isto é, assim que a probabilidade diminui a ênfase na melhor união, a qualidade da solução rapidamente declina.

### 3.3.5 Melhorias

Os algoritmos que empregam esta classe de abordagem como estratégia de solução, geralmente a cada passo alteram a solução viável obtida por outra melhor e à base de trocas, vão buscando a otimalidade através destas melhorias. Os algoritmos empregados para resolver o PCV e o problema de roteamento clássico e suas variações empregam as estratégias de solução pertencentes à esta classe de abordagem.

BELTRAMI & BODIN (1974) descrevem como adaptaram o método de CLARKE & WRIGHT (1964) para rotear a coleta de lixo em Nova Iorque. O original, considerava só um depósito central, diferente do que os autores enfrentavam na cidade. Eles designaram cada ponto de coleta à lixeira mais próxima (grandes locais onde a população tem que depositar o lixo para ser coletado, diferentemente daqui onde basta deixar o lixo na porta de casa). O

ganho de se combinar dois pontos designados à mesma lixeira é calculado como antes, porém, o ganho conseguido através da combinação de pontos de coleta designados para duas lixeiras diferentes será dado por:

$$S_{ij} = T_{oi} + T_{1j} - T_{ij} \quad \text{onde:}$$

$T_{oi}$  é o tempo para se ir da lixeira  $o$  ao ponto de coleta  $i$ ;

$T_{1j}$  é o tempo para se ir da lixeira  $1$  ao ponto de coleta  $j$ ;

$T_{ij}$  é o tempo para se ir de  $i$  a  $j$ .

A geração de rotas por si só não resolvia o problema dos autores. Alguns lugares eram servidos às segundas, quartas e sextas, outros, às terças, quintas e sábados e outros, ainda requeriam coleta em seis dias da semana. O problema era, qual lugar designar a quais dias da semana.

Numa primeira abordagem os autores usaram o método 'Clarke and Wright' para gerar rotas, eles fizeram todos os nós que precisavam do serviço seis vezes por semana aparecer duas vezes na rede. Na hora de formar as rotas porém, tais lugares foram proibidos de aparecer na mesma rota, o que os forçou a aparecer em duas rotas diferentes em dias também diferentes da semana. Se existirem  $k$  pontos que devem ser servidos seis vezes por semana na rede original de  $n$  vértices, então a rede com estas imagens duplicadas consistirá de  $n + k$  pontos. Neste algoritmo, às vezes é possível unir o ponto  $i + n$  (a imagem do ponto  $i$ ) com o ponto  $j$  mesmo quando  $i$  não pode se unir a  $j$  (por causa das sub-rotas que os pontos  $i$  e  $j$  estão). Completada esta parte do algoritmo, tem-se um conjunto de rotas que não estão designadas a nenhum dia da semana. Foram designadas rotas aleatoriamente para as segundas, quartas e sextas ou terças, quintas e sábados e sobre estes pontos foi aplicado o método 'Clarke and Wright'. Tal procedimento foi repetido várias vezes e a melhor solução gerada à partir das trocas efetuadas foi escolhida.

Nesta classe de abordagem incluem-se os algoritmos melhorativos modernos *Busca Tabu* e *Simulated Annealing*; estes procedimentos heurísticos buscam as possíveis soluções dentro de um conjunto,

denominado *vizinhança*, onde é permitido à função-objetivo, deteriorar-se em nome da busca pelo ótimo global da função evitando com que a resposta fique presa à um mínimo local.

### 3.3.6 Programação Matemática

Esta abordagem requer algoritmos que sejam diretamente baseados em formulação de programação matemática do problema em questão. Esta classe de abordagem engloba as estratégias de solução do PCV e suas variações, na maioria formulações de programação inteira. A programação inteira é baseada em técnicas *branch and bound* ou *relaxação lagrangeana* aplicada sobre a rota inicial. E segundo ASSAD (1988) as estruturas de programação matemática que provaram ter maior êxito nas suas aplicações foram aquelas baseadas em *Generalized Assignment Method* e as formulações *Set Partitioning*.

A primeira é uma técnica poderosa quando os aspectos de descarga são importantes e podem incorporar restrições realistas referente ao tipo de veículo, à rota e aos clientes. Esta técnica também fornece um esquema geral para designar padrões de entrega ou frequência de clientes em problemas mais complicados como de alocação de recursos.

As abordagens de partição de conjuntos são mais úteis quando o número de rotas candidatas pode ser limitado por restrições impostas às rotas ( como janelas de tempo hard, duração limite da rota, limites de capacidade etc..) o que implica na prática em rotas com poucas paradas.

### 3.3.7 Otimização Interativa

Trata-se de uma abordagem de propósito geral, na qual, um alto grau de interação humana é incorporado ao processo de resolução. Sua idéia é que o experiente gerente de distribuição (ou equivalente) deve ter a capacidade de fixar os parâmetros e injetar uma dose de subjetividade baseada no conhecimento e intuição para dentro do modelo. Isto, quase

sempre aumenta a probabilidade de que o modelo será implementado e usado.

Esta classe de abordagem enquadram as técnicas que resolvem o problema de roteamento de veículos com demandas estocásticas. As abordagens para a solução deste complexo problema empregam o dimensionamento de um estoque de segurança e abordagens em função de penalidades em caso do não-atendimento de um cliente.

### **3.3.8 Técnicas Exatas**

Segundo LAPORTE (1992) as estratégias de solução desta classe de abordagem podem ser incluídas em três categorias; programação dinâmica, programação linear inteira e métodos *branch and bound*. Esta classe enquadra estratégias de solução para o PCV, o problema clássico de roteamento as variações de ambos. Porém como assinalaram BODIN *et al.*(1983), tais estratégias só são viáveis para resolver problemas muito pequenos; eles apontam que o maior problema de roteamento de veículos já resolvido otimamente possuía 25 clientes (nós).

### **3.3.9 Algoritmos de duas fases**

Algoritmos de duas fases utilizam algoritmos de construção de rotas para achar uma rota inicial e depois aplicam procedimentos de melhoria sobre estes. São estratégias usadas para resolver o PCV e suas variações.

Um exemplo de aplicação desta abordagem, pode ser encontrado no *algoritmo sweep* nome dado por GILLET & MILLER (1974) ao trabalho originado com WREN (1971) e WREN & HOLLIDAY (1972) *apud* LAPORTE (1992). Neste os autores introduzem um algoritmo eficiente que constrói a solução para mais de 250 nós. São calculadas as coordenadas polares para cada ponto de demanda, é selecionado um nó 'semente' aleatoriamente, tendo o depósito central como pivô, começa-se a 'varrer' (em sentido horário ou anti-horário) o raio a partir do depósito central até o nó semente. As



demandas dos nós vão sendo somadas às rotas à medida que são 'varridas'. As coordenadas polares dos nós devem ser ordenadas da menor para a maior sendo atribuído ângulo zero ao nó semente. As rotas irão aumentando até que a capacidade do veículo restrinja a entrada de um novo nó à rota corrente. Este nó que não foi incluído na rota, se tornará o nó-semente da próxima rota. Nada impede que se varie o nó-semente e se selecione a melhor solução.

Esta classificação visa fornecer linhas gerais a serem seguidas; de maneira geral a maioria das estratégias resolvem o PCV e o problema de roteamento básico com suas respectivas variantes e as abordagens mais adequadas à resolução do roteamento sobre arcos são as Dividir-Rotear e Rotear-Dividir. Estas estratégias são indicadas também para problemas mais complexos. Problemas mais clássicos e simples geralmente alcançam boas soluções com as técnicas matemáticas.

Esta também tem como objetivo agrupar as estratégias existentes em classes de abordagens visando facilitar a sua compreensão, porém não há um padrão único estabelecido pelos autores. A estratégia das duas fases, por exemplo, classifica como algoritmo de duas fases o trabalho de GILLET & MILLER (1974), porém este pode estar inserido também na classe de abordagem Dividir-Rotear, à medida que numa primeira fase divide a região e numa segunda, gera rotas. Nota-se portanto, que não há limites rígidos a serem seguidos quanto à classificação de alguma estratégia de solução. O mais importante é saber das várias opções de abordagem do problema que quer classificar tal abordagem.

É importante salientar a existência de problemas muito semelhantes à primeira vista que requerem estratégias distintas de resolução. Para identificar a técnica mais adequada é necessário um estudo mais detalhado do problema.

## 4. SISTEMAS DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS

Com certeza a mudança mais expressiva nos últimos 20 anos nos sistemas de roteamento de veículos foi o ambiente computacional no qual os algoritmos estavam sendo implementados. Para BODIN (1990), a introdução do microcomputador foi o maior catalisador nos processos de sistematização de roteamento de veículos, possibilitando a grande vantagem da visualização gráfica das rotas em seus monitores.

Neste capítulo serão apresentadas quatro abordagens sobre sistemas de roteamento de veículos. Na primeira abordagem serão apresentados os principais softwares comerciais de roteamento disponíveis no mercado, nos quais a saída fornecida são os roteiros a serem cumpridos. Numa segunda abordagem do tema será discutida a viabilidade de programas de roteamento customizados, que visam o desenvolvimento de sistemas 'sob medida' para empresas específicas. E numa terceira abordagem serão introduzidos os *GIS*, sigla em inglês, pela qual ficaram conhecidos estes poderosos sistemas de informação geográfica capaz de definir toda a topologia do local com muita acuracidade.

### ***4.1 Pacotes comerciais para roteamento de veículos***

Nos últimos anos o microcomputador tem desempenhado um papel crucial nas atividades de roteamento e programação de veículos devido à quantidade de tempo que se gastaria se esta tarefa fosse legada a programadores manuais. Em vista disto, têm surgido no mercado os muitos pacotes comerciais de roteamento de veículos. Eles oferecem uma grande variedade de características que estão, na sua maioria, voltadas à distribuição de bens. Isto é, a maior parte dos pacotes resolvem a versão do problema clássico de roteamento de veículos, ou seja, só faz entregas (ou só coletas) com uma variedade de restrições. Poucos pacotes resolvem o

problema de entregas e coletas e só o fazem em tempo não-real. Um único pacote o resolve em tempo real com janelas de tempo.

Abaixo estão relacionadas por ASSAD (1988) as principais variáveis com as quais os pacotes de roteamento operam:

**a) Características:**

- . veículos de diferentes tipos;
- . coletas ou entregas com opção de volta carregada;
- . janelas de tempo;
- . tempos para carga e descarga;
- . variações de velocidade;

**b) Informação sobre a rota:**

- . capacidade e duração das viagens;
- . uso de horas-extras;
- . horários de início e fim das atividades;
- . paradas fixas;
- . multiplicidade de veículos e rotas.

**c) Objetivos:**

- . minimizar as distâncias;
- . minimizar o tempo de viagem;
- . minimizar o número de veículos;
- . minimizar o custo total.

**d) Saídas:**

- . itinerário de rota e programação;
- . relatório sobre a utilização do veículo;
- . relatório sobre a utilização dos motoristas;
- . gráficos com as rotas;
- . rede de estradas;
- . combinação de endereços.

A maioria das firmas que desenvolvem pacotes não estão interessadas em customizar pacotes, pois, não possuem ou não podem pagar pelos recursos extras para que funcionalidades de propósitos especiais sejam acrescentadas aos sistemas de certas firmas, a menos que as firmas se responsabilizem por estes gastos extras. Quando um problema não se encaixa nos moldes do problema modelo, um especialista no assunto deve modelá-lo para avaliar se um sistema totalmente customizado será necessário ou se o problema real pode ainda ser modificado ou decomposto para que algum software comercial disponível possa ser utilizado. GOLDEN *et al.* (1986) analisaram os treze pacotes comerciais abaixo:

#### **Categorização dos pacotes**

##### ***a) Pacotes do caixeiro viajante:***

ROUTEMASTER;

ROUTEPLANNER.

##### ***b) Pacotes econômicos de roteamento de veículos:***

DSS;

FLEET-ROUTER;

MICRO VEH PLAN;

ROUTER;

TRUCKSTOPS.

##### ***c) Pacotes caros de roteamento de veículos:***

CADS;  
DISPATCH-CONTROL;  
E-Z ROUTER;  
PARAGON;  
ROADNET;  
ROUTEASSIST

O ROUTEMASTER e o ROUTEPLANNER são bastante baratos, porém só resolvem o problema do caixeiro viajante e não problemas mais gerais de roteamento. Por isso não serão discutidos em detalhes. O primeiro resolve pequenos problemas através de um procedimento ótimo. O segundo pode resolver problemas maiores, porém empregando uma heurística.

O CADS (Computed Aided Dispatch System) é destinado para o roteamento de veículos para a coleta de resíduos sólidos. Ele só considera veículos de capacidade única e faz a programação dos veículos que carregam grandes cargas de lixo vindos de construções e *shoppings* até o aterro e depois retorna ao depósito. O sistema também permite múltiplos pontos de coleta. Seus tempos de viagem são baseados na rede, possui ajuste para criar rotas em tempo real, possibilita intervenção manual e no monitor é possível visualizar as rotas e um texto sobre o itinerário.

O DISPATCH-CONTROL resolve problemas de roteamento em tempo real. Neste tipo de problema, certos clientes que necessitam de uma entrega ou de uma coleta são conhecidos na noite anterior ao serviço. São então desenvolvidas rotas em avanço ao dia das atividades. No dia seguinte, os outros clientes que demandam pelo serviço naquele dia, são somados às rotas existentes ou novas rotas são criadas para atender tais clientes. Os tempos das viagens são baseados em códigos da rede e são bastante confiáveis. O sistema tem uma exibição gráfica de qualidade e é altamente interativo, pois é disponível *mouse*. São disponíveis janelas de tempo *soft* e sempre é permitida a intervenção manual.

