

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA**

PRISCILA DE ALMEIDA PRATA

PROPOSTA DE UM ALGORITMO PARA O PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO  
DO TRANSPORTE ESCOLAR RURAL

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA**

**PROPOSTA DE UM ALGORITMO PARA O PROBLEMA DE  
ROTEIRIZAÇÃO DO TRANSPORTE ESCOLAR RURAL**

**PRISCILA DE ALMEIDA PRATA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana.

Orientação: Profa. Dra. Suely da Penha Sanches

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da  
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

P912pa

Prata, Priscila de Almeida.

Proposta de um algoritmo para o problema de roteirização do transporte escolar rural / Priscila de Almeida Prata. -- São Carlos : UFSCar, 2009.

147 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2009.

1. Engenharia de transportes. 2. Transporte rural. 3. Roteirização. 4. Sistemas de informações geográficas. I. Título.

CDD: 629.04 (20ª)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana  
C. P. 676 – 13.560-970 – São Carlos – SP  
Fone/FAX: (16) 3351-8295  
e-mail: [ppgeu@ufscar.br](mailto:ppgeu@ufscar.br)  
home-page: [www.ufscar.br/~ppgeu](http://www.ufscar.br/~ppgeu)



## FOLHA DE APROVAÇÃO

PRISCILA DE ALMEIDA PRATA

Dissertação defendida e aprovada em 06/08/2009  
pela Comissão Julgadora

Prfª Drª Suely da Penha Sanches  
Orientador (DECiv/UFSCar)

Prfª Drª Yaeko Yamashita  
(Dep. Engenharia Civil e Ambiental/UNB)

Prof. Dr. Marcos Antônio Garcia Ferreira  
(DECiv/UFSCar)

Prof. Dr. Archimedes Azevedo Raia Jr.  
Presidente da CPG-EU

**Ao meu querido avô Sícero (*in memoriam*)**

## **Agradecimentos**

A Deus por sua infinita misericórdia e providência em cada fase da minha vida e de maneira especial ao longo deste trabalho.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento de 18 meses desta pesquisa.

Aos profissionais da Secretaria de Transporte e Trânsito e Secretaria de Habitação da Prefeitura Municipal de São Carlos pelos dados fornecidos.

A Profa. Dra. Suely da Penha Sanches minha orientadora pela receptividade e disponibilidade.

A Sônia secretária do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana (PPGEU) obrigada pela atenção dispensada em todos os momentos.

Aos meus colegas da turma de 2007 do mestrado e aos colegas dos anos anteriores que conheci ao longo do mestrado.

Ao meu orientador da graduação Prof. Dr. Glaydston Mattos Ribeiro pelo incentivo para que eu fizesse mestrado.

Aos meus inesquecíveis amigos da graduação pelo incentivo e amizade.

Aos meus familiares e amigos, obrigada pela compreensão e pela força principalmente nos momentos mais difíceis deste período.

Aos meus avós, obrigada por toda oração, força e exemplo de vida.

Aos meus irmãos, obrigada pelo carinho, apoio e generosidade.

Não poderia deixar de agradecer também a uma querida família mineira que conheci aqui em São Carlos que me ajudaram a suportar a falta da minha família e me fizeram entender ainda melhor a importância da família e de bons amigos em nossas vidas, nunca esquecerei de vocês.

Um agradecimento especial a uma pessoa guerreira e cheia de vida, minha querida mãe que sempre acreditou e incentivou todos os meus sonhos.

“Pois sabemos que a tribulação produz a paciência, a paciência prova a fidelidade e a fidelidade, comprovada, produz a esperança. E a esperança não engana. Pois o amor de Deus foi derramado em nossos corações pelo Espírito Santo que nos foi dado”.

Romanos 5, 3b-5.

## RESUMO

O Transporte Escolar Rural é um assunto muito importante, mas pouco discutido em trabalhos acadêmicos, em especial a roteirização de veículos para este transporte. Sua importância deve-se ao fato de ser um direito constitucional e trazer custos elevados aos municípios que arcam com a maior parte deles. Tratar este problema manualmente como ocorre na maioria dos municípios brasileiros e levando em considerando as particularidades do sistema é uma tarefa complexa. Neste contexto, os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) podem ser uma boa ferramenta de auxílio à decisão mas, em geral, os algoritmos incorporados a eles não são adequados para tratar do problema, resultando em soluções pouco viáveis na prática. Por outro lado, alguns SIGs permitem que novas funcionalidades sejam inseridas através de linguagens de programação para adequar as rotinas às necessidades do usuário. Sendo assim, este trabalho propõe um algoritmo para a definição das rotas a fim de gerar soluções mais viáveis na prática. O algoritmo é utilizado através de uma ferramenta onde o usuário informa os dados necessários para a definição das rotas e obtém como saída um relatório e o desenho das rotas num mapa. É também possível consultar individualmente cada uma das rotas geradas. O algoritmo e a ferramenta foram desenvolvidos no TransCAD utilizando a linguagem de programação GISDK (*Geographic Information System Developer's Kit*). Para analisar o desempenho do algoritmo, foram realizados dois estudos de caso em cidades brasileiras com características diferentes. Os resultados encontrados mostram que o algoritmo juntamente com a ferramenta pode ser utilizado como um sistema de apoio à decisão para a definição das rotas do transporte escolar rural.

## ABSTRACT

Rural School Transportation is a very important topic but which is scarcely discussed in academic papers, mainly the routing of vehicles for this transport. Its importance is due to the fact that is a constitutional right and results in huge expenses to the municipalities that are responsible for the biggest part of them. Treating this problem manually, like in many Brazilian cities, and considering every one of the system's particularities is a complex task. In this context, the Geographic Information Systems (GIS) constitute a convenient Decision Support Tool, but the algorithms that are incorporated in them are not adequate for treating the problem which results in solutions unviable in practice. On the other hand, some GIS permit the inclusion of new functionalities, by means of programming languages, so that the routines may be adapted to the user's needs. Thus, this research proposes an algorithm for the definition of routes that generates more practical solutions. The algorithm is used by a tool where the users inform the necessary data for the definition of the routes and the outcome is a report and a map with the routes. It is also possible to consult each of the routes individually. The algorithm and the tool were developed in TransCAD using a programming language called GIDDK (*Geographic Information System Developer's Kit*). In order to analyze the performance of the algorithm, two case studies were developed for Brazilian cities with different characteristics. The results showed that the algorithm and the tool may be used as a Decision Support Tool for the definition of rural school transportation routes.