Os nove pacotes restantes analisados por GOLDEN (1986) serão comparados em conjunto, mantendo-se o foco nas características-chave dos problemas de roteamento e programação de veículos. Nestes programas as demandas são assumidas estáticas, isto é, previamente conhecidas e as capacidades dos veículos devem ser idênticas. Em oito destes, se assume-se que as rotas começam e acabam no mesmo depósito. Podem ser criadas, então, sequências de rotas de veículos para um único depósito onde trocar a ordem dos clientes pode ser uma tarefa desastrosa, senão impossível. A exceção é do DSS (Distribution Scheduling System) que possui capacidade para trabalhar com vários depósitos.

Uma síntese das principais características dos pacotes citados acima, serão agrupadas na forma de uma tabela no final desta seção.

**a) Disquetes demonstrativos:**

Os disquetes demonstrativos são valiosos para os usuários com interesse em conhecer as capacidades do sistema antes de adquiri-lo. Geralmente custam menos que \$100 e revelam as capacidades do sistema sem que se tenha que comprar o programa de fato. Dos sistemas citados, só o DSS, o FLEET-ROUTER e o TRUCKSTOPS dispõem destes demonstrativos.

**b) Janelas de tempo:**

Com relação as janelas de tempos, o FLEET-ROUTER e o ROUTER não as possuem, enquanto os DSS, E-Z ROUTER, MICRO VEH PLAN, PARAGON, ROUTEASSIST e o TRUCKSTOPS trabalham com janelas de tempo *hard* e o ROADNET opera com janelas *soft*.

**c) Volta carregada:**

O FLEET-ROUTER, o ROADNET e o ROUTER não possuem capacidade para operar com a opção da volta carregada, enquanto os seis restantes operam com voltas únicas ou múltiplas. O problema de entrega e coleta gerais, onde um cliente ou pacote é coletado por um veículo num local

específico e entregue num segundo local (diferente do depósito) pelo mesmo veículo são ainda tratados pelos PARAGON e pelo MICRO VEH PLAN em tempos não-reais.

***d) Múltiplas rotas por dia:***

Todos os programas têm o mesmo tipo de procedimento que permite um veículo fazer mais de uma viagem por dia, quando estas forem curtas o suficiente para sair e voltar ao depósito para recarregar.

***e) Viagens longas:***

A circulação entre cidades, geralmente força os veículos a rodar por mais de um dia. Neste caso devem ser invocadas regras especiais na formação da rota que tornam o problema muito complexo. Dos programas estudados, o FLEET-ROUTER, ROADNET e ROUTER não operam viagens de mais de um dia e os restantes sim.

***f) Horários de início e término para as rotas:***

Alguns dos programas requerem que todos os veículos devam começar e acabar na mesma hora. Outros permitem diferentes especificações de horário de início e final para as rotas de cada um dos veículos, o que os torna mais realistas. Só o FLEET-ROUTER e o ROUTER pertencem ao primeiro grupo.

***g) Tempos de viagens:***

Os tempos de viagens baseados em redes oferecem mais precisão, porém, requerem mais investimento de tempo e dinheiro. É o caso dos E-Z ROUTER, PARAGON e ROADNET. Todos os nove sistemas permitem distâncias Euclidianas ou retilíneas. O TRUCKSTOPS e o FLEET-ROUTER incorporam diferentes zonas de velocidade e podem avisar aos usuários a indicação de barreiras naturais usando coordenadas  $(x,y)$ .

#### ***h) Análises pós-resultados:***

Os sistemas DSS, PARAGON e o ROUTER não possuem a alternativa da intervenção manual para efetuar ajustes nas rotas criadas. Já o ROADNET, permite trocas de clientes e alocações destes dentro das rotas e entre elas. Nos outros programas, o analista pode trocar um cliente por vez.

#### ***i) Capacidade Gráfica:***

Uma das vantagens dos micros é a possibilidade de se criar capacidades gráficas de qualidade sem aumentar seu custo. Os sistemas FLEET-ROUTER, ROADNET e o ROUTEASSIST têm algumas capacidades gráficas, já os outros seis não oferecem muito nesta área. Em particular, o ROADNET possui uma capacidade gráfica muito boa.

Os autores observam que um estudo desta natureza é difícil de realizar por causa das constantes atualizações pelas quais passam os sistemas, que por sua vez não param de se multiplicar. E infelizmente, publicações desta natureza são um tanto escassas e às vezes de difícil acesso.

Segundo ASSAD (1988) tanto histórias de sucesso quanto de fracassos são documentadas, mas o processo de implementação quase nunca é revelado devido à falta de tempo ou incentivos e por causa dos direitos de propriedade. Ele afirma ainda que os trabalhos na área de pacotes comerciais que alcançarem grande êxito continuarão impúblicáveis ou pelo menos, velados, como qualquer tema da P.O. que atinge o potencial para mercado. Disso, podem resultar duas culturas; uma acadêmica e outra comercial, uma situação que tende a impedir a troca de experiências, fato que para o autor é compensado através das suas aplicações.

De acordo com especialistas, a tendência é de uma explosão destes pacotes, e aqueles com maior chance de sobreviver são os que competirem em preço, capacidade de memória, interface amigável e base de dados



geográfica. Já seus preços tendem a diminuir face a crescente oferta anunciada.

A grande oferta anunciada vai de encontro à crescente demanda por parte das companhias que passaram a utilizar estes sistemas de roteamento de veículos como parte da estratégia logística, criando impactos nas suas performances através da lucratividade proporcionada e do serviço ao cliente.

A seguir, dois estudos recentes da utilização de pacotes comerciais de roteamento de veículos provam que, entre as aplicações práticas de tais sistemas, há tanto histórias de fracasso como outras de surpreendente sucesso.

Exemplos de sucesso foram alcançados mesmo em países do Terceiro Mundo como o Brasil. O número crescente de empresas utilizando os pacotes comerciais para o roteamento de suas frotas tem apontado aumento de produtividade e redução dos custos de distribuição. A oferta de pacotes comerciais para tais empresas inclui, entre os importados já apresentados acima, um representante da tecnologia nacional ainda pouco conhecido, o ROTACERTA.

Esse software nasceu de uma pesquisa acadêmica desenvolvida na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; apesar de poucas cópias vendidas, ele já possui a enorme vantagem de ser em português, além de poder ser customizado pelo fabricante atendendo de pronto as necessidades dos clientes, o que garante mais flexibilidade ao sistema.

Segundo LOPEZ (1996), os três softwares mais utilizados no Brasil são o ROADSHOW, o TRUCKS e o TRUCKSTOPS, pacotes usados pela Perdigão, Fuller e Transportadora Americana respectivamente. As três empresas afirmam que a implantação dos pacotes de roteamento aumentou a eficiência da frota em até 30%, possibilitando uma distribuição mais racional de carga sem sobrecarregar o motorista e permitindo uma melhor manutenção do veículo, sem contar a pontualidade e a confiança do cliente. Os gerentes de distribuição ressaltam, entretanto, que nenhum pacote

comercial consegue evitar o atraso de descarregamento por parte do cliente e os congestionamentos repentinos.

Nas tabelas 4.1 e 4.2 a seguir estão resumidas algumas características destes e de outros pacotes incluindo o ROTACERTA.

Em outro estudo realizado por CANEN & SCOTT (1995) em cinco empresas na Escócia que tentaram implantar programas de roteamento, ficou evidente a importância do departamento de Pesquisa Operacional para o sucesso da empreitada.

Das cinco organizações estudadas, só uma obteve êxito na implementação de um pacote comercial, e a principal diferença desta para as outras foi o envolvimento ativo do departamento de P.O. desde o projeto até a sua implementação. Nas outras empresas, os softwares foram comprados e instalados sem o acompanhamento dos analistas que o desenvolveram. Na organização onde a implementação funcionou o analista estava à disposição para trabalhar junto à empresa-cliente e modificá-lo quando necessário. Comparando estes dois tipos de tentativa fica mais uma vez óbvio que é necessário que o analista desenvolva o software junto a seus clientes.

Mesmo nas organizações onde os pacotes comerciais falharam, a tecnologia da informação é amplamente utilizada no processo de roteamento. Portanto o software não precisaria ser sofisticado, isto é, estas organizações podem optar pelo desenvolvimento de 'softwares caseiros', com os algoritmos disponíveis.

| Pacotes     | Preços     | Demanda  | Número de depósitos | Oferece disquete | Janelas de tempo | Volta com carga | Executa múltiplas rotas | Tempos de início e chegada | Base dos tempos de viagens | Permite intervenção manual | Capacidade gráfica do sistema | Tempos coletas e entregas |
|-------------|------------|----------|---------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| DSS         | \$ 750     | estática | vários              | sim              | hard             | sim             | sim                     | diferentes                 | Eucl./ret.                 | não                        | ruim                          | -                         |
| F.ROUTER    | \$ 985     | estática | único               | sim              | -                | não             | sim                     | iguais                     | Eucl./ret.                 | uma                        | boa                           | -                         |
| M.V.PLAN    | \$ 2 000   | estática | único               | não              | hard             | sim             | sim                     | diferentes                 | Eucl./ret.                 | uma                        | ruim                          | não real                  |
| ROUTER      | -          | estática | único               | sim              | -                | não             | sim                     | iguais                     | Eucl./ret.                 | não                        | ruim                          | -                         |
| TRUCKSTOPS  | \$ 895     | estática | único               | não              | hard             | sim             | sim                     | diferentes                 | Eucl./ret.                 | uma                        | ruim                          | -                         |
| E-Z ROUTER  | \$ 40 000  | estática | único               | não              | hard             | sim             | sim                     | diferentes                 | Eucl./ret./rede            | uma                        | ruim                          | -                         |
| PARAGON     | \$ 60 000  | estática | único               | não              | hard             | sim             | sim                     | diferentes                 | Eucl./ret./rede            | não                        | ruim                          | não real                  |
| ROADNET     | \$ 20 000  | estática | único               | não              | soft             | não             | sim                     | diferentes                 | Eucl./ret./rede            | sim                        | ótima                         | -                         |
| ROUTEASSIST | \$ 10 000  | estática | único               | não              | hard             | sim             | sim                     | diferentes                 | Eucl./ret./rede            | uma                        | boa                           | -                         |
| CADS        | \$ 50 000  | dinâmica | vários              | não              | -                | sim             | sim                     | diferentes                 | Eucl./ret./rede            | sim                        | boa                           | tempo real                |
| D. CONTROL  | \$ 145 000 | dinâmica | vários              | não              | soft             | sim             | sim                     | diferentes                 | Eucl./ret./rede            | sim                        | boa                           | tempo real                |

TABELA 4.1 Os principais pacotes comerciais de roteamento ( GOLDEN et al, 1986)

| Pacotes    | Preços  | Sistema de localização dos clientes  | Ambiente Operacional  | Próxima versão   | Cópias atuais no Brasil      | Comercializado no Brasil |
|------------|---|--|---|--|------------------------------|--------------------------|
| ROADSHOW   | de \$ 52.000 a \$ 130.000 dependendo do número de veículos incluindo 12 dias de treinamento     | malha viária construída sobre mapa scanneado   | DOS com comandos em inglês e help em português                    | Windows 95 totalmente em português, trabalho simultâneo com quatro mapas de escala diferente | 40 instaladas e 270 vendidas | desde 1993               |
| TRUCKS     | \$ 40.000 incluindo 2 dias de treinamento básico mais \$ 45.000 de treinamento opcional e mapas | malha viária construída sobre mapa digitalizado  | DOS com comandos em inglês e manual em português, roda no Windows | Help em português e possibilidade de multiusuários. Totalmente em Windows e em português     | 50 instaladas                | desde 1987               |
| TRUCKSTOPS | \$ 15.000 incluindo treinamento básico de 16 horas mais \$ 6.000 a \$ 8.000 com opcionais       | sistema de coordenadas (x,y) que pode ser sobreposto a um mapa digitalizado  | DOS em português  | Windows em português   | 70 instaladas                | desde 1992               |
| ROTACERTA  | \$ 8.000 mais \$ 2.000 de treinamento básico de 20 horas mais o custo extra da customização     | sistema de coordenadas (x,y) que pode ser sobreposto a mapa digitalizado, com endereçamento automático de clientes | DOS totalmente em português                                       | sem previsão   | 2 instaladas                 | desde 1993               |
| TRANSCAD   | \$ 15.000 mais \$ 2.000 de treinamento básico de 20 horas mais o custo dos mapas digitalizados  | localização automática em mapa digitalizado  | Windows, totalmente em inglês                                     | sem previsão   | 19 instaladas                | desde 1991               |

TABELA 4.2 Principais pacotes de roteamento utilizados no Brasil (LOPEZ, 1996)

## **4.2 Sistemas customizados no roteamento de veículos**

ROSSEAU (1988) enfatiza a necessidade de criação de sistemas específicos para situações específicas; isto porque cada problema está inserido em um contexto particular requerendo diferentes abordagens de solução.

O especialista que investiga o problema de distribuição de uma firma se depara com a dúvida-padrão, se o problema pode ser *realmente otimizado* via algum pacote comercial disponível no mercado. Em caso afirmativo, os custos e tempos associados ao desenvolvimento de um programa customizado podem ser evitados. Muitos são os fatores que devem ser analisados para se optar entre um processo e outro, mas a disponibilidade de um pacote comercial que se *adeque* ao problema em mãos torna economicamente impraticável o desenvolvimento do outro. Por outro lado, caso o pacote recém-adquirido não seja totalmente adequado para a situação em questão também terá sido gasto muito tempo e dinheiro em vão.

Sistemas desenvolvidos sob encomenda por especialistas para determinadas empresas podem considerar características e aspectos muito específicos dessa empresa. É uma opção que implica em tempo e custos, porém, dá maiores garantias de que o resultado alcançado otimizará o problema. É o caso do ASICAM, desenvolvido por WEINTRAUB *et al.* (1996), um sistema computacional que gera as rotas percorridas pelos caminhões que transportam madeira das florestas chilenas. O ASICAM é programado em FORTRAN e possui uma interface amigável, compatível com os PCs com 640 Mb RAM e 3 Mb de memória para armazenamento. À época do seu desenvolvimento, o maior problema com o qual o sistema rodava possuía as dimensões abaixo, porém tais dimensões podem ser facilmente aumentadas, de acordo com os autores;

- 300 caminhões;
- 90 pontos de origem;
- 50 pontos de destino;
- 20 tipos de produtos;
- 10 tipos de caminhões;
- 15 classes de caminhões;

Usando um PC 486/66 com coprocessador matemático, um problema com 220 caminhões, 40 pontos de origem e 15 pontos de destino, levava 3 minutos para ser resolvido pelo ASICAM. Assim foi alcançada uma redução no número de caminhões e um aumento de produtividade da ordem de 20%, segundo as firmas que o empregam.

ROUSSEAU (1988) afirma que quando um analista propõe uma solução customizada, a técnica proposta não está disponível em mãos para demonstração, o que torna mais difícil a tarefa, já árdua, de convencer o empresariado de que tal técnica irá gerar bons resultados. É neste momento que se opta por algo já pronto, às vezes sem saber ao certo se o problema será resolvido pelo pacote, esquecendo-se ou ignorando até que talvez ninguém consiga avaliar o quanto as soluções geradas por este pacote estão longe da melhor solução atingível por outros métodos. Este é um ponto de divergência entre os especialistas da área.

Dentro da categoria customizados; destacam-se a programação de algoritmos heurísticos modernos que empregam técnicas de *Busca-Tabu*, o *Simulated Annealing*, os *Algoritmos Genéticos* e o uso de técnicas da Inteligência Artificial, os *Sistemas Especialistas*, os *Sistemas de Apoio à Decisão* e as *Redes Neurais*.

O surgimento de novas tecnologias na Inteligência Artificial permite aos pesquisadores de Pesquisa Operacional trabalhar com hardwares e softwares de natureza sofisticada que permitem uma interface com o usuário mais flexível e assim impulsionam o surgimento dos sistemas customizados e comerciais para resolver maiores problemas.

### 4.2.1 Inteligência Artificial para roteamento de veículos

Os trabalhos nesta linha propõem sistemas usando Inteligência Artificial que contempla vasta base de conhecimento sobre o tema e desta deriva as conclusões. Visando organizar e agrupar as diversas técnicas disponíveis em sistemas de apoio à decisão que modelam os problemas reais e fornecem saídas desde que tipo que algoritmo empregar até o próprio roteamento de veículos.

DESROCHERS *et al.* (1990) propuseram um esquema para classificação com o intuito de ajudar os analistas a escolher uma técnica de solução, dentre as inúmeras existentes. Trata-se de um sistema de apoio à decisão que modela as situações específicas de cada problema e sugere os algoritmos que seriam aplicáveis aos modelos resultantes. Este sistema representa e manipula informação em três níveis. No primeiro nível, estão as *situações da vida real*, que inclusive podem conter informações irrelevantes à obtenção da solução. No segundo nível, está o *problema do tipo abstrato*, que é obtido a partir das descrições do nível anterior considerando as restrições e os objetivos. No terceiro nível estão os *algoritmos* que dependendo do problema recém-descrito será então selecionado.

Este esquema fornece valiosa ajuda ao analista na identificação do problema com o qual se confronta. A descrição adequada dos aspectos do problema neste sistema capacita um gerente de distribuição, mesmo inexperiente, a tomar decisões, fornecendo ao sistema, por exemplo, um problema com as seguintes características: demanda determinística localizada sobre pontos distantes na rede, grafo não-orientado, único veículo, que deve passar pelo conjunto de nós exatamente uma vez, concluiria-se que se trata do célebre problema do caixeiro viajante.

POTVIN *et al.* (1989) desenvolveram o ALTO, um sistema gráfico e interativo projetado para facilitar o roteamento de veículos. O ALTO possui uma heurística geral e pode reproduzir uma vasta classe de problemas já documentados na literatura ou pode ser usado para criar novas estratégias de resolução para problemas complexos. Para isso, uma linguagem de

programação orientada a objetos, chamada Loops foi usada para implementar o sistema. O paradigma da orientação a objetos foi escolhido porque os problemas de roteamento podem ser modelados como um conjunto de aspectos relacionados.

O ALTO se destina ao roteamento de veículos quando as demandas se encontram sobre nós. Seus três maiores componentes são os *objetos*, os *operadores básicos* e a *seleção e manipulação dos mecanismos*. Os objetos representam a parte declarativa do sistema; eles contêm atributos para que os operadores atuem sobre estes, são atributos do tipo, capacidade do veículo, coordenadas, demandas, número de veículos etc. São quatro os operadores básicos do ALTO: INIT, que cria e inicializa novas rotas, o ADD, que insere novas paradas às rotas existentes, o MERGE que funde as rotas e o EXCHANGE, o operador usado para modificar a sequência de paradas numa rota existente. A manipulação dos mecanismos de derivação de soluções do sistema, faz uma seleção entre os algoritmos da sua base e o apresenta ao usuário através de sua interface amigável. Uma aplicação real do sistema foi feita para enfatizar sua flexibilidade.

O ALTO é uma ferramenta sofisticada para projetar e testar novos algoritmos de roteamento, diferente do sistema descrito de DESROCHERS *et al.* (1990), esta é direcionada à especialistas no projeto de algoritmos. Com este sistema, desenvolvimentos interessantes na área de sistemas especialistas podem ser previstos, para permitir que o ALTO 'aprenda' a partir de suas experiências passadas e com isto melhore seu comportamento para gerar soluções.

Os diferentes tipos de sistemas de Inteligência Artificial refletem filosofias muito diferentes dependendo do usuário a que se destinam. Por exemplo, alguns sistemas assumem que os computadores podem realizar apenas uma parte do roteamento melhor e mais rápido que os humanos, outros lidam com a idéia de que a pessoa responsável pelo roteamento possui toda a lógica e sabe tudo que é necessário para o roteamento, só lhe



faltando como organizar toda a lógica em um tempo hábil. Então o sistema irá tratar com um expert e um sistema especialista poderá ser construído.

Porém, como assinalam ARINZE & BANERJEE (1992), a correta manipulação dos dados é crítica para o desenvolvimento de sistemas de apoio à decisão. O desempenho a ser obtido de um sistema de apoio à decisão depende significativamente da qualidade e disponibilidade de dados para resolver o problema. Ou seja, a base de dados do sistema precisa de obtenção, validação e fácil acesso aos dados para o desenvolvimento destes sistemas.

#### **4.2.2 Programação algorítmica no roteamento de veículos**

A implementação de heurísticas para o roteamento de veículos através de programas de computador para a uma situação específica também caracteriza-se como uma solução customizada.

Uma vez que restrições complicadas vão sendo acrescentadas ao modelamento do problema, achar uma medida de desempenho para a implementação de heurísticas que capte a noção de 'boa solução' se torna muito difícil. É muito difícil a representação fiel da realidade dentro dos modelos, mas as perguntas a responder são; será necessária a inclusão de todos os fatores específicos da realidade aos modelos? Como a exclusão de algum destes fatores influencia o comportamento do modelo? Quais fatores da realidade poderiam ser excluídos? Por que? E quais as garantias de que a solução derivada será 'boa'? E o que significa 'boa' em termos de complexidade computacional? São muitas as perguntas, e suas respostas podem ser subjetivas e variadas, contrastando com a natureza exata dos modelos, deixando este sujeito às intempéries do relacionamento entre as variáveis.

Exatamente por isso, seria muito difícil projetar um algoritmo que levasse em consideração todas as características impostas <sup>na</sup> pela atividade

real. E seriam necessários muitos algoritmos para resolver o problema, o que consumiria muito tempo.

A noção de 'qualidade de solução' está diretamente associada ao modo como o roteador avalia as rotas geradas e a evidência empírica deste processo deve ser alcançada na prática. Talvez um meio para avaliar a 'qualidade de solução' de um sistema destes é saber antes do roteador o que ele espera da solução a ser gerada. Segundo ASSAD(1988), a noção de 'qualidade de solução' às vezes requer informação detalhada da base de dados e esta, por sua vez quase sempre inexistente ou se encontra cheia de erros.

Os temas relacionados à noção de 'qualidade de solução' e a barreira homem/máquina no processo decisório mencionados são considerações cruciais na formulação e implementação de um modelo. Quais conjuntos de restrições e características o modelo deveria incluir e em qual forma? Como os algoritmos deveriam ser desenvolvidos para apresentar soluções viáveis respeitando estas restrições? São respostas que dependem da intratabilidade que a inclusão destas restrições causam nas técnicas a elas associadas.

### ***4.3 Sistemas de informação geográfica***

O segundo maior desenvolvimento tecnológico da metade da década de 80 foram os sistemas de informação geográfica (GIS) comerciais. Estes sistemas possibilitam a *visualização* desta base de dados em duas ou três dimensões. Hoje em dia existem disponíveis comercialmente muitas bases de dados desenvolvidas pelos governos, empresas especializadas e organizações não-governamentais.

A tecnologia dos centenas de sistemas GIS e a computação gráfica na construção de uma base de dados visual altamente interativa e precisa vêm revolucionando o modo como a visualização, interação, entendimento e uso dos dados podem ser feitas. Visualização é o processo de

transformação dos dados colhidos em informações úteis (GIS) para um número crescente de usuários e usuários em potencial. O objetivo da visualização é que esta etapa de comunicação seja feita da forma mais eficaz e interessante possível.

Existem vários sistemas GIS de base de dados visual e interativa que vão de encontro às necessidades de cada usuário. A capacidade que cada sistema pode oferecer varia de cliente para cliente. Por isso estes sistemas variam de R\$ 200 a R\$1000 e precisam de um Pentium com no mínimo 20 Mb de RAM, recomenda-se 32 Mb, e 12 Mb de espaço livre no disco rígido para operar em ambiente Windows 95 (ROWE, 1997).

Outra alta tecnologia disponível comercialmente são os equipamentos para captura de dados via-satélite, os *GPS*, que podem ser integrados a um sistema GIS aumentando ainda mais sua precisão e acuracidade. O conjunto de aparelhagem GPS é composto por uma antena e um *receiver* que capturam dados referentes às coordenadas de um local sobre ou sob a superfície da Terra, dos mares e dos oceanos, captura também imagens aéreas e de satélite enviando-os para um sistema GIS, caso haja integração destes sistemas. Caso contrário, estas informações poderão ser aproveitadas numa centena de outros sistemas.

Os sistemas GIS representam os dados geográficos colhidos. A informação disponível é transformada em dados 3-D com animação. A impressão provocada pela representação dos dados animados no usuário é de que ele pode se 'locomover' entre ou 'voar' sobre estes. Imagens aéreas e de satélites também podem ser vistas em três dimensões. Existem também junto destes, mapas mais simples em 2-D para navegação e localização de veículos. Alguns destes sistemas requerem instalações no disco rígido do computador, outros vem em CD-ROM prontos para serem manipulados. Perfeito para usuários casuais e para quem possui pouco espaço disponível no disco rígido. Tais informações estão sendo empregadas nas mais diversas áreas e são de grande valia no roteamento

de veículos, para serviços de mensageiros, para segurança dos motoristas que carregam ou não cargas valiosas.

Os sistemas básicos de navegação equipam o veículo com um mapa digitalizado da rede de estradas que corresponde à visão que ele tem do veículo em movimento mostrado num monitor que mostra o mapa da região. Assim que o veículo se torna o centro do mapa o monitor vai sendo atualizado, sempre mostrando ao motorista a 'nova' visão à medida que o veículo se move. O monitor é pequeno, medindo 4,5 a 7 polegadas com capacidade para mostrar ao motorista uma área de 1 km<sup>2</sup> nos níveis mais elevados de detalhamento. O motorista tem acesso a um *zoom out* a partir deste nível de detalhamento para visualizar a sequência crescente de mapas agregados. Com um sistema GIS preciso, o usuário pode localizar todos seus clientes automaticamente e computar os menores tempos de viagem entre esses.

Criar um GIS e mantê-lo atualizado pode aumentar significativamente o custo de um sistema para roteamento de veículos, pois o usuário terá que adquiri-lo, customizá-lo e mantê-lo integrado ao sistema principal. Porém existem duas razões principais para este custo extra; tempos de viagem mais precisos e qualidade de solução.

A primeira delas é o cálculo exato dos tempos de viagem, um dos mais importantes temas em qualquer sistema de roteamento de veículos, e sem um GIS estes tempos são geralmente calculados em função de distâncias Euclidianas. Quanto mais precisos forem os dados sobre os quais serão calculados os melhores caminhos, mais precisos serão os resultados dos algoritmos que os empregam, porém talvez, mais lentos estes rodarão. Neste ponto, faz-se necessário uma análise caso-a-caso para saber que tempos de viagem utilizar. A segunda questão envolve a complexa avaliação de 'qualidade da solução' do ponto de vista de todos os envolvidos no processo de roteamento, a partir somente dos tempos de viagem precisos.