## LISTA DE SIGLAS

- BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
- DARP – Problema *Dial-a-ride*
- DBMS – Sistema Gerenciador de Banco de Dados
- EJA – Educação de Jovens e Adultos
- FNDE – Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação
- FNR-M – Fator de Necessidade de Recursos do Município
- GISDK – *Geographic Information System Developer's Kit*
- IDEB – Índice da Educação Básica
- INEP – Instituto Nacional de Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira
- IPCA – Índice de Preços ao Consumidor Amplo
- MEC – Ministério da Educação
- PCV – Problema do Caixeiro Viajante
- Pnate – Programa Nacional de Apoio ao Transporte Escolar
- PRV – Problema de Roteirização de Veículos
- RSBRP – *Rural School Bus Routing Problem*
- SA – *Simulated Annealing*
- SIG – Sistemas de Informações Geográficas
- SIG-T – Sistemas de Informações Geográficas para Transporte
- TER – Transporte Escolar Rural
- UI – *User Interface*
- Unesco – Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura

## LISTA DE QUADROS

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Quadro 5.1</b> – Simulações realizadas .....                  | 79 |
| <b>Quadro 5.2</b> – Restrições utilizadas no estudo de caso..... | 90 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 2.1</b> – Recursos do Pnate e alunos atendidos .....                                   | 17 |
| <b>Tabela 2.2</b> – Alunos atendidos pelo TER .....                                              | 18 |
| <b>Tabela 2.3</b> – Critério de remuneração do serviço TER .....                                 | 21 |
| <b>Tabela 5.1</b> - Quilometragem de cada serviço do Transporte Escolar de São Carlos (2007) ... | 71 |
| <b>Tabela 5.2</b> – Quantidade de Alunos por turno e por destino (2007).....                     | 74 |
| <b>Tabela 5.3</b> – Demanda de alunos utilizada no estudo de caso.....                           | 76 |
| <b>Tabela 5.4</b> – Resultado das simulações .....                                               | 79 |
| <b>Tabela 5.5</b> – Demanda de alunos e destinos .....                                           | 83 |
| <b>Tabela 5.6</b> – Número de rotas por período .....                                            | 83 |
| <b>Tabela 5.7</b> – Quilometragem percorrida por turno para zona urbana de Olímpia.....          | 85 |
| <b>Tabela 5.8</b> – Número de rotas propostas por período.....                                   | 86 |
| <b>Tabela 5.9</b> – Quilometragem das rotas propostas.....                                       | 86 |
| <b>Tabela 5.10</b> – Cálculo do custo operacional da <i>kombi</i> .....                          | 88 |
| <b>Tabela 5.11</b> – Resultados encontrados aplicação do algoritmo.....                          | 91 |
| <b>Tabela 5.12</b> – Comparação do número de rotas .....                                         | 95 |
| <b>Tabela 5.13</b> – Comparação da quilometragem percorrida.....                                 | 95 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 2.1</b> - Fontes de Recursos para manutenção do TER .....                        | 17 |
| <b>Figura 2.2</b> – Tipos de veículos utilizados para o transporte escolar rural .....     | 19 |
| <b>Figura 3.1</b> - Etapas da Metodologia Proposta .....                                   | 37 |
| <b>Figura 4.1</b> – Fluxo para compilação e execução de um programa escrito em GISDK ..... | 41 |
| <b>Figura 4.2</b> - GISDK Toolbox .....                                                    | 42 |
| <b>Figura 4.3</b> - Heurística de Inserção Paralela.....                                   | 45 |

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 4.4</b> - Roteirização antes e depois de mover a parada S1 para a direita. ....       | 47 |
| <b>Figura 4.5</b> – Exemplo de procedimento de re inserção de solicitações.....                 | 48 |
| <b>Figura 4.6</b> – Exemplo de procedimento de troca de solicitações .....                      | 49 |
| <b>Figura 4.7</b> – Movimento Re-ordenar rota.....                                              | 50 |
| <b>Figura 4.8</b> – Exemplo de inserção de solicitação com ponto de embarque já existente.....  | 52 |
| <b>Figura 4.9</b> – Exemplo de inserção de uma solicitação em uma rota. ....                    | 55 |
| <b>Figura 4.10</b> – Procedimento de Re inserir Solicitação .....                               | 57 |
| <b>Figura 4.11</b> – Exemplo do procedimento Troca de Solicitações para o TER. ....             | 58 |
| <b>Figura 4.12</b> – Exemplo de um ponto de desembarque que faz referência a duas fazendas..... | 60 |
| <b>Figura 4.13</b> – Janela do TransCAD exibindo a ferramenta para o TER.....                   | 61 |
| <b>Figura 4.14</b> – Interface de entrada de dados para cálculo das rotas .....                 | 63 |
| <b>Figura 4.15</b> – Desenho das rotas no mapa.....                                             | 64 |
| <b>Figura 4.16</b> – Arquivo texto como o itinerário das rotas.....                             | 65 |
| <b>Figura 5.1</b> – Município de São Carlos.....                                                | 68 |
| <b>Figura 5.2</b> – Mapa de São Carlos com a localização das escolas e fazendas .....           | 73 |
| <b>Figura 5.3</b> - Embarques por rota.....                                                     | 74 |
| <b>Figura 5.4</b> – Quilometragem das rotas .....                                               | 75 |
| <b>Figura 5.5</b> – Mapa com a demanda para o estudo de caso .....                              | 77 |
| <b>Figura 5.6</b> – Mapa com as velocidades nos trechos das vias.....                           | 78 |
| <b>Figura 5.7</b> – Simulação 1 – Quilometragem e número de rotas .....                         | 81 |
| <b>Figura 5.8</b> – Simulação 1 – Alunos transportados por rota – melhor solução .....          | 81 |
| <b>Figura 5.9</b> – Município de Olímpia .....                                                  | 82 |
| <b>Figura 5.10</b> – Rotas com destino às escolas da zona urbana de Olímpia.....                | 84 |
| <b>Figura 5.11</b> – Extensão das Rotas com destino à zona urbana.....                          | 84 |
| <b>Figura 5.12</b> – Embarques rotas propostas .....                                            | 87 |
| <b>Figura 5.13</b> – Extensão das rotas propostas.....                                          | 87 |
| <b>Figura 5.14</b> – Velocidades nos trechos das vias .....                                     | 90 |
| <b>Figura 5.15</b> – Dispersão da demanda pelo município .....                                  | 91 |
| <b>Figura 5.16</b> – Turno Manhã – Quilometragem e número de rotas .....                        | 92 |
| <b>Figura 5.17</b> – Turno Manhã – Alunos transportados por rota – melhor solução .....         | 93 |
| <b>Figura 5.18</b> - Turno Tarde – Quilometragem e número de rotas.....                         | 93 |
| <b>Figura 5.19</b> – Turno Tarde – Alunos Transportados por rota –melhor solução.....           | 94 |
| <b>Figura 5.20</b> – Turno Noite – Quilometragem e número de rotas .....                        | 94 |
| <b>Figura 5.21</b> – Turno Noite – Alunos transportados – melhor solução .....                  | 95 |