Este e outros são fatos que suscitam questões como a de ASSAD (1988): " Como podem ser redesenhados os algoritmos para fazer bom uso da significativa informação topológica disponível na rede ? "

## **5. PROPOSTAS PARA O ROTEAMENTO DE VEÍCULOS NA COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM SÃO CARLOS –SP.**

### ***5.1 Aspectos gerais da coleta em São Carlos - SP***

O processo de coleta de resíduos sólidos será descrito tendo como diretrizes as características mais relevantes para a abordagem da atividade de uma forma estruturada de acordo com a sistemática da Pesquisa Operacional.

A coleta de resíduos sólidos em São Carlos é realizada pela empresa Vega Engenharia Ambiental (novo nome da antiga Vega Sopave) desde novembro de 1980, quando ganhou a concorrência pública na cidade.

À época da concorrência havia 12 empresas envolvidas no processo e eram pré-requisitos; um certo capital inicial não-revelado e um planejamento para a realização das atividades de coleta de resíduos sólidos, capinação e varrição da cidade. O planejamento apresentado à prefeitura pela Vega Sopave foi elaborado por uma equipe da empresa que diz ter estudado a cidade e suas ruas, porém este estudo não pode ser apresentado.

Hoje, a prefeitura realiza a varrição das ruas, a capinação foi abolida e a Vega Engenharia Ambiental tem seu contrato renovado de cinco em cinco anos. Hoje em dia, a coleta de resíduos sólidos na cidade está dividida em três partes, sendo elas; a coleta hospitalar, responsável pelos resíduos hospitalares e farmacêuticos, a industrial, que coleta o lixo proveniente das indústrias da região e a coleta domiciliar, responsável pelos chamados resíduos sólidos, foco deste trabalho.

O problema da coleta de resíduos sólidos será formulado com base no seu processo diário. Para isso são necessários dados extraídos das características da rede, da atividade e dos veículos.

### **5.1.1 Topologia da rede**

A coleta de resíduos sólidos divide a cidade em 17 setores, os mesmos de 18 anos atrás, de extensão média de 32 quilômetros cada um. A coleta se divide ainda em noturna e diurna. A noturna é realizada diariamente nos 5 setores centrais, que compreendem o centro da cidade e bairros próximos. A diurna é realizada nos 12 setores correspondentes aos bairros periféricos, alternando os dias de bairro para bairro ocorrendo, portanto, também diariamente como a noturna em algum ponto da cidade. Às segundas, quartas e sextas a coleta é realizada em 6 setores e às terças, quintas e sábados nos outros 6 setores.

A demanda pelo serviço se localiza sobre a extensão das ruas ao longo das quais são depositados os resíduos e não em locais específicos pré-determinados distribuídos pela cidade. Ao contrário do que é observado nas áreas rurais do município, onde os moradores têm que juntar o próprio lixo e descarregar em locais pré-estabelecidos visitados pela empresa. Este é o caso do Parque Itaipú, na rodovia Paulo Lauro, km 41 no caminho para Descalvado e do Condomínio Val Paraíso, na rodovia Engenheiro Thales Peixoto Jr., caminho para Ribeirão Preto. Infelizmente, a cidade não apresenta nenhuma saída criativa e não existem lugares adequados para a população depositar o lixo gerado. Portanto os caminhões responsáveis pela coleta têm que percorrer rua por rua para limpar toda a cidade.

Quanto à natureza dessa demanda, a empresa vem acompanhando há 18 anos com a pesagem dos caminhões carregados, através da qual a prefeitura paga a empresa. Isto lhe possibilita estimar a natureza da demanda pelo serviço.

A cidade é considerada uma cidade horizontal, ou seja sem muitos edifícios, que, por sua vez, estão concentrados no centro da cidade onde,

por isso, a coleta é diária. Segundo os gerentes operacionais da empresa, não há a necessidade nem a capacidade para uma coleta diária em toda a extensão da cidade.

O depósito da empresa onde ficam estacionados todos os veículos localiza-se nas imediações da avenida Getúlio Vargas num bairro industrial, perto de uma das saídas da cidade e, portanto, afastado dos bairros residenciais, ou seja da maioria dos setores.

O volume coletado é levado até o aterro sanitário na Fazenda Embaré, localizada numa estrada de terra secundária à Rodovia Washington Luís entre São Carlos e Araraquara, distante cerca de 3 quilômetros da cidade. Segundo o gerente geral o aterro é regularizado pela CETESB, a Companhia Estadual de Tratamento de Esgoto e Saneamento Básico. Os resíduos da coleta hospitalar vão para o incinerador no bairro Santa Felícia.

### **5.1.2 O processo da atividade**

Cada setor demanda três viagens por caminhão às segundas e terças e duas viagens por setor no restante da semana. O volume aumenta no começo da semana por não haver coleta aos domingos.

O processo da coleta tem início com o encaminhamento dos caminhões vazios do depósito para os seus respectivos setores. Cada caminhão parte com um motorista e três garis. A empresa não mantém os motoristas nem os garis fixos aos setores. Nos setores eles iniciam a coleta passando de casa em casa por algumas ruas e, quando a capacidade do veículo é atingida (o motorista do caminhão tem condição de saber quando atinge-se volume máximo), o caminhão lotado retorna ao depósito deixando os garis no setor. No depósito, o caminhão é pesado por fiscais da prefeitura encarregados de conferir o volume coletado para os fins de pagamento à empresa. Logo em seguida, o veículo se dirige para o aterro sanitário. Enquanto isso na cidade a equipe de garis desse caminhão percorre a pé as ruas do setor onde foi iniciada a coleta e vão recolhendo o lixo das casas



restantes e os empilhando em pontos estratégicos. Assim, quando o caminhão volta do aterro vazio, vai passando somente pelos locais onde os garis empilharam o lixo e o trabalho acaba mais cedo.

A empresa afirma, porém, que a atividade se desenvolve de forma um tanto empírica, sendo de responsabilidade do motorista do caminhão, a escolha dos caminhos a serem percorridos dentro de cada setor levando em consideração as mãos das ruas. Em vista disto, conforme entrevista realizada junto aos mesmos, constatou-se que a mesma rua é, às vezes, visitada mais de uma vez no mesmo dia, onerando assim, a coleta em tempo, distância e, conseqüentemente, gastos com combustível, manutenção do veículo, horas-extras, adicional noturno pago aos tripulantes além do inevitável e indesejável contato dos trabalhadores com os resíduos que muitas vezes encontram-se mal-acondicionados e espalhados pelas ruas, representando riscos inestimáveis para a saúde dos trabalhadores envolvidos.

A coleta noturna tem início às 19:00 horas e término por volta das 2:00 horas. A coleta diurna tem início às 8:00 horas em alguns bairros e às 14:00 em outros, estes sem movimento. A Lei trabalhista prevê uma jornada diária de 7:20 horas, porém tão rápido ela acabe os garis são dispensados. Por isso, eles tentam fazer o serviço o mais rápido possível utilizando das artimanhas descritas. A empresa com isso recebe algumas reclamações de moradores, quando algum lixo fica espalhado na rua.

A empresa alega que costuma atender de pronto as reclamações dos moradores, já chegando ao cúmulo de alterar seu itinerário devido à reclamações de moradores que não conseguem dormir por causa do barulho dos caminhões. Porém, a medida de satisfação do cliente adotada é a *simples realização* ou *não* da coleta. Isto é, se hoje a coleta está sendo realizada apesar dos salários irrisórios pagos aos trabalhadores, considera-se que os clientes, a população, está satisfeita.

A empresa alega que a coleta é falha, pois há na coleta uma alta rotatividade de funcionários em vista do alto número de acidentes de

trabalho, especialmente na coleta noturna. Estes acidentes envolvem desde cortes com lixo mal-acondicionado, passando por mordidas de cachorros e até atropelamentos dos garis.

### **5.1.3 Características dos veículos**

A frota de caminhões da empresa foi renovada recentemente (agosto/97) e hoje conta com 7 veículos idênticos com 10 toneladas de capacidade de carga cada um e equipados com rádio para comunicação e com um dispositivo que faz com que o motorista saiba quando o veículo está lotado. Estes caminhões se encarregam de recolher das ruas o volume de 140 toneladas diárias dentro da cidade.

A empresa alega que recolhe 100% do lixo da cidade, porém existem bairros como a Cidade Aracy e Antenor Garcia onde o acesso dos caminhões é dificultado, pois vazios estes pesam 10 toneladas e as ruas não oferecem passagem para um veículo tão grande, além de não serem asfaltadas e cheias de buracos, o que causaria prejuízos à empresa. Os antigos caminhões encontram-se abandonados junto ao aterro sanitário deteriorando, segundo os funcionários.

O departamento financeiro da empresa alega que o serviço de coleta de resíduos sólidos é muito caro, justamente por causa dos veículos. Pois o equipamento especial que acompanha o chassis do caminhão é bem mais caro que o próprio caminhão e requer manutenção diária com óleos especiais para tratar de suas válvulas e rolamentos, também especiais, que compõem o sistema hidráulico dos veículos. Portanto, não há possibilidades de estoques para a reposição de peças e esta se torna demorada e custosa, recaindo sobre a manutenção destes a maior parte do custo total da coleta.

Como pode ser notado, a coleta dispõe de inúmeros problemas para serem analisados e o roteamento de veículos talvez não seja tão crítico se comparado com outros aspectos da atividade. Porém, conforme números da empresa, do custo total da coleta de resíduos sólidos, 85% é gasto com a

atividade de coleta em si e 15% com mão-de-obra e encargos. E este trabalho fixou-se nesta etapa por ser mais acessível à abordagem da P.O.

## ***5.2 Análise do processo de coleta de resíduos sólidos***

A análise a seguir será realizada tomando como base as informações obtidas junto aos funcionários da empresa, auxiliando na posterior formulação de um diagnóstico do emprego de sistemas de roteamento baseados em microcomputador pela empresa em questão no roteamento de sua frota.

Todos os veículos de capacidade idêntica ficam a princípio estacionados num único depósito da empresa de onde são enviados aos setores e para onde devem retornar cheios, porém sem ferir a restrição de capacidade.

A atividade pode ser definida como um conjunto de clientes localizados ao longo das ruas da malha municipal que tem de ser atendido regularmente por uma frota de veículos idênticos de capacidade fixa. Os veículos estão inicialmente localizados em um depósito central. Associado com cada cliente há um volume de carga que precisa ser coletado regularmente. A capacidade do veículo especifica um limite superior que pode ser coletado por cada veículo. Numa segunda etapa, um conjunto de clientes localizados em pontos dispersos sobre a rede precisam ser atendidos pelo veículo que deve passar por todos os pontos exatamente uma vez. Toda rota começa no depósito, visita um certo número de clientes e retorna para o depósito sem violar a restrição de capacidade. O objetivo primário é encontrar um certo conjunto de rotas para que os veículos minimizem a distância total percorrida. Assume-se neste sistema que os custos e os tempos de viagem são lineares em função da distância; então minimizar a distância é uma função-objetivo correlata para minimização dos tempos de viagem e custos.

A empresa vem acompanhando há muito tempo a pesagem de sua carga e da análise desses dados referentes aos últimos 18 anos, para que possa prever sua demanda. Ainda com relação à demanda pelo serviço, pode-se dizer à primeira vista que esta localiza-se sobre a extensão das ruas e não em locais específicos distribuídos pela cidade, indicando que o problema seria de *roteamento sobre arcos*. Porém, conforme entrevistas, constatou-se que na segunda viagem do caminhão os garis, tendo empilhado o lixo em determinados pontos distantes entre si, transformam o problema em *roteamento sobre nós*.

Nas primeiras viagens a cada setor das coletas, tanto a diurna quanto a noturna, as rotas se desenvolveriam sobre um grafo misto, respectivamente onde algumas ruas (arcos) precisam ser percorridas pelo veículo pelo menos e, se possível, no máximo uma vez. Porém, na segunda viagem a aqueles setores para a coleta dos resíduos (demanda) restantes, os garis já completaram a coleta sobre as ruas (arcos) *a pé* e agora esta demanda se localiza sobre pontos específicos (nós) sobre a rede. É sobre esses pontos que agora os veículos devem ser roteados. O roteamento deve ser feito sobre nós também nas viagens-extras a cada setor às segundas e terças-feiras.

Tem-se para resolver dois problemas de roteamento: um sobre os arcos mistos (ruas dos setores) com restrição de capacidade e outro sobre os nós dessas redes mistas (pontos de empilhamento dos resíduos pelos garis nos setores). Portanto, um problema de cobertura de arcos (mistos) e um de cobertura de nós (sobre uma rede mista) para cada um dos 17 setores.

A análise do processo de coleta de resíduos sólidos com base nestas características fornece uma boa síntese do problema real onde podem ser avaliadas as relações entre as variáveis do problema.

### ***5.3 Propostas para o roteamento de veículos***

A pesquisa bibliográfica revelou uma grande quantidade e diversidade de sugestões para a otimização dos processos de geração de rotas para distribuição e coleta de bens e serviços, por parte de diversos especialistas.

A proposição aqui apresentada tem a finalidade de contribuir na forma de uma síntese teórica com a preocupação de subsidiar a tomada de decisão para aplicações gerenciais da firma em questão. A proposta oferece, com base em fundamentos teóricos, diretrizes para análises que guiarão a empresa em direção a uma técnica que se adapte às suas especificações e restrições para que a coleta possa ser melhor organizada pela própria empresa.

O processo de coleta de resíduos sólidos foi analisado e constatou-se a necessidade de geração automática de rotas para a frota que realiza a atividade. Diagnosticados os problemas associados ao processo de coleta na cidade, as próximas seções tratarão de abastecer a empresa com um conjunto de informações totalmente novas sobre a natureza da realização da atividade de coleta que guiarão sua tomada de decisão quanto ao emprego de tais tecnologias.