## SUMÁRIO

|          |                                                                      |            |
|----------|----------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                              | <b>13</b>  |
| 1.1      | Objetivos e Justificativa .....                                      | 13         |
| 1.2      | Estrutura do Trabalho .....                                          | 14         |
| <b>2</b> | <b>TRANSPORTE ESCOLAR RURAL .....</b>                                | <b>15</b>  |
| 2.1      | Aspectos Gerais .....                                                | 15         |
| 2.2      | Aspectos Operacionais .....                                          | 18         |
| 2.3      | Observações Conclusivas .....                                        | 21         |
| <b>3</b> | <b>O PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS .....</b>                  | <b>23</b>  |
| 3.1      | Heurísticas e Metaheurísticas .....                                  | 23         |
| 3.2      | Classificação dos Problemas de Roteirização de Veículos .....        | 25         |
| 3.3      | O Problema <i>Dial-a-Ride</i> .....                                  | 27         |
| 3.4      | O Problema de Roteirização e Programação do Transporte Escolar ..... | 31         |
| 3.4.1    | Roteirização do Transporte Escolar Urbano .....                      | 32         |
| 3.4.2    | Roteirização do Transporte Escolar Rural .....                       | 34         |
| 3.5      | Observações Conclusivas .....                                        | 38         |
| <b>4</b> | <b>ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO.....</b>                                    | <b>39</b>  |
| 4.1      | TransCAD e GISDK.....                                                | 39         |
| 4.1.1    | Interface de Acesso às Funcionalidades GISDK.....                    | 40         |
| 4.2      | Algoritmo para Roteirização do TER.....                              | 43         |
| 4.2.1    | Método de Solução .....                                              | 44         |
| 4.2.1.1  | Heurística de Inserção Paralela.....                                 | 44         |
| 4.2.1.2  | Processo de Melhoria .....                                           | 47         |
| 4.2.2    | Implementação do método de solução para o TER .....                  | 50         |
| 4.2.2.1  | Solução Inicial .....                                                | 51         |
| 4.2.2.2  | Processo de Melhoria .....                                           | 55         |
| 4.2.3    | Algoritmo TER .....                                                  | 60         |
| 4.2.4    | Interface para o cálculo das rotas do TER.....                       | 61         |
| 4.3      | Observações Conclusivas .....                                        | 66         |
| <b>5</b> | <b>ESTUDO DE CASO .....</b>                                          | <b>68</b>  |
| 5.1      | Transporte Rural Escolar em São Carlos.....                          | 68         |
| 5.1.1    | Aplicação do Algoritmo no Estudo de Caso .....                       | 75         |
| 5.2      | Olímpia .....                                                        | 82         |
| 5.2.1    | Aplicação do Algoritmo implementado .....                            | 89         |
| 5.3      | Observações Conclusivas .....                                        | 96         |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>                              | <b>97</b>  |
| 6.1      | Conclusões.....                                                      | 97         |
| 6.2      | Recomendações .....                                                  | 99         |
| <b>7</b> | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                             | <b>100</b> |
|          | <b>APÊNDICES .....</b>                                               | <b>106</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

Fazer os alunos chegar às salas de aula diariamente é um dos maiores desafios das autoridades educacionais brasileiras. Nas cidades, o problema não é tão grave, porque o uso de passes escolares, oferecidos gratuitamente ou com descontos, permite que os jovens se movimentem utilizando ônibus, vans, trens e metrô (GUIMARÃES, 2004). Na zona rural, o problema é mais grave, pois com a desativação da maioria das escolas rurais os alunos precisam ser transportados para a zona urbana. Este transporte é garantido constitucionalmente, mas na maioria das cidades é precário e gera custos elevados aos municípios (SANCHES; FERREIRA, 2003).

Muito destes municípios não tem pessoal técnico, nem ferramentas que auxiliem a definição dos itinerários, que deve levar em consideração: a segurança, os custos, os horários de entrada e saída das escolas, o tempo de viagem e a ocupação dos veículos. Dessa forma, existem casos de precariedade em alguns municípios e outros que, tentando garantir um serviço adequado, gastam boa parte de seus recursos orçamentais.

Os Sistemas de Informações Geográficas projetados para uso em transportes (SIG-Ts) podem se constituir em uma boa ferramenta de auxílio à decisão para o planejamento das rotas. No entanto, os algoritmos incorporados a estes pacotes computacionais não podem ser utilizados para o contexto rural porque não são adequados para as características e restrições desses problemas. Para suprir estas necessidades alguns SIG-Ts permitem que novas funcionalidades sejam inseridas através de linguagens de programação.

## 1.1 Objetivos e Justificativa

O objetivo principal deste trabalho é propor um algoritmo que melhor se adapte às características do problema de roteirização para o transporte escolar rural utilizando para isso um Sistema de Informações Geográficas.

Como consequência deste objetivo será criada uma ferramenta que servirá de interface para a entrada dos dados que o algoritmo necessita para a definição das rotas e para a consulta aos resultados encontrados, gerando assim um sistema de apoio à decisão.

Este esforço de pesquisa se justifica devido à relevância econômica e principalmente social deste transporte e também porque não se encontram na literatura algoritmos específicos para resolver o problema.

A pesquisa irá utilizar como ferramenta o SIG-T TransCAD (CALIPER, 1996), pois este permite que novas funcionalidades sejam inseridas através de sua linguagem de programação conhecida como GISDK.

## **1.2 Estrutura do Trabalho**

Este trabalho encontra-se assim estruturado: os Capítulos 2 e 3 são o referencial teórico para a elaboração da pesquisa e tratam respectivamente dos aspectos relevantes do Transporte Escolar Rural e do Problema de Roteirização de Veículos. O Capítulo 4 trata da estratégia de solução para o cálculo das rotas e da ferramenta implementada para o problema. No Capítulo 5 estão descritos dois estudos de caso realizados para analisar a viabilidade do algoritmo. O Capítulo 6 apresenta as conclusões e recomendações do trabalho e no Capítulo 7 estão as referências utilizadas. O Apêndice A traz um manual de utilização da ferramenta desenvolvida. O Apêndice B apresenta resultados das simulações realizadas para o estudo de caso da cidade de São Carlos-SP e o Apêndice C contém o pseudocódigo do algoritmo implementado.

## **2 TRANSPORTE ESCOLAR RURAL**

O Transporte Escolar Rural (TER) é um dos segmentos do Transporte Rural, que é definido pelo GEIPOT (1995) como “o transporte de passageiros, público ou de interesse social, entre a zona rural e a urbana ou no interior da zona rural do município”.

A Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (Unesco) reconhece a educação como um fator determinante no desenvolvimento humano. No Brasil, ela é garantida por lei e está sob a responsabilidade dos municípios e estados (FNDE, 2007c).

Uma das formas de garantir esse direito é através do transporte que, principalmente para os alunos que se encontram na zona rural é a única forma de chegar até a escola, pois, nessas áreas, em geral, não há um sistema de transporte que possa suprir a demanda existente nos horários que eles necessitam.

### **2.1 Aspectos Gerais**

Segundo o FNDE (2007b), o TER como um sistema de transporte financiado pelo poder público municipal ou estadual aos alunos da rede pública de ensino, começou a ser oferecido a partir da década de 1980 por 22,5% dos municípios até então existentes. Na década seguinte, o número de municípios a disponibilizar o serviço de transporte escolar rural cresceu de tal forma que, ao final dos anos de 1990, cerca de 80% dos municípios brasileiros haviam consolidado este tipo de transporte. Em 2005 já eram 93% dos municípios que forneciam o Transporte Escolar Rural para os alunos do Ensino Básico.

Este transporte é gratuito, mantido e gerido pelos municípios. O Governo Federal através de programas tem dado assistência aos municípios para que garantam a efetivação desse direito através do Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE), uma autarquia do Ministério da Educação (MEC) cuja missão é prover recursos e executar ações para o desenvolvimento da Educação, visando garantir educação de qualidade a todos os brasileiros (FNDE, 2009a).

Dentre esses programas, pode-se destacar o Programa Nacional de Apoio ao Transporte Escolar (Pnate) e o programa Caminho da Escola. O Pnate foi instituído pela Lei nº 10.880, de 9 de junho de 2004 e até 2008 tinha como objetivo garantir o acesso e a permanência nos estabelecimentos escolares somente dos alunos do ensino fundamental

público residentes em área rural que utilizassem transporte escolar, por meio de assistência financeira, em caráter suplementar, aos estados, Distrito Federal e municípios. Com a publicação da Medida Provisória nº 455, de 28 de Janeiro de 2009, o programa foi ampliado para toda a educação básica, beneficiando também os estudantes da educação infantil e do ensino médio residentes em áreas rurais (FNDE, 2009a).

Já o Caminho da Escola foi criado pela Resolução nº 3, de 28 de março de 2007, e consiste na concessão, pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), de linha de crédito especial para a aquisição, pelos estados e municípios, de ônibus, mini-ônibus e microônibus zero quilômetro e de embarcações novas (FNDE, 2009a).

Além desses programas que visam atender os alunos da rede pública de ensino que moram na zona rural, o governo federal criou o Pró-Escolar, que consiste em linha de crédito do BNDES, no valor de R\$ 300 milhões, para empresas do setor privado que desejam trabalhar com transporte de alunos das redes públicas estaduais e municipais. O crédito poderá ser usado para a aquisição de veículos para o transporte escolar rural e urbano (MEC, 2007).

Segundo FNDE (2007a) até 2005, o valor por aluno a ser repassado do Pnate aos municípios era calculado com base no número de matrículas efetuadas no ano anterior. Não eram consideradas as características dos municípios e, com isso, alguns municípios acabavam sendo favorecidos por possuírem um orçamento maior que aqueles notadamente mais pobres e que necessitavam de mais recursos. Para uma distribuição mais adequada dos recursos, o FNDE propôs a criação de um mecanismo que levasse em consideração, justamente, as características dos municípios. Desse modo, foi criado um fator de ponderação para o repasse dos recursos (denominado de Fator de Necessidade de Recursos do Município - FNR-M), e estabelecidas faixas de valores diferenciados a serem pagos aos municípios, respeitando um piso mínimo que atualmente é de R\$ 88,13 por aluno (valor referente a 2009).

O FNR-M leva em consideração: o percentual da população rural do município, a área do município, o percentual da população abaixo da linha de pobreza, o fator de Correção de Desigualdades Regionais e, a partir de 2008, passou a ser considerado também o Índice de Desenvolvimento da Educação Básica do município (IDEB) (FNDE, 2009b).

Entre 2006 e 2008 o valor recebido do Pnate por criança variou entre R\$ 81,56 e R\$ 116,36. Para o ano de 2009, este valor sofreu reajuste, passando a variar entre R\$ 88,13 e R\$ 125,72 (FNDE, 2009a).

Através da Tabela 2.1 é possível perceber que houve um aumento no montante investido no decorrer dos anos. Em 2009, houve aumento tanto no investimento quanto no

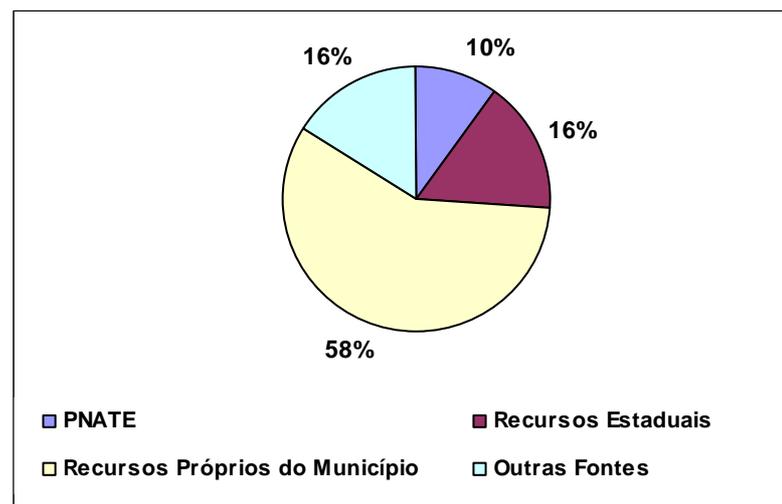
número de alunos atendidos, isso pode ser atribuído a Medida Provisória 455/2009 e ao reajuste do piso mínimo e máximo recebido por aluno.

**Tabela 2.1** – Recursos do Pnate e alunos atendidos

| Ano  | Alunos Atendidos (milhões) | R\$ (milhões) |
|------|----------------------------|---------------|
| 2006 | 3,5                        | 275,9         |
| 2007 | 3,4                        | 292,0         |
| 2008 | 3,4                        | 301,2         |
| 2009 | 4,8                        | 478,2         |

Fonte: FNDE (2009a e 2009c)

Mesmo com esses programas a maior parte dos custos recai sobre o município (Figura 2.1).