A proposição de tais alternativas é fruto da comparação entre as principais contribuições disponíveis sobre o emprego das tecnologias para o roteamento de veículos introduzidas neste trabalho. As propostas abaixo foram analisadas sob a luz das informações fornecidas pelos envolvidos diretos na realização da atividade, levantando os requisitos mínimos necessários para a utilização de cada alternativa, fornecendo as informações relevantes a respeito das saídas e limitações impostas por cada sistema na tentativa de subsidiar a empresa em direção à seleção de uma alternativa mais apropriada para utilização em seu ambiente.

### 5.3.1 A modelagem do problema

Segundo NOVAES (1978), otimização não é um processo de busca pelo melhor absoluto, mas sim, a procura sistemática do melhor prático, onde muitas vezes conhecer o mecanismo de um certo problema, determinando as relações entre as variáveis, já constitui um avanço considerável.

Modelos deste tipo, embora não objetivem a otimização no sentido estrito, ainda assim podem ser enquadrados nessa categoria visto que podem levar a resultados práticos melhores do que os obtidos anteriormente.

A resposta à questão sobre qual característica do problema será decisiva para defini-lo mora no centro do processo decisório de modelagem. Os exemplos mostram que definir o modelo apropriado e a função-objetivo para um modelo real e complicado é um exercício difícil em si. Em muitos problemas de roteamento a função-objetivo possui natureza multi-atributada e, portanto, não haverá só um fator decisivo para representar com precisão o problema real. Em geral, assim que as restrições se tornam mais complicadas, elas vão tendo que ser divididas em diferentes sub-modelos interagindo entre si e a função-objetivo passa a assumir o papel de uma variável de controle da qualidade da solução, ao invés de uma representação exata dos custos operacionais.

#### ***a) O problema de roteamento***

Da seção anterior concluí-se que o processo da coleta de resíduos sólidos em São Carlos apresenta 2 modelos de roteamento de veículos interagindo entre si. Dois deles envolvem o roteamento sobre nós e dois deles sobre arcos. Para os modelos de roteamento sobre nós foi observado que os nós propriamente ditos não existem, isto é, eles não são fixos sobre a rede, variando sua localização de dia para dia e noite para noite em função da vontade dos garis.

Nos modelos de roteamento sobre arcos, a principal restrição diz respeito à não violação da capacidade do veículo. Conforme a empresa, a única função da pesagem dos resíduos vem do recebimento do pagamento da prefeitura que é efetuado por tonelada pesada. Uma vez que este procedimento já é adotado ele poderia ser melhor utilizado pela empresa para estimar as demandas por setor.

### ***b) Função-objetivo***

A empresa alega que o fator decisivo na composição do custo diz respeito aos custos com veículos e que uma possível função-objetivo deveria estar associada à minimização do número de veículos necessários para realizar o trabalho. Porém como a empresa observou, o número de veículos utilizados hoje para a coleta já é restrito obrigando, cada caminhão a fazer duas viagens a cada setor.

Na verdade, o problema da empresa reside nos custos de sua frota. Dois fatores podem ser associados a esses altos custos. O primeiro e inevitável deles diz respeito à própria natureza da utilização dos caminhões, isto é, cada um desses veículos carrega em média 15 a 17 toneladas de um material altamente corrosivo diariamente. Fator este que não tem como ser evitado. O segundo fator está associado à manutenção dos mesmos decorrente da sua extensa utilização, ou seja, quanto mais os veículos forem exigidos, maiores serão os custos totais associados ao processo de coleta.

Conhecidos os mecanismos determinantes deste problema, pode ser estabelecida a relação entre as variáveis custo de manutenção do veículo e minimização do tempo de utilização do caminhão. Isto é, uma vez que o número total de veículos não pode ser minimizado, pois sobrecarregaria ainda mais o restante dos caminhões e prejudicaria o processo de coleta na cidade, a função-objetivo se torna a minimização dos tempos de viagem, pois qualquer trabalho em direção à otimização deste processo reside na melhor utilização de cada caminhão que faz a coleta.

### **c) Estratégia de abordagem da coleta para o roteamento**

Conforme observado nos capítulos anteriores, as estratégias mais adequadas para o roteamento de veículos sobre arcos e nós são as *Rotear-Dividir* e *Dividir-Rotear*.

A divisão da cidade em setores é o único critério adotado pela empresa para direcionar a coleta de resíduos sólidos, na qual cada caminhão fica fixo a um setor; já o motorista não é fixo aos caminhões, nem aos setores, sendo porém, responsável pelas rotas a serem seguidas dentro do setor. Talvez uma forma de cada motorista e cada gari conhecer melhor ainda determinado setor seria fixá-lo a ele, tentando, quem sabe, facilitar sua incorporação à comunidade.

Estudos conduzidos por BODIN & KURSH (1978) revelam que a estratégia *Rotear-Dividir* cria muitas intersecções e sobreposição de rotas. Este problema não ocorre quando utilizada a estratégia *Dividir-Rotear*, pois os setores resultantes da partição da cidade não são conflitantes entre si e as rotas sobre cada setor ainda nem foram geradas, ao contrário da primeira estratégia, onde uma rota gigante é criada para ser dividida em outras menores criando pontos de intersecção indesejáveis.

O *trade-off* entre estas duas estratégias reside na quantidade de veículos necessários para efetuar a coleta. Enquanto na estratégia *Rotear-Dividir* geralmente são necessários menos veículos, na *Dividir-Rotear* o número de veículos disponíveis condiciona o número de setores em que a cidade terá que ser dividida, isto é, a cidade será dividida pelo número de veículos disponíveis.

A divisão da cidade em setores é o único critério adotado pela empresa para direcionar a coleta de resíduos sólidos na cidade de São Carlos, na qual cada caminhão fica fixo a um setor; já o motorista não é fixo aos caminhões, nem aos setores, sendo porém, responsável pelas rotas a serem seguidas dentro deste setor. Talvez uma forma de cada motorista e cada gari conhecer melhor ainda determinado setor seria fixá-lo a ele, tentando, quem sabe, facilitar sua incorporação à comunidade.



#### **d) A base de dados**

A base de dados necessária para a solução do problema tem início com a identificação de seus nós. A cada intersecção na rede deverá ser designado um número para identificar cada nó. As coordenadas  $(x,y)$  de cada nó da rede podem ser obtidas manualmente ou por meio de mesa digitalizadora, a diferença é o tempo.

A base de dados mínima para um sistema computacional destinado a gerar as rotas dos caminhões que realizam a coleta de resíduos sólidos deve constar de no mínimo três arquivos.

Os dois primeiros devem conter informações sobre a rede de ruas (os arcos) e as coordenadas  $(x,y)$  de cada esquina (os nós) de todos os setores. As informações referentes aos arcos são sua direção, seus nós inicial e final, sua demanda, seu comprimento e seu setor de localização. Além destes dois ainda deverão haver duas *listas de adjacência*, uma para a rede de ruas e outra para as coordenadas  $(x,y)$  de cada nó.

A primeira parte do terceiro conjunto de dados, a lista de adjacência do conjunto de nós de cada setor, deve informar para cada nó da rede; o número de nós adjacentes, o número de arcos adjacentes e os arcos adjacentes, seu grau, seu déficit e a distância de cada nó para seus adjacentes, medidas numa escala conveniente. A segunda parte do conjunto de dados deve conter informação adicional de cada arco orientado da lista adjacente, tais como a frequência da coleta, a capacidade do veículo e as orientações das mãos das rua. Estes três arquivos de dados constituem a base principal de dados para o sistema.

Este arquivo de dados contendo as características de cada segmento de rua da rede é certamente o que consome mais tempo para ser preparado, além da probabilidade de conter erros ser grande. Por isso deve haver um procedimento para a verificação para detectar falhas no mapeamento ou dados de entrada incorretos. A estrutura indicada para verificar os arquivos de dados de entrada referentes às ruas e aos nós é a matricial. Esta matriz deverá ter a seguinte forma:

- a) os índices das linhas representam as ruas;
- b) os índices das colunas representam os nós;
- c) o conteúdo da matriz (0 e 1) indica se um nó pertence (1) ou não (0) à rua.

Assim, esta matriz indicará todos os cruzamentos das ruas. Os erros resultantes do mapeamento de um setor podem ser a presença de ruas que não existam, informação incorreta sobre a direção das ruas, dois nós com o mesmo código, um nó sem código, uma lista de adjacência incorreta para algum nó, informação incorreta dos arcos.

Os três arquivos de dados descritos na seção anterior têm que ser fundidos para garantir que o mapeamento da rede está completo, correto e minuciosamente descrito. A identificação dos erros poderá ser feita manualmente ou automaticamente da seguinte maneira:

- a) Para identificar a existência de um nó desconectado, basta pesquisar sequencialmente os nó inicial e nó final da base de dados dos nós e verificar se todos os nós estão presentes em pelo menos um deles. Caso todos os nós estejam presentes há uma indicação de que todos possuem pelo menos um arco entrando e saindo deles.
- b) Para verificar a unicidade de numeração de cada nó admite-se que na prática duas ruas do mesmo setor se cruzam uma única vez em determinado nó. Assim duas linhas da matriz devem possuir simultaneamente o valor (1) numa única coluna, caso contrário, há uma indicação de que existem dois nós com a mesma numeração.

### **5.3.2 Alternativas para o roteamento de veículos**

O processo de coleta de resíduos sólidos na cidade analisado apresentou-se bastante complexo e requer uma composição entre vários algoritmos diferentes sendo alguns deles heurísticos e outros exatos.

O equipamento mínimo necessário à empresa para a geração de rotas inclui um Pentium 166 com HD 8 Gb, 32 Mb de memória RAM e 4 Mb de placa de vídeo. A empresa possui hoje um PC 386 com 4Mb RAM

utilizado para documentar os dados de pesagem e outros da parte financeira. Independente da escolha do tipo de sistema pela empresa, é fundamental a obtenção da base de dados mínima citada na seção anterior para o sucesso da geração de rotas por quaisquer meios.

Dentro dessa abordagem baseada no uso de microcomputadores há duas possibilidades de sistemas para roteamento de veículos baseados no uso de microcomputador, poderoso recurso na solução destes problemas. Essas possibilidades incluem as opções do uso de pacotes comerciais ou o desenvolvimento de sistemas customizados.

A possibilidade de emprego da primeira opção torna inviáveis os custos e tempos associados ao desenvolvimento da segunda, pois o mero teste de uma solução customizada pode superar o preço de um pacote comercial. Isso ocorre por causa da maior acuracidade e flexibilidade desses sistemas desenvolvidos para problemas específicos que, apesar de terem sua implementação mais complexa, garantem melhor qualidade de solução ao problema, à medida que incorporam as restrições e variáveis, ou seja, as particularidades da atividade em consideração no processo de geração de rotas.

Em se querendo automatizar algum sistema para a geração de rotas para uma frota de veículos deve-se saber responder às questões abaixo; existe uma base de dados disponível confiável? Existem recursos materiais necessários? Existem recursos humanos especializados? Qual a qualidade de solução buscada pela empresa? A empresa espera uma solução rápida, razoável a preço acessível ou uma solução demorada, de custo alto, porém de qualidade?

#### ***a) O uso de pacotes comerciais***

Caso as vantagens deste tipo de sistema, ou seja, rapidez de implementação, preço acessível, interface amigável interessem à empresa, a solução gerada para o roteamento de veículos da coleta poderá ser razoável, porém poderá ser alcançada rapidamente através de pacotes de

roteamento de veículos comerciais. E a empresa poderá analisar os vários sistemas disponíveis mantendo o foco de sua análise na maneira como as características analisadas que representam o processo de coleta são abordadas pelo pacote.

A mais importante vantagem da utilização de pacotes comerciais é que estes se encontram prontos para implementação imediata. Outra vantagem competitiva apresentada por este tipo de sistema de roteamento diz respeito à variedade de programas disponíveis. Portanto, caso exista um pacote que opere sobre o conjunto das características analisadas, ou seja, as restrições e variáveis encontradas na formulação do problema, este deve ser utilizado.

Porém, é difícil encontrar um pacote que vá de encontro a todas as especificidades do problema real onde todas as características realmente relevantes do problema estejam presentes em sua formulação e consideradas no seu processo de geração de rotas. Isso porque é mais difícil ainda conhecer os procedimentos utilizados nas 'caixas-pretas', apelidos dados pelos representantes comerciais destes softwares, às técnicas heurísticas de roteamento empregada por esses programas. Conforme comprova HOOBAN (1988), o presidente da americana Microanalytics, que desenvolveu o TRUCKS, o qual ele alega ser de sua propriedade industrial, as heurísticas empregadas pelo pacote. A Modus Logística, representante da Microanalytics, que comercializa, instala e fornece serviço de apoio aos clientes do TRUCKS no Brasil confirma não ter acesso a essas heurísticas.

Para selecionar um software entre os muitos disponíveis para gerar as rotas na atividade de coleta, deve-se levantar a capacidade que o software oferece, com base nas variáveis e restrições que ele consegue operar. *a base de dados geográfica, a interface e o preço.* Portanto o proposto é que o pacote comercial seja selecionado dependentemente de como estas três características são abordadas dentro do pacote.

Para a realização desta primeira avaliação são indicados aqueles pacotes que dispõem de disquetes demonstrativos. A evolução da informática e das estratégias de marketing impulsionaram a presença de tal dispositivo em quase todo pacote.

No caso da utilização de um pacote comercial para o roteamento de veículos da Vega na coleta analisada, o problema real diagnosticado poderá ser dividido em vários problemas diferentes, porém podendo ser tratados separadamente pelo mesmo pacote, uma grande vantagem para a empresa.