**Figura 2.1** - Fontes de Recursos para manutenção do TER

Fonte: FNDE (2007b)

Segundo o INEP (2006) o transporte escolar representa o segundo maior custo com educação para os municípios. Deve-se isso principalmente aos custos de manutenção exigidos e a aquisição de veículos apropriados e seguros para o transporte dos alunos (SOUZA, 2004). Além de ser necessário observar o tempo de viagem dos estudantes, a lotação dos veículos, os horários de entrada e saída das escolas, dentre outros. Tudo isto torna o TER um transporte caro e difícil de ser gerenciado sem pessoal técnico e ferramentas adequadas.

Como consequência é possível verificar a precariedade do serviço em alguns municípios que acabam utilizando qualquer veículo para realizar o transporte ou os alunos

fazem longas viagens sem necessidade e muitas vezes em pé. Em outras cidades, as que se propõem a investir em um serviço de boa qualidade, os altos custos acabam consumindo uma boa parcela de seu orçamento.

## 2.2 Aspectos Operacionais

O planejamento dos serviços de transporte escolar rural deve considerar os aspectos de roteirização, segurança e custos, envolvendo fatores como a demanda existente, a concentração dos horários de entrada e saída da escola, o tempo de viagem, a ocupação dos veículos e os itinerários (VASCONCELLOS, 1997).

De acordo com Instituto Nacional de Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (INEP) a demanda de alunos que utiliza o TER é composta por alunos da Educação Infantil, Ensino Fundamental, Ensino Médio, Educação Especial, Educação de Jovens e Adultos (EJA) e Educação Profissional. Eventualmente pode ocorrer o transporte de alunos do Ensino Superior. A Tabela 2.2 mostra a quantidade de alunos beneficiados com o Transporte Escolar Rural nos anos de 2006 e 2007.

**Tabela 2.2** – Alunos atendidos pelo TER

| Ano  | Número de alunos<br>(milhões) |
|------|-------------------------------|
| 2006 | 4,9                           |
| 2007 | 4,7                           |

Fonte: INEP

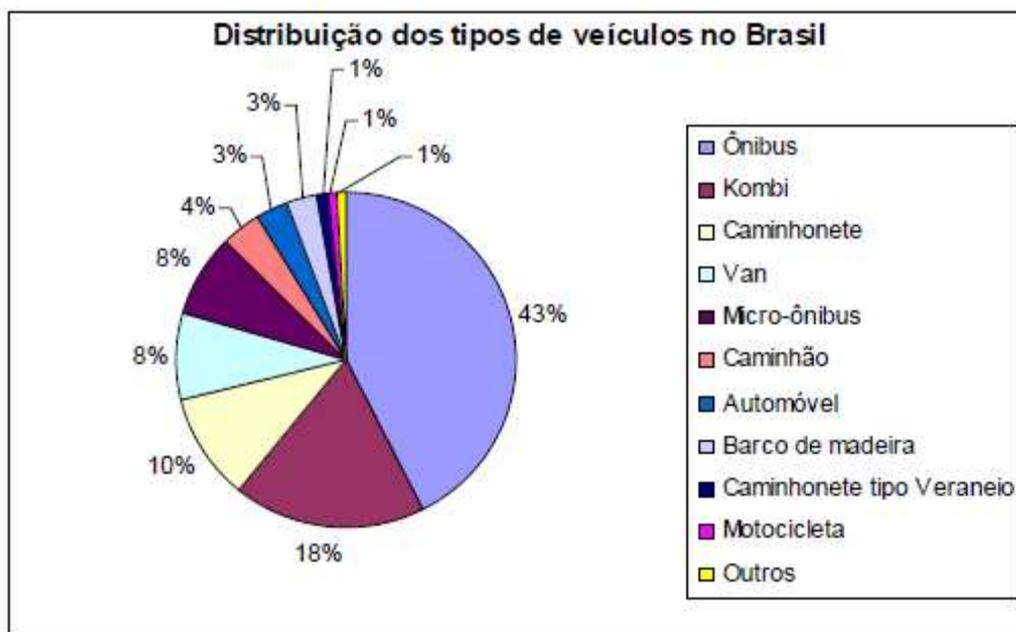
Segundo Pegoretti (2005) a segurança é influenciada pelo comportamento dos motoristas responsáveis pelo transporte, pelas características dos veículos e da rede viária existente. Os motoristas devem receber treinamento para transportar as crianças em estradas vicinais. Os veículos mais utilizados (ônibus e *kombis*) podem não oferecer segurança quando são velhos, não passam por manutenção periódica ou quando trafegam com um número de passageiros acima de sua capacidade.

Há uma legislação que deve ser respeitada pelos motoristas e pelos órgãos responsáveis quando se trata de transporte de estudantes, como equipamentos de segurança, faixa indicando que se trata de um veículo escolar, dentre outros.

Para o caso do transporte rodoviário, os municípios devem adotar o Código de Trânsito Brasileiro, que regulamenta a condução de escolares segundo o Capítulo XIII e prevê a realização de vistorias veiculares semestrais para a verificação de condições e itens de segurança. Além disso, os motoristas também são obrigados a portar habilitação especial para esse tipo de transporte. No artigo 139 do mesmo capítulo, permite-se aos municípios legislar sobre o seu transporte escolar (FNDE, 2007a), mas cerca 85% deles não tem regulamentação própria para o transporte escolar (FNDE, 2007b).

Na Figura 2.2 é possível observar os tipos de veículos utilizados para o transporte dos estudantes. Muitos deles não são adequados para este transporte e não oferecem qualquer segurança, como os caminhões, caminhonetes e motocicletas. Além disso, boa parte dos ônibus utilizados são muito velhos. Segundo FNDE (2007b) a média nacional da idade da frota utilizada é de 16,6 anos.

De acordo com o FNDE (2007b) os outros veículos utilizados no transporte dos estudantes são: animal de montaria, barco de alumínio, carroça, balsa/*ferry boat*, canoa e bicicleta.



**Figura 2.2** – Tipos de veículos utilizados para o transporte escolar rural  
Fonte: FNDE (2007b)

Os horários de entrada e saída das escolas devem ser respeitados e deve-se também respeitar o limite de capacidade dos veículos. Portanto, todos os estudantes devem viajar sentados, visto que isto também é uma questão de segurança.

Os itinerários são fixados anualmente em função do local de residência dos alunos da área rural, matriculadas nas escolas do município, geralmente tentando-se evitar que eles tenham que percorrer, a pé, distâncias superiores a dois ou três quilômetros entre a moradia e o ponto de parada do veículo na estrada (VASCONCELLOS, citado por ALMEIDA (1998)). Em muitos municípios, existe a necessidade de alteração nos itinerários semestralmente, pois ocorrem muitas desistências e mudanças, mas sempre respeitando que o aluno não tenha que percorrer longas distâncias para chegar ao ponto de parada.