Um importante fator presente no critério de avaliação para a aquisição de um sistema diz respeito à sua interface, que deve ser interativa e amigável. O indicado para a Vega seriam pacotes traduzidos para o Português e que operem em ambiente Windows, o que confere grande praticidade a estes sistemas e vantagens para a empresa especialmente se não há pessoal especializado.

Para o caso de São Carlos os pacotes comerciais gerarão na sua interface, saídas que fornecerão o traçado de duas rotas para cada um dos 17 setores. As saídas do sistema constituem a parte mais visível da solução do problema de roteamento, por isso deve ser clara e fácil de entender, elas poderão ser em forma de texto, contendo os nomes das ruas a serem visitadas ou na forma gráfica, que produz um maior impacto sobre o usuário através da visualização de mapas nos monitores dos micros onde serão instalados os pacotes, cabendo à empresa escolher a forma que mais lhe parecer apropriada. Logicamente, aqueles com capacidade gráfica mais detalhada despertam mais a atenção se tornando mais interessantes, porém também mais caros.

A base de dados de entrada necessária à empresa para a geração de rotas da coleta analisada deverá conter informações referentes à realização da atividade. Sendo estas, a localização geográfica dos pontos de demanda do serviço sobre a rede de ruas da cidade utilizada pelo pacote na construção da *base de dados geográfica* do sistema sobre a qual este traçara a rota.

As bases de dados destes sistemas utilizam distâncias para compor a rede. Em alguns pacotes a base de dados geográfica se baseia em distâncias retilíneas operando com o sistema de coordenadas Euclidianas (x,y). Isto é, no cadastro da localização da demanda pelo serviço, as ruas e os pontos específicos, devem constar as coordenadas (x,y) de cada local que podem ser extraídas dos mapas quadriculados já utilizados pela empresa ou de mapas scaneados. Estes dados de entrada poderão ser computados manualmente na forma de matriz apresentada, porém aumentando a probabilidade de erros. Já em alguns pacotes a base de dados geográfica pode ser extraída diretamente da rede com a utilização de equipamentos GPS, um meio caro, porém mais acurado de obter dados mais precisos.

A utilização do sistema de coordenadas torna o software mais simples e barato e o emprego de tecnologias via-satélite torna-o mais preciso e acurado, porém mais lento e de instalação mais trabalhosa. Para o caso específico da Vega pode-se assumir na coleta que as distâncias são proporcionais aos tempos de viagem, parâmetro presente na formulação da função-objetivo do problema de roteamento de veículos diagnosticado, pois a atividade se realiza sobre uma rede que, apesar de decomposta em várias, guarda constante o limite de velocidade por setor assim como a situação de suas ruas, fator determinante dos tempos de viagem. Tal simplificação permite à empresa optar por um pacote que empregue o sistema de coordenadas sem comprometer os resultados. Mesmo porque a tecnologia de pacotes comerciais oferece boas soluções para problemas onde a rede não é tão importante.

Porém devido ao fato da rede não ser tão importante no processo de geração de rotas dos pacotes comerciais é que se encontra uma limitação de seu uso pela Vega. Segundo LANCIONI & GRASHOF (1997), nenhum dos pacotes comerciais disponíveis no mercado trata do problema de cobertura de arcos com restrição de capacidade presente na coleta dos resíduos sólidos analisada. E, sendo a restrição de capacidade uma das mais expressivas variáveis limitadas pela capacidade do caminhão, sua

simplificação, na formulação do modelo para representar o problema de roteamento, poderia invalidar a solução.

Caso os pacotes disponíveis não se enquadrem diretamente nos moldes do processo real da coleta, ou seja, caso os pacotes a serem analisados não operem com uma das restrições impostas pela atividade, um pacote alternativo pode ser ainda empregado na tentativa de que outras características operadas pelos pacotes possam superar de certo modo tal deficiência.

Tomando como exemplo a atividade de coleta em questão, a maioria dos pacotes permite ao usuário estabelecer mais de uma rota por dia e assim superar a falta da restrição da capacidade na formulação dos pacotes. A empresa já sabe de antemão que são necessárias *duas viagens* a cada setor por dia para atender a demanda. Com este dado de entrada o pacote fornecerá como saída duas rotas no mesmo setor, uma destas sobre a base de dados da localização dos arcos e outra sobre a base de dados de localização dos nós, previamente estabelecidos pela empresa, motoristas e garis. Portanto, o que pode acontecer em relação à restrição de capacidade não tratada pelos pacotes é que o volume da segunda viagem aumentará e o da primeira diminuirá, equilibrando melhor a carga nas duas viagens, porém aumentando o volume a ser coletado a pé pelos garis. A geração de soluções razoáveis como esta é uma desvantagem da utilização de pacotes comerciais no roteamento.

Porém, existe também a possibilidade de intervenção manual que pode ser feita sobre uma solução original pobre, geralmente gerada pelos pacotes de roteamento, onde alguma restrição tenha sido violada. Com a intervenção manual restrições e objetivos secundários ignorados pelos algoritmos numa primeira iteração podem ser incluídos, transformando a solução original numa boa solução. Isso pode a princípio agradar ou não o usuário que opta por um sistema pronto tentando evitar a necessidade de intervenção. Para o caso analisado a empresa poderia abrir mão desta

ferramenta para superar a falta de habilidade dos pacotes em lidar com a restrição de capacidade ignorada.

Existe disponível no mercado uma grande variedade de preços e de pacotes variando dos bem baratos até aqueles mais caros atendendo portanto todos os segmentos de usuários. De maneira geral, há pacotes que possuem boa capacidade gráfica e interativa sem que se tornem muito mais caros por isso. Não há grandes diferenças entre as performances dos pacotes disponíveis, por isso não há necessidade de pacotes tão caros e a tendência dos preços é cair, bom para a empresa interessada em seu uso. Porém, a tendência é que o preço de aquisição do pacote se disjuncione do preço do serviço de apoio necessário para a pós-instalação, ruim para a empresa que não possui recursos humanos especializados, pois as falhas de implementação documentadas estão principalmente associadas a falta de experiência técnica do usuário final.

Poucas companhias estão na posição de avaliar quanto a implementação destes sistemas poupariam à empresa. Por inexistência de dados, algumas dessas empresas não têm como quantificar as mudanças obtidas com a instalação de um sistema. No caso analisado os benefícios proporcionados pelo uso destes sistemas poderão ser julgados pelo tempo de realização da coleta e dos custos de manutenção dos seus caminhões.

#### ***b) O uso de sistemas customizados***

Caso a principal vantagem proporcionada por este tipo de sistema, a possibilidade de incorporação de situações específicas do processo de coleta de resíduos sólidos para dentro do modelo de roteamento, seja o principal interesse da empresa na escolha de um processo de geração de rotas, deve-se optar por um sistema customizado para solução no roteamento de veículos da coleta.

Segundo ROSSEAU (1988) os pacotes podem resolver uma grande quantidade de problemas, mas, uma vez desenvolvido um completo entendimento da natureza fundamental de cada problema, não haverá



muitos problemas práticos que serão adequadamente resolvidos pelos pacotes. Este é um assunto que gera muita polêmica entre os especialistas.

O processo de coleta de resíduos sólidos analisado possui características peculiares em sua realização que seriam desejáveis na formulação do problema de roteamento. Uma solução customizada poderia abordar em sua estrutura de modelagem estas características ímpares verificadas na realização da atividade de coleta conferindo-lhe caráter único. Tais características incluem:

- ◆ O fato dos garis efetuarem uma parte da coleta a pé enquanto os caminhões vão descarregar deveria ser incluído também na formulação do problema, outro; onde a função-objetivo poderia ser a minimização da distância percorrida pelos três garis sobre o proposto segundo subsetor de cada setor ou a minimização do volume a ser coletado pelos garis a pé ou ainda outra a ser definida pelos garis. Porém, neste caso, o roteamento sobre os subsetores percorridos a pé se desenvolveria sobre redes não-orientadas, inclusive no setor central, que fora definida como uma orientada para os veículos.
- ◆ Outro fator de relevante importância adereça tratamentos específicos para o processo. O volume coletado pelos garis no subsetor vai sendo acumulado em determinados pontos sobre o subsetor. É de grande importância para a empresa conhecer a natureza destes pontos. Saber se são fixos, onde se localizam, e em função de que fatores variam.
- ◆ Para a fixação destes pontos existem disponíveis na Literatura (LAPORTE e BALL, 1988) procedimentos teóricos para a chamada localização 'ótima' de pontos de coleta sobre um grafo. Porém, no contexto da coleta de resíduos sólidos, o procedimento proposto para a localização destes pontos é a troca de informações entre a gerência, o pessoal especializado responsável pela programação do customizado e os motoristas e garis, os envolvidos diretamente na atividade.
- ◆ Uma vez fixos estes pontos foi proposto que se realize o roteamento sobre estes nós recém-definidos, esse fato incorpora ao problema de

roteamento de arcos na coleta um segundo problema de roteamento sobre nós.

Estas características em conjunto confirmam que não há tratamento disponível para o problema de roteamento analisado. Este diagnóstico aponta a necessidade de tratamento específico para a geração de rotas, caso as características assinaladas acima sejam *mesmo* julgadas pela empresa de importância relevante. Pois outros fatores estão associados a escolha de um tratamento customizado.

A primeira delas diz respeito ao tempo empregado para o desenvolvimento destes sistemas, pode ser muito longo (4 a 6 anos ou mais). Porém se a empresa pretende realizar a atividade de coleta de resíduos sólidos por mais 30, 40 ou 50 anos, esse tempo de desenvolvimento pode ser considerado relativamente pequeno. Esta experiência poderia, inclusive, servir como base para a adoção destas tecnologias nas outras cidades onde a Vega realiza a mesma atividade. O segundo fator se refere ao seu preço, muito alto, tão alto quanto os pacotes mais caros. Para o desenvolvimento de um sistema customizado será necessária a presença de pessoal especializado e bem remunerado para realizar um trabalho que, caso implementado com sucesso (as falhas também podem ocorrer), seja capaz de gerar melhores rotas de fato, pode-se considerar que foi uma quantia muito bem empregada.

Porém, caso a Vega, ciente dos riscos e dos recursos necessários, esteja atrás da qualidade da solução gerada e da flexibilidade proporcionada pelo sistema de roteamento a ser adotado, a abordagem proposta para a solução do problema de roteamento analisado deverá ser gerada por um sistema customizado desenvolvido para realização da coleta da Vega em São Carlos e capaz de incorporar ao processo de geração de rotas todas as informações e os dados assinalados relevantes para a coleta.

As abordagens de sistemas customizados enfatizaram a programação algorítmica e o uso da Inteligência Artificial, pois são muitos os detalhes a serem observados. Provavelmente esta estrutura pudesse ser obtida através

de um sistema de apoio à decisão onde podem ainda ser integrados os sistemas GIS de base de dados geográfica adicionando mais precisão ao sistema final.

Uma das características apontadas mais relevantes para o processo de geração de rotas refere-se aos pontos sobre os quais os garis empilham o lixo recolhido a pé enquanto os caminhões descarregam no aterro. Segundo os garis, hoje os pontos referentes à segunda parte da coleta não são fixos, porém eles mostraram-se bastante surpresos com a vontade da empresa em 'oficializar' estes pontos e portanto dispostos a colaborar em fixá-los revelando os fatores que os leva a empilhá-los em determinados locais. Entre as preferências dos garis destacam-se a escolha pela proximidade do caminho a ser efetuado na volta para o depósito, ruas sem movimento, a proximidade de locais onde já se encontram acumulados grandes volume para serem coletados como nos prédios ou ainda outros, de conhecimento exclusivo dos motoristas e garis, as pessoas que mais conhecem as deficiências e as qualidades destes pontos.

Definidos tais pontos entre a empresa e os trabalhadores a empresa deveria equipá-los com latões de lixo para facilitar tanto o trabalho dos garis quanto o do roteamento, que deverá constar sobre estes pontos agora fixos que deverão ser respeitados pelos garis, enquanto a avaliação destes sobre a duração da coleta for positiva, caso contrário, eles simplesmente abandonarão o itinerário gerado.

As técnicas algorítmicas mais adequadas para o roteamento sobre arcos e nós são aquelas que empregam as estratégias de abordagem Rotear-Dividir e Dividir-Rotear, sendo esta última utilizada pela empresa para a definição dos setores dividiu a cidade em 17 setores.

A estratégia adotada se mostra adequada uma vez que a empresa não pode ter o número de veículos minimizado, mesmo recaindo sobre estes a maior parcela dos custos totais da realização da coleta, fato que deve ser adequadamente previsto quando da aquisição do veículo e do cálculo de sua depreciação. Dentro desta estratégia já utilizada pela empresa, são

inúmeros os algoritmos da literatura que podem tratar do problema de roteamento descrito. De uma maneira geral os algoritmos tratarão a coleta como um problema de otimização de redes, onde serão abordados os subproblemas introduzidos no capítulo 2 na composição da solução a ser empregada por estes algoritmos mais complexos.

Entre os algoritmos de roteamento estudados destaca-se aquele de PEARN & LI (1995) que trata do problema de roteamento de arcos em redes mistas aprimorando os melhores algoritmos já testados para este problema (BRUCKER, 1980 e EDMONDS & JONHSON,1973). Este algoritmo é composto de quatro fases, que através da aplicação dos subproblemas introduzidos no capítulo 2, ou seja, o *casamento perfeito de mínimo custo*, o *fluxo de mínimo custo* e o *problema dos caminhos mínimos*, operam transformações sobre o grafo original com o intuito de transformá-lo em par e simétrico respectivamente para tornar possível o traçado de uma rota de Euler sobre o grafo resultante.