O tempo de viagem é um fator muito importante, pois este pode influenciar no aprendizado dos alunos. Barat, citado por Pegoretti (2005), alerta que tempos de viagem muito longos provocam cansaço, aborrecimento e queda de produtividade.

Como a maior parte dos recursos utilizados para a manutenção e operação do TER é do município, os custos devem ser bem administrados para que todos os alunos tenham acesso ao transporte, e para que o impacto no orçamento do município seja minimizado. Comparando-se a quantidade de alunos atendidos pelo Pnate em 2007 (3,4 milhões) e a demanda total existente no país de acordo com o Censo Escolar 2007 (4,7 milhões) é possível perceber a preocupação que os municípios devem ter com os custos do sistema.

Há uma tendência em terceirizar o serviço oferecido. A Tabela 2.3 mostra como é feita a remuneração do serviço quando este é terceirizado e é possível perceber que a remuneração por quilômetro rodado é a mais utilizada pelos municípios. Cabe ressaltar que a soma das porcentagens dessa tabela não equivale a 100%, este é um erro da fonte de dados.

Para Souza (2004) isto acontece porque os itinerários percorridos pelos veículos do TER podem mudar muito de um ano para outro devido às mudanças na demanda. Os alunos frequentemente mudam da zona rural para a zona urbana e vice-versa ou mudam de uma propriedade rural para outra. Além disso, ao progredirem para séries mais avançadas, muitas vezes mudam de escola. Assim sendo, tendo em vista as mudanças necessárias, faz-se necessário renegociar contratos, sugerindo que a prática de cálculo do custo por quilômetro seja mais adaptável a essa dinâmica.

**Tabela 2.3** – Critério de remuneração do serviço TER

| Critério de remuneração do serviço do TER | Porcentagem de municípios (%) |
|-------------------------------------------|-------------------------------|
| Por aluno                                 | 5,75                          |
| Por quilômetro rodado                     | 35,22                         |
| Por quilômetro rodado transportando aluno | 29,29                         |
| Valor fixo mensal                         | 22,48                         |

Fonte: FNDE (2007b)

A roteirização dos veículos é um aspecto muito importante, pois acaba influenciando os outros fatores envolvidos no planejamento do serviço, visto que uma roteirização eficiente pode minimizar o tempo de viagem, otimizar a ocupação dos veículos e melhorar o atendimento a demanda existente, o que acabará diminuindo os custos com o sistema e melhorando a qualidade deste.

Técnicas de roteirização já vêm sendo utilizadas com sucesso no Transporte Escolar Urbano como pode ser visto nos trabalhos de Steiner et al. (2000) e Haidemann (2007). No caso rural existem poucos trabalhos de referência, em especial no Brasil.

No TER o que se vê na prática na maioria dos municípios brasileiros é a definição das rotas de forma manual, feita por profissionais que somente sabem onde os alunos estão localizados, mas que não possuem nenhum conhecimento técnico para que as rotas geradas diminuam os custos financeiros e garantam um serviço de boa qualidade aos estudantes.

### **2.3 Observações Conclusivas**

Este capítulo procurou trazer alguns aspectos gerais e operacionais do TER para que seja possível compreender a necessidade de utilização de técnicas de roteirização de veículos para ajudar a organizar e melhorar o sistema existente. O intuito deste capítulo não foi abranger todos os assuntos relativos ao problema, mas apenas conceituar alguns aspectos importantes para compreensão do todo e quantificar alguns aspectos da demanda.

Percebe-se que houve uma evolução na forma de garantir o acesso dos estudantes à escola, mas o planejamento desse serviço, mais especificamente o planejamento das rotas é feito geralmente de forma inadequada, o que acaba deixando o sistema ineficiente e caro.

Mais detalhes sobre o TER no Brasil podem ser encontrados nos trabalhos citados.

### 3 O PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS

Um problema de roteirização de veículos é definido por três fatores fundamentais: decisões, objetivos e restrições (PARTYKA; HALL, citado por NOVAES (2004)). As decisões dizem respeito à alocação de um grupo de clientes, que devem ser visitados, a um conjunto de veículos e respectivos motoristas, envolvendo também a programação e o sequenciamento das visitas. Como objetivos principais, o processo de roteirização visa proporcionar um serviço de alto nível aos clientes, mas ao mesmo tempo manter os custos operacionais e de capital tão baixos quanto possível.

Existem também, restrições que devem ser obedecidas. Em primeiro lugar, devem-se completar as rotas com os recursos disponíveis, mas cumprindo totalmente os compromissos assumidos com os clientes. Em segundo lugar, devem-se respeitar os limites impostos pela jornada de trabalho dos motoristas e ajudantes. Finalmente, devem ser respeitadas as restrições de trânsito, no que se refere às velocidades máximas, horários de carga/descarga, tamanho máximo dos veículos nas vias públicas etc (NOVAES, 2004).

Segundo Laporte, citado por Cunha (2000), o Problema de Roteirização de Veículos (PRV) consiste em definir roteiros de veículos que minimizem o custo total de atendimento, cada um dos quais iniciando e terminando no depósito ou base dos veículos, assegurando que cada ponto seja visitado exatamente uma vez e que a demanda em qualquer rota não exceda a capacidade do veículo que a atende.

O PRV pertence à categoria de problemas conhecida como *NP-hard*, o que significa que possui ordem de complexidade exponencial, ou seja, o esforço computacional para sua resolução cresce exponencialmente com o tamanho do problema, sendo inviável em muitos casos a utilização de métodos exatos para sua solução. Assim, na maioria dos casos reais, devido à magnitude do problema é necessária utilização de heurísticas ou metaheurísticas que não garantem soluções ótimas, mas se aproximam da otimalidade em um tempo computacional razoável.

#### 3.1 Heurísticas e Metaheurísticas

Segundo Souza (2008) heurística é uma técnica inspirada em processos intuitivos que procura uma boa solução a um custo computacional aceitável, sem, no entanto,

estar capacitada a garantir sua otimalidade, bem como garantir quão próxima está da solução ótima.

Os métodos heurísticos para o PRV podem ser classificados em três classes, de acordo com sua estrutura de execução: heurísticas construtivas, heurísticas de melhoria iterativa e heurística de duas fases.

Nas heurísticas construtivas, as rotas começam vazias e a cada iteração elas vão sendo formadas. Os critérios de formação das rotas podem ser: sequencial ou paralelo, nos quais as rotas podem ser formadas individualmente ou simultaneamente. Dentro desta classe de heurísticas, podem-se destacar dois algoritmos clássicos: o algoritmo de economias de Clarke; Wright (1964) e o algoritmo de Inserção de Mole; Jameson (1976).