Já entre as técnicas de Inteligência Artificial desponta a necessidade de desenvolvimento de abordagens com propósitos gerais que possam ser facilmente adaptáveis para todos os contextos absorvendo suas particularidades através do especialista em roteamento de veículos.

A proposta apresentada tem importância fundamental em conjunto com a análise da coleta de resíduos sólidos realizada. Qualquer decisão de intervir ou não no processo de coleta está calcada nos resultados derivados da proposição. A proposta de tais alternativas servirá ao longo do processo para a adoção de um sistema computadorizado como uma diretriz geral na determinação do nível de esforço a ser dedicado ao problema analisado.

## 6. CONCLUSÃO

### ***6.1 Sobre a prática da P.O. pelos países em desenvolvimento***

Cada país é único em sua história, cultura, estrutura social interna, desenvolvimento econômico, relações com o mercado internacional, localização política estratégica etc...

A existência de obstáculos culturais para a aplicação da P.O. nos países subdesenvolvidos é um tema recorrente na literatura. A maioria das críticas referem-se a fatores particulares de resistência à mudança e escassez de recursos, humanos e financeiros. Em geral, estas críticas ignoram uma interpretação alternativa possível de que não seria a infraestrutura, a cultura e o gerenciamento locais que *estão* inadequadamente adaptados aos métodos científicos de tomada de decisão, mas o contrário. Os métodos é que *são* inadequadamente adaptados para os países em desenvolvimento. A rejeição de tais métodos indica uma consciência sobre a falta de técnicas apropriadas para as circunstâncias do Terceiro Mundo.

Não seria possível especificar uma tecnologia completamente adequada para os países em desenvolvimento independente das circunstâncias locais, porém algumas medidas plausíveis deveriam incluir:

- . a estruturação dos problemas, em vez das técnicas, para resolver os problemas, para que a técnica substitua o processo de tomada de decisão;
- . uma abordagem não-otimizante, tendo em vista a qualidade dos dados disponíveis e a capacidade computacional, que alteram o desempenho;
- . ênfase na flexibilidade, tendo em mente a incidência de incertezas;

- . transparência da técnica para promover a confiança e participação dos agentes envolvidos nas mudanças;
- . métodos de planejamento que envolvam os trabalhadores além dos gerentes para facilitar a mobilização em torno das necessidades básicas;
- . uma pesquisa estratégica ligada à necessidade local básica.

Ironicamente, um dos argumentos convencionais mais persuasivos para o não emprego da P.O. nos países subdesenvolvidos, a falta de recursos humanos e financeiros, é justamente o que deveria impor seu emprego urgente para que estes sejam usados mais eficientemente, mais eficazmente e mais igualitariamente.

## ***6.2 Sobre a transferência de tecnologia***

Segundo BORNSTEIN & ROSENHEAD (1990) o subdesenvolvimento experimentado pelo Terceiro Mundo é uma consequência do desenvolvimento da Europa e América do Norte, pois o desenvolvimento gerou o subdesenvolvimento, assim como o subdesenvolvimento foi um dos pré-requisitos para o sucesso econômico de países desenvolvidos. E a partir da década de 50 a transferência de tecnologia tornou-se o núcleo para o desenvolvimento estratégico adotado pelos países desenvolvidos.

A literatura apresenta algum trabalho na área de transferência tecnológica de países desenvolvidos para os em desenvolvimento, porém poucos além de BETZ (1994) dissertaram sobre a transferência dentro das organizações e entre as organizações de um mesmo país.

Uma das maiores dificuldades na transferência de tecnologia de qualquer pesquisa para a realidade prática nacional é devido a diferenças nos processos de inovação tecnológica, onde parte da comunidade acadêmica é voltada para as aplicações a longo prazo enquanto a pesquisa básica da indústria mantém seu foco no processo de inovação a curto prazo.

Segundo GEISLER (1993), a falta do envolvimento das indústrias no planejamento das pesquisas e no foco apropriado é um sinal de que os resultados não poderão ser diretamente transferíveis. A pesquisa cooperativa entre universidade e indústria no planejamento e realização de pesquisa básica é um excelente mecanismo para alcançar objetivos de importância científica e tecnológica.

O compromisso industrial reside em participar de temas de pesquisa genéricos a longo prazo, ao invés de direcionar sua pesquisa só em seus processos e produtos de propriedade industrial. Por sua vez, a universidade poderia criar tecnologia que fosse realmente absorvida pela indústria para que esta torne a tecnologia transferível e acessível para todos.

Um estudo conduzido em 1991 pela *National Science Foundation Engineering Research Centers Program* apud LANCIONI & GRASHOF (1995) coletou 47 exemplos de transferência de tecnologia entre universidades e a indústria bem sucedidas pelo mundo todo. Analisando esta amostra foram enfatizadas três padrões de comportamento:

- . se os resultados da pesquisa puderam ser usados dentro de um sistema tecnológico já existente a pesquisa foi transferida rapidamente e com sucesso ao ambiente industrial ;
- . quando os resultados da pesquisa requeriam a substituição da tecnologia existente por um sistema totalmente novo, estes resultados só foram transferidos quando a participação industrial se empenhou para completar a pesquisa;
- . se os resultados da pesquisa seriam utilizados como um software, este foi transferido rapidamente e com sucesso somente ao criar uma capacidade funcional nova e significativa ou quando os usuário industriais em potencial formaram um consórcio para facilitar a comercialização do software. Porém se o software só tivesse valor para uma melhora no desempenho de outro software comercial existente, foi difícil comercializá-lo, a menos que um produtor de software estivesse envolvido no projeto.

Pode-se concluir que a cooperação indústria-universidade é uma atividade crítica para a questão da inovação, comercialização de novos produtos e competitividade industrial, pois as universidades, férteis laboratórios de produção de conhecimento, tecnologia e inovações para o desenvolvimento de novos produtos unida à indústria, grande interessada nas novas tecnologias desenvolvidas seria capaz de prover as universidades com incentivos subsidiando pesquisas.

O fato observado no caso da brasileira Modus Logística, que afirma não ter acesso a informações de sua 'matriz' americana em relação às técnicas e procedimentos empregados pelo software que comercializam, instalam e dão treinamento é mais um infeliz exemplo da negligência em relação à transferência de tecnologia aos países em desenvolvimento. Este não foi o caso observado em entrevistas concedidas pelo pessoal da empresa Vega, que facilitou e se entusiasmou com os resultados da pesquisa.

### **6.3 O uso de computadores nas atividades logísticas**

Segundo GEOFFRION & POWERS (1995), cinco processos revolucionários foram responsáveis pela transformação do status da Logística de função negligenciada para respeitada nas duas últimas décadas:

- . evolução dos computadores e da tecnologia das telecomunicações;
- . evolução algorítmica;
- . evolução de desenvolvimento de base de dados;
- . evolução de características dos modelos e capacidade de softwares;
- . evolução no modo como as empresas utilizam softwares para sistemas de distribuição.

A escolha de um sistema baseado em computador para determinado problema de distribuição física envolve o *trade-off* entre a velocidade de



implementação de um pacote, uma vez que o desenvolvimento do programa e a fase de testes não são necessárias, e a acuracidade alcançada com o desenvolvimento de um sistema customizado para uma situação específica sob estudo.

As aplicações de computadores nas atividades de transporte e distribuição apontaram que os problemas de falta de costume com computadores, flexibilidade, base de dados e saídas são fatores críticos nas suas aplicações. Um estudo conduzido por LaLONDE & AUKER (1995), apontou que há hoje um alto nível de atividade na área de roteamento de veículos por computador; 11,2% dos entrevistados estão usando algum sistema atualmente, 4,7% estão em fase de desenvolvimento e 15% estão na etapa de planejamento para utilizar.

#### ***6.4 Sobre a proposição para a geração de rotas***

A partir das análises e da proposição dos problemas de roteamento de veículos na coleta de resíduos sólidos na cidade, pode-se afirmar que há um espaço para ser ocupado pela modelagem de um problema real como um meio de se evidenciar a existência de alternativas viáveis impulsionando-as para o conhecimento público, onde o suporte necessário pode ser mobilizado para implementá-las.

O processo de coleta analisado se mostra eficaz na maior parte da cidade pois uma observação geral sobre a cidade não apontará lugares com grande acúmulo de lixo, salvo infelizes exceções com o Lixão da Cidade Aracy onde não é verificada a coleta, sendo, portanto, de máxima urgência uma solução por parte da prefeitura em conjunto com a empresa contratada, co-responsável pelo estado em que se encontra o bairro.

A análise dos problemas de roteamento apontou especificidades da realização da coleta que poderiam estar associadas a processo de geração de rotas e apontou deficiências no emprego dos pacotes comerciais. A

proposição apontou como pode ser enxergado o mesmo problema pelas diferentes abordagens de solução direcionadas.

Após a análise e a proposição ficou claro que uma solução gerada através de um sistema customizado tem potencial para fazer uma leitura mais detalhada da organização e *provavelmente* a qualidade da solução gerada se mostraria superior caso fosse possível medi-la, enquanto a abordagem da coleta pela utilização de pacotes comerciais a simplifica para enquadrá-la no padrão dos softwares disponíveis.

Muito provavelmente os pacotes disponíveis no mercado satisfariam as necessidades básicas da Vega no processo de geração de suas rotas à curto prazo, pois o problema não é dos mais complexos, uma vez que lida com demandas aleatórias, porém de baixa variabilidade que podem ser estimadas devido à existência de dados de pesagem e aos veículos idênticos. É difícil medir o quanto a implementação de um sistema é capaz de melhorar seu desempenho, pois nos sistemas que não estejam funcionando ajustados a utilização de qualquer software implicaria em economia.

Para o caso da coleta notou-se que os garis e motoristas se mostraram interessados em cooperar tão logo '*esse tal de sistema*' como se referiu um deles, pudesse dispensá-lo mais cedo do trabalho. Eles não manteriam contato direto com o microcomputador, portanto não se sentindo ameaçados por ele, pois, segundo comentários dos próprios o '*computador nunca saíria por aí catando lixo*', (infelizmente). Porém, é difícil prever *hoje* como eles se sentiram tendo '*seus passos vigiados pelo computador*' como afirmou outro. Também por essas razões seria melhor adotar um sistema de computador que pudesse utilizar as informações obtidas com as pessoas diretamente ligadas ao problema da coleta para o processo de geração de rotas, onde os envolvidos estejam cientes da sua importância.

Fica claro, portanto, que caso a implementação gere algum resultado, os garis e motoristas serão os primeiros a sentir os efeitos positivos ou os

primeiros a ignorar os latões nas ruas tão logo o sistema não se mostre eficiente e eficaz.

Um sistema criado a partir do envolvimento dos garis seria a opção mais indicada, pois seria melhor aceita, mais confiável e sofreria menos discriminação por parte daqueles ligados a seu uso do que algo pronto imposto de cima-prá-baixo que, em caso de falhas, se tornaria imediatamente desacreditado, dificultando uma segunda tentativa. Isto é o que afirmam também os gerentes logísticos das firmas brasileiras que estão utilizando os pacotes comerciais; segundo estes é necessária muita conversa antes de tentar implementar algo desta natureza.

Uma vez que os pacotes comerciais são incompatíveis com as peculiaridades de muitas situações da vida real. A solução é tentar forçar a forma da situação da vida real para dentro do pacote, a qual é claramente indesejável, ou provocar mudanças extensivas no pacote propriamente dito, o que pode afastar a escolha de um pacote comercial por justamente estar se tentando evitar os custos e incertezas do desenvolvimento de um programa.

O desenvolvimento de um programa como solução customizada pode ser considerada uma estratégia a médio prazo. Ou seja, caso a empresa optasse por um sistema deste tipo os resultados demorariam um pouco mais para serem percebidos e, seria necessário um acompanhamento de sua atividade de perto para que, depois do entendimento fundamental da natureza das relações entre as variáveis, o especialista pudesse propor algo específico para aplicação na coleta e uma solução deste tipo consta em sua formulação, dos subproblemas introduzidos.

Os autores tendem a apontar duas alternativas para os sistemas customizados; o desenvolvimento de pacotes comerciais de roteamento de veículos gerados através das técnicas de Inteligência Artificial flexíveis e com propósitos gerais que possam ser adaptados para cada situação específica ou a customização de sistemas utilizando as variadas abordagens algorítmicas propostas.

O assunto gera controvérsia entre os especialistas da área e segundo ROSSEAU (1988), um defensor dos sistemas customizados, ele já ouvira de uma empresa que comercializa estes softwares o termo '*linear programming like*', o que pode levantar dúvidas sobre a capacidade técnica dessas firmas.

O estudo apresentado no capítulo sobre os sistemas de roteamento de veículos sobre a eficácia prática dos pacotes comerciais levanta a seguinte questão: Porque as organizações declaram que os pacotes não satisfazem suas necessidades?

Provavelmente a resposta para esta questão, ou seja, a causa das falhas encontradas, esteja na implementação devido à falta de experiência técnica do usuário final dos departamentos de gerenciamento que não têm experiência prática em P.O. ou ainda uma combinação de ambos, sendo também o motivo da ocorrência de falhas na implementação de sistemas customizados que por serem específicos não excluem a possibilidade dos erros estarem presentes tanto na obtenção de dados, como em sua formulação.

### **6.5 Sobre as diretrizes futuras**

Foi analisado neste trabalho uma problemática associada ao lixo, sendo este um aspecto de elevada relevância nas vidas de todas as pessoas e da cidade. Pois sempre haverá Lixo sobre a Terra, porém o que parece mais interessar aos geradores de Lixo é quão rápido o Lixo gerado possa estar o mais longe possível de seu gerador.