O método de Clarke; Wright (1964) baseia-se no conceito de ganho. Parte-se da situação mais dispendiosa em que um veículo sai do depósito para atender somente um cliente e volta ao depósito. Para atender outros clientes são realizadas outras viagens. A partir desta situação inicial, procura-se agrupar os clientes para atendimento de modo que mais do que um é atendido na mesma viagem. A inclusão ou não de um cliente em uma rota depende do ganho em quilometragem em se fazer as entregas de dois clientes combinados e só depois retornar ao depósito ao invés de atender os clientes de forma separada (cada veículo atende um cliente e retorna ao depósito). Se a distância total for menor, este roteiro é mantido, caso contrário outro cliente é escolhido para se juntar a este e assim por diante, até que todos os clientes estejam em alguma rota (NOVAES, 2004).

As heurísticas de melhoria iterativa partem de uma solução inicial viável e tentam melhorá-la a cada iteração, ou seja, a cada nova execução do algoritmo de melhoria são geradas soluções com menores custos. Os algoritmos clássicos desta classe são aqueles baseados na troca *k-opt*, proposta por Lin (1965).

Na heurística *k-opt*, *k* ligações da rota atual (resultante de alguma heurística construtiva) são trocadas por *k* novas ligações. Se estas trocas forem viáveis, ou seja, minimizam (ou maximizam) a função objetivo e respeitam as restrições do problema, elas são mantidas. Quanto maior o valor de *k*, maiores serão as combinações e mais lenta será a execução do algoritmo. Na prática os valores mais utilizados para *k* são 2 e 3.

Heurísticas de duas fases, como o nome já diz, utilizam duas fases: uma constituída em agrupar os clientes (*clusters*) e outra constituída em otimizar o percurso (*routing*). Duas estratégias podem ser utilizadas: primeiro agrupa depois roteia (*cluster first and route second*) ou primeiro roteia depois agrupa (*route first and cluster second*). Nestas

heurísticas geralmente utiliza-se um procedimento para agrupar os clientes e outro para otimizar o percurso em cada um dos *clusters*.

Segundo Cunha (2000), na maioria dos casos as heurísticas propostas são bastante específicas e particulares, isto é, não conseguem obter boas soluções para problemas com características, condicionantes ou restrições às vezes um pouco diferentes daquelas para as quais foram desenvolvidas.

Para tentar sanar o problema da particularidade das heurísticas, técnicas mais gerais têm sido desenvolvidas recentemente: as metaheurísticas.

As metaheurísticas são procedimentos destinados a encontrar uma boa solução (eventualmente a ótima), consistindo na aplicação, em cada passo, de uma heurística subordinada, a qual tem que ser modelada para cada problema específico (RIBEIRO, 1996).

As metaheurísticas e as heurísticas se diferenciam por, basicamente, dois fatores. O primeiro é a capacidade das primeiras em escapar de ótimos locais, através de técnicas peculiares a cada uma delas. O segundo é o fato das metaheurísticas serem mais genéricas, ou seja, são aplicadas em uma variedade maior de problemas (FRAGA, 2006).

A forma de exploração do espaço de soluções permite dividir as metaheurísticas em duas categorias: busca local e busca populacional (SOUZA, 2008).

A busca local no espaço de soluções nas metaheurísticas é feita através de movimentos aplicados sobre a solução corrente, em busca de uma outra solução de melhor qualidade em sua vizinhança. São exemplos de metaheurísticas de busca local: Busca Tabu e *Simulated Annealing*.

Os métodos de busca populacional armazenam um conjunto de boas soluções e as combinam de formas diversas. Estas combinações tentam reunir os bons atributos presentes nas soluções e gerar outras ainda melhores. São exemplos de metaheurísticas de busca populacional: Algoritmos Genéticos e Colônia de Formigas (SOUZA, 2008).

### **3.2 Classificação dos Problemas de Roteirização de Veículos**

Apesar de existir uma definição geral para o PRV, este também pode ser classificado de acordo com as características e as restrições impostas ao problema.

Dentre as classificações encontradas na literatura a mais citada pelos autores é a de Bodin et al. (1983). Segundo estes autores os problemas de roteirização podem ser do

tipo roteirização pura, problemas combinados de roteirização e programação e problema de programação de veículos e tripulações.

Nos problemas de roteirização pura, condicionantes temporais não são importantes para a definição dos roteiros e das sequências de atendimentos (coletas ou entregas). As estratégias de solução são direcionadas aos aspectos espaciais da localização dos pontos a serem atendidos (CUNHA, 2000).

Estes problemas são baseados no clássico Problema do Caixeiro Viajante (PCV) que consiste em encontrar o roteiro ou sequência de cidades a serem visitadas por um caixeiro viajante que minimize a distância total percorrida e assegure que cada cidade seja visitada exatamente uma vez (CUNHA, 2000).

Outro problema clássico que serve de base para os problemas de roteirização pura é o carteiro chinês, em que a demanda se localiza nos arcos ao invés de nos nós e a otimização envolve os percursos ociosos, já que o veículo precisa passar por todos os arcos (ruas) pelo menos uma vez para atendimento (CUNHA, 2000). Os outros problemas de roteirização pura existentes são derivações destes.

A maioria dos problemas de roteirização e programação ocorrem em situações em que estão presentes restrições de janelas de tempo (horário limitado de atendimento) e de precedência entre tarefas (coleta deve preceder a entrega e ambas devem estar alocadas ao mesmo veículo) (BODIN et al., citado por CUNHA (2000)).

Os principais problemas dessa categoria segundo Bodin et al., citado por Cunha (2000) são:

- O problema de roteirização e programação de ônibus escolares para atendimento de um conjunto de escolas;
- O problema de roteirização e programação de cavalos mecânicos tracionando carretas com carga completa: cada carreta é tracionada individualmente de um ponto de origem para um ponto de destino;
- O problema de definição de roteiros e programação de serviços de coleta de resíduos domiciliares e de varrição de ruas, semelhante ao problema do carteiro chinês, porém com restrições de capacidade dos veículos, de duração máxima da jornada e de janelas de tempo associadas aos horários de proibição de estacionamento, de forma a possibilitar a execução do serviço de varrição;

- O problema de roteirização e programação de serviços de transporte de pessoas, conhecidos como “*dial-a-ride*”, em geral para o transporte porta a porta de idosos e deficientes (cada usuário possui local de origem e de destino distintos e eventualmente janelas de tempo; a precedência entre tarefas é uma restrição fundamental a ser considerada).