Uma campanha intensiva e extensiva por parte dos meios de comunicação e da prefeitura para uma conscientização de que cada pessoa tem responsabilidade sobre o Lixo que gera se faz urgente.

Ao observar as caçambas de entulho se multiplicando pelas ruas da cidade, concluí-se que elas chegaram para ficar e se farão cada vez mais presentes. Curiosos são os donos destas caçambas que, estacionadas atrás de propaganda, não permitem que seja colocado dentro delas Lixo cujo dono não tenha pago pelo seu aluguel, já tendo sido presenciados casos onde o

lixo de dentro destas fora atirado na rua permanecendo ao lado da caçamba vazia. Portanto, sendo o Lixo, uma constante em nossas vidas, nada é mais importante que o desenvolvimento de trabalhos que abordem todas as facetas deste problema de proporções mundiais.

Quanto à realização deste trabalho no processo de otimização da coleta de resíduos sólidos na cidade de São Carlos, pode-se dizer que possui validade, constituindo uma contribuição positiva à medida que nunca fora, antes deste, destinado à empresa um estudo desta natureza, onde pode ser encontrada uma síntese teórica da realização de suas atividades, das informações e dados necessários para a adoção de tais tecnologias (que a empresa mal conhecia e mesmo assim pensava em aplicar) e um conjunto de propostas capaz de subsidiar a empresa num processo de tomada de decisão entre as opções apresentadas.

As diretrizes indicadas para trabalhos futuros residem na limitação deste trabalho, ou seja, a aplicação prática das medidas apontadas pelo estudo conduzido sobre o problema de roteamento da coleta. Porém, foram pavimentados os caminhos a serem trilhados na direção desta aplicação e, mais importante ainda, foram estreitados os vínculos entre esta empresa e a Universidade para trabalhos futuros.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, S. , JORNA, R. A. M. , VERWEIJ, C. A. (1996) Satellite communication in road freight operations: the METAFORA experience. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Managment*, v. 26, n. 1, p. 49-61.
- ARINZE, B. , BANERJEE, S. (1992) A framework for effective data collection, usage and maintenance of DSS. *Information & Managment*, v. 22, p. 257-268.
- ASSAD, A.A. (1988) Modelling and implementation issues in vehicle routing problems. In : VEHICLE ROUTING: METHODIES AND STUDIES, *Golden, B. L. e Assad, A.A.*, North-Holland, Amsterdam, p. 7-45.
- BALAKRISHNAN, N. (1993). Simple heuristics for the VRP with soft time windows. *Journal of Operational Research Society*, v. 44, n.3, p. 279-287.
- BAAL, M. O. (1988). Allocation / Routing: Models and Algorithms. In : VEHICLE ROUTING: METHODIES AND STUDIES, *Golden, B. L. e Assad, A.A.*, North-Holland, Amsterdam, p. 199-221.
- BALLOU, R. H. (1995). LOGÍSTICA EMPRESARIAL: TRANSPORTES, ADMINISTRAÇÃO DE MATERIAIS E DISTRIBUIÇÃO FÍSICA, Atlas, São Paulo, 388p.
- BATRA, D. ; (1993). A framework for studying human error behavior in conceptual database modeling. *Information & Managment*, v.25, p. 121-131.
- BELTRAMI, E. ; BODIN, L. L. (1974). Networks and vehicle routing for municipal waste collection. *Networks*, v. 4, p. 65-94,.

- BETZ, F. (1994). Basic research and technology transfer. *Information & Management*, v. 9, n. 5/6/7, p. 784-796.
- BODIN, L. (1990) Twenty years in routing and scheduling. *Operations Research*, v. 38, n. 4, p. 571-579, jul-ago.
- BODIN, L. L. ; KURSCH, S. J. (1978). A computer-assisted system for the routing and scheduling of street sweeper. *Operations Research*, v. 26, n. 4, p.525-537.
- BODIN, L. L. ; KURSCH, S. J. (1979). A detailed description of a street sweeper routing and scheduled system. *Computers & Operations Research*,v. 6, p. 181-198,
- BODIN, L. ; GOLDEN, B. ; ASSAD, A. ; BALL, M.(1983). Routing and scheduling of vehicles and crews: The stae of the art. *Computers & Operations Research*, v. 10, p. 62-212.
- BODIN, L. L. ; GOLDEN, B. (1981). Classification in vehicle routing and scheduling. *Networks*, v. 11, p. 97-108.
- BORNSTEIN, C.T., ROSENHEAD, J. (1990). The role of Operationa Research in less developed countries: A critical aproach. *European Journal of Operational Research*, v. 49, p. 156-178.
- BUSACKER, R. G. ; GOWEN, P.J. (1961). A procedure for determining a family of minimum cost network patterns, ORO Technical Report 15, Operations Research office, Jonhs Hopkins University.
- CANNEN, A.G. ; SCOTT, L.G. (1995). Bridging theory and practice in VRP. *Journal of the Operational Society*, v. 46, p.1-8.
- CHRISTOFIDES, N. (1973). The optimum transversal of a graph. *Omega*, *The international Journal of Managment Science*, v. 1, n. 6, p. 719-732.

- CHRISTOFIDES, N. ; BENAVENT, E. ; CAMPOS, V. ; COBRAN, A ; MOTA, E. (1986). An algorithm for the rural postman problem on a directed graph. *Mathematical Programming Study*, v. 26, p. 155-166.
- CLARKE G. ; WRIGHT. J.W. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, v. 11, p. 568-581.
- COSTA, M.A.(1982) *Métodos para resolução de rotas eulerianas em grafos mistos com aplicação na distribuição de bens e serviços*. 130 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Paraíba
- DANTZIG & RAMSER (1959). The truck dispatching problem. *Management Science*, v. 6, p. 81-91.
- DANTZIG, G.B. (1957). Discrete variable extremum problems. *Journal of the Operations Research Society of America*, v.5, n.2, p. 266-277, abr.
- DANTZIG, G.B. (1960). On the shortest route through a network. *Management Science*, v. 6, n.2, p. 187-190, jan.
- DASKIN (1985). Logistics: Na overview of the state of the art and perspectives on future research. *Transportation Research*, v. 19<sup>A</sup>, n. 5-6, p.383-398, set-nov.
- DESROCHERS, M. ; LENSTRA, J.K. ; SAVELSBERG, M.W.P. (1990). A classification scheme for vehicle routing and scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, v. 46, p. 322-332.
  - DESROIERS, J. ; DUMAS, Y. ; SOUMIS, F. (1991). The pick-up and delivery problem with time-windows. *European Journal of Operational Research*, v. 54, p. 7-22.
- DJKSTRA, E.W. (1959). A note on two problems in connection with graphs. *Numerische Mathematik*, v. 1, p. 269-271.



- EDMONDS, J. ; JONHSON, E. (1973). Matching Euler tours and the Chinese Postman. *Mathematical Programming*, v. 5, p. 88-124.
- ELMAGHRABY, S.E. (1970). The theory of networks and management science, Part I. *Managment Science*, v.17, n. 1, p. 1-34, set.
- EULER, L. (1953). The Konigsberg bridges. *Scientific American*, v. 189, p. 66-70.
- FLOYD, R.W. (1962). Algorithm 97. *Communications in ACM*, v. 5, p. 345.
- FORD L.R. & FULKERSON D.R. (1962). *Flows in networks*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- FRIZZELL, P.W. ; GIFFIN, J.W. (1995). The split delivery vehicle scheduling problem with time windows and grid networks distances. *Computers & Operations Research*, v.22, n.6, p.655-667.
- GASS, S.I. (1991a). O.R. in the real world: how things go wrong. *Computers & Operations Research*, v. 18, n. 7, p. 629-632.
- GASS, S.I. (1991b).The many faces of Operations Research. *Journal of the Operations Society*, v. 42, n.1, p.3-15.
- GEISLER, E. (1993). Editorial: On the importance of university-industry-government cooperation: a global perspective. *International Journal of Technology Managment*, v. 8, n. 6/7/8, p. 435-438.
- GEOFFRION, A.M., POWERS, R.F. (1995) Twenty years of strategic distribution system design: an evolutionary perspective. *Interfaces*, v. 25, n. 5, p. 105-127.
- GILLET, B. E. ; MILLER, L. R. (1974). A heuristic algorithm for the vehicle-dispatcher problem. *Operations Research*, v. 22, n.22, p. 340-349.
- GOLDEN, B. (1976). Shortest path algorithms: a comparison. *Operations Research*, v. 24, n. 6, p. 1164-1168, nov-dez.

- GOLDEN, B. ; BODIN, L. ; GOODWIN, T. (1986). Microcomputer-based vehicle routing and scheduling software. *Computers & Operations Research*, v. 13, p.277-285.
- GOLDEN, B. ; WONG, R. (1981). Capacitated Arc Routing Problems. *Networks*, v. 3, n. 11, p. 305-315.
- GOLDEN, B.L., DeARMON, J.S., BAKER, E.K. (1983). Computacional experiments with algorithms for a class of routing problems. *Computers & Operations Research*, v. 10, n.1, p. 47-59.
- HANNAN, E. ; MCKEOWN, P. (1979). Matching swimmers to events in a championship swimming meet. *Computers & Operations Research*, v. 6, n. 4, p. 225-231.
- HOOBAN, M. (1988). Marketing a commercial package. In : VEHICLE ROUTING: METHODIES AND STUDIES, *Golden, B. L. e Assad, A.A.*, North-Holland, Amsterdam, p. 455-468.
- LaLONDE, B.J., AUKER, K. (1995). A survey of computer applications and practices in transportation and distribution. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Managment*, v. 25, n. 4, p. 12-21.
- LANCIONI, R., GRASHOF, J. (1997). Physical distribution organization and information systems development: their status among American business firms. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Managment*, v. 27, n. 5/6, p. 265-273.
- LAPORTE, G. (1988). Location-Routing problemas. In : VEHICLE ROUTING: METHODIES AND STUDIES, *Golden, B. L. e Assad, A.A.*, North-Holland, Amsterdam, p. 163- 198.
- LAPORTE, G. (1992). The vehicle routing problem: An overview of exact and approximated algorithms. *European Journal of Operational Research*, v. 59, p. 345-358.

- LARSON & ODoni (1981). URBAN OPERATIONS RESEARCH, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- LAWLER, E. L. ; LENSTRA, J.K. ; RINNOOY KAN, A. H. G. ; SHMOYS, D. B. (1985). THE TRAVELLING SALESMAN PROBLEM: A GUIDED TOUR OF COMBINATORIAL OPTIMIZATION, Wiley, New York.
- LEINBACH, T.R. (1995). Transport and Third World development: Review, issues, and prescription. *Transportation Research*, v. 29A, n. 5, p. 337-344.
- LENSTRA, J. ; RINNOY KAN, A. (1981). Complexity of vehicle routing and scheduling problems. *Networks*, v. 11, n. 2, p. 221-227.
- LITTLECHILD, S.C. (1996). Operational Research and Regulation: Theory and Practice. *Journal of the Operational Research Society*, v. 47, p. 601-611.
- LOPEZ, I. (1996). Na rota da eficiência e economia. *Revista Tecnológica*, n. 11, p. 20-27, ago.
- MEI-KO, K. (1962). Graphic Programming.using odd or even points. *Chinese Mathematics*, v. 1, p. 273-277.
- MEI-KO, K. (1962). Improvement on graph programming. *Chinese Mathematics*, v. 1, p. 278-287.
- MINIEKA, E. (1979). The Chinese Postman Problem for mixed networks. *Managment Science*, v. 25, n. 7, p. 642-648, jul.
- MOFFAT, A. (1983). An empirical survey of shortest path algorithm. *New Zeland Operation Research*, v. 11, n. 2, p. 153-163, jul.
- NOVAES, A. G. (1978). MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO: APLICAÇÕES AOS TRANSPORTES, Blucher, São Paulo, 463 p.

- PANDIT, R. ; MURALIDHARAN, B. (1995). A capacitated general routing problem on mixed networks. *Computers & Operations Research*, v. 22, p. 465-478,
- PEARN, W. L. ; LI, M. L. (1994). Algorithms for the windy postman problem. *Computers & Operations Research*, v. 21, n. 6, p. 641-651.
- PEARN, W. L. ; WU, C. M. (1995). Algorithms for the Chinese Postman Problem on mixed networks. *Computers & Operations Research*, v. 22, n. 5, p.479-489.
- POLLACK, M. ; WIEBENSON, W. (1960). Solutions of the shortest route problem. *Operations research*, v. 8, n.2, p. 224-230.
- POTVIN, J.Y. ; LAPALME, G. ; ROUSSEAU, J.M. (1989). ALTO: a computer system for the design of vehicle routing algorithms. *Computers & Operations Research*, v.16, n. 5, p. 451-470.
- ROSSEAU, J. M. (1988). Customization versus a general purpose code for routing and scheduling problems: A point of view. In : VEHICLE ROUTING: METHODIES AND STUDIES, *Golden, B. L. e Assad, A.A.*, North-Holland, Amsterdam, p. 469-479.
- ROWE, J. (1997). Is it real or data visualization?. *GIS World*, v. 10,n. 11, p. 47-50, nov.
- SAMUELSON, F. (1991). An intelligent spouse's view of O.R. *Computers & Operations Research*, v.18. n. 7, p. 633-634.
- STERN, H. ; DROR, M. (1979). Routing eletric meters readers. *Computers & Operations Research*, v. 6, p. 209-223,
- WEINTRAUB, A., EPSTEIN, R., MORALES, R., SERON, J., TRAVERSO, P. (1996). A truck scheduling system improves efficiency in the forest industries. *Interfaces*, v. 26, n. 4, p. 1-12. Jul-ago.