Os problemas de programação de veículos e tripulações são problemas nos quais os aspectos espaciais já estão definidos (roteiros ou sequências de viagens a serem realizadas), restando definir a alocação de veículos e tripulações ao conjunto de viagens programadas. Estes problemas são encontrados no transporte aéreo, ferroviário, por ônibus, etc (CUNHA, 2000).

Descreve-se a seguir, mais detalhadamente, o problema *dial-a-ride*, por ser o que mais se adapta ao objetivo desta pesquisa.

### 3.3 O Problema *Dial-a-Ride*

O problema *dial-a-ride* (DARP) consiste no desenvolvimento de rotas e escalas de veículos para transportar diversos usuários, os quais especificam requisições de embarque e desembarque (coleta e entrega) entre locais de origem e destino específicos. O objetivo desse processo é planejar um conjunto de rotas para alguns veículos, com “custo mínimo”, capaz de acomodar o maior número possível de usuários, e sempre obedecendo a um conjunto de restrições (MAURI, 2006).

O que difere o DARP dos muitos problemas de roteirização e programação é a perspectiva humana, pois, quando se trata de transporte de passageiros, a redução da inconveniência do usuário deve ser balanceada com a minimização dos custos operacionais (CORDEAU; LAPORTE, 2003a).

Para Znamensky (2000) o DARP pode ser aplicado a qualquer categoria de usuários, com restrições que impeçam o uso das modalidades de transporte coletivo e do transporte individual. Mauri (2006) cita como exemplo, o transporte porta a porta de pessoas anciãs, inválidas ou com dificuldades de mobilidade, o transporte de enfermos para ambulatórios, o transporte de crianças para escola, etc.

O DARP pode ser abordado de forma estática ou dinâmica. No primeiro caso, todas as requisições de transporte são conhecidas *a priori*, enquanto no segundo são

consideradas requisições feitas ao longo do dia, e as rotas dos veículos são ajustadas em tempo real de acordo com a demanda. Na prática, no entanto, raramente existem DARPs dinâmicos “puros”, pois normalmente um subconjunto de requisições é conhecido com antecedência (CORDEAU; LAPORTE, 2003a).

A maioria dos estudos assume o uso de veículos homogêneos que se encontram disponíveis em uma única garagem, mas é importante destacar que na prática ocorrem situações diferentes, como por exemplo: múltiplas garagens, veículos com capacidades diferentes, veículos com capacidade de transportar somente cadeiras de rodas, outros só para transportar passageiros para ambulatórios e outros capazes de transportar ambos os tipos de passageiros (CORDEAU; LAPORTE, 2003a).

Pode-se verificar na literatura que várias restrições operacionais podem ser consideradas para esse tipo de problema. Além das restrições implícitas de precedência, que asseguram que a tarefa de coleta de um passageiro ocorra antes de sua entrega, as mais comuns são de capacidade dos veículos, de janelas de tempo (horário de coleta e entrega) e de duração máxima da viagem de cada usuário (ZNAMENSKY, 2000).

Deve-se observar que tais restrições de precedência não estão presentes em problemas tradicionais de roteirização que envolvem a coleta ou a distribuição física de carga. Estas restrições prejudicam ou até impedem a aplicação de métodos de solução conhecidos na literatura, como por exemplo, o método de economias, também conhecido como algoritmo de Clarke; Wright (1964) (BODIN et al., citado por ZNAMENSKY; CUNHA, 2000).

Quanto às estratégias de solução para o DARP estas podem ser métodos exatos ou heurísticos.

Segundo Baba et al. (2004) os métodos exatos procuram obter a solução ótima para o problema, a partir da construção de modelos matemáticos de otimização, cuja solução ótima pode ser obtida por meio de algoritmos conhecidos. Contudo, devido à complexidade (*NP-hard*) do problema, as soluções obtidas são geralmente restritas às instâncias menores. Como exemplo estes autores citam o trabalho de Sutcliffe; Board (1990), que apresentam um modelo de programação inteira, resolvido por meio do algoritmo de *Branch-and-Bound* para o transporte de deficientes para um único centro de reabilitação. Psaraftis (1980) também citado por estes autores, aplica um modelo de programação dinâmica, com apenas um veículo e sem restrição de janela de tempo.

O trabalho de Jaw et al., citado por Mauri (2006) utiliza uma heurística denominada Heurística de Inserção Paralela, cuja idéia central consiste em ordenar as

solicitações de atendimento por um critério de horário, e inseri-las, segundo a ordenação adotada, nas rotas que resultem em menor acréscimo de custo.

Madsen et al. (1995) mostram uma modificação da Heurística de Inserção Paralela de Jaw et al. (1986). Segundo Mauri (2006) a diferença central é a adoção de um critério de “dificuldade” para ordenação das solicitações. Este critério procura priorizar a inserção de solicitações com restrições mais rígidas, tornando a inserção mais eficiente, pois nos estágios iniciais da heurística os veículos nas rotas estão mais vazios e há um número maior de alternativas de inserções viáveis.

O trabalho de Znamensky (2000) estuda duas abordagens para o problema de transporte de deficientes: a solução exata por meio de um modelo de programação inteira baseada no algoritmo de *Branch-and-Bound* e uma heurística de Inserção Paralela baseada no trabalho de Madsen et al. (1995), acrescida de um procedimento de melhoria local interrota e intrarrota similar a apresentada por Toth; Vigo (1996).

A adaptação da heurística proposta por Madsen et al. (1995) é de tal forma genérica que permite a utilização de frota heterogênea, inclusive com custos e características operacionais distintos para cada veículo. Uma característica importante desta heurística é a utilização de um critério de “dificuldade” para ordenar as solicitações de atendimento. Este critério é composto de três parcelas de dificuldade, correspondentes à largura da janela de tempo mais estreita da solicitação (no embarque ou desembarque), ao tempo máximo permitido de permanência no veículo, e à demanda em número de assentos e cadeira de rodas (ZNAMENSKY; CUNHA, 2000).

Os métodos de busca local implementados para o problema foram os interrota: Reinserção de solicitações e Troca de solicitações. Na reinserção remove-se uma solicitação de sua rota original e reinsere as paradas correspondentes nas melhores posições viáveis dentre as rotas disponíveis. Pode ocorrer o caso em que a melhor inserção seja na rota original, correspondendo ao caso de uma troca intrarrota. Já a troca de solicitações remove-se duas solicitações ( $i$  e  $j$ ) de suas rotas originais (necessariamente distintas), reinsere as paradas correspondentes à solicitação  $i$  nas melhores posições viáveis da rota original da solicitação  $j$  e analogamente reinsere as paradas correspondentes à solicitação  $j$  nas melhores posições viáveis da rota original da solicitação  $i$ .

Jih et al. (2002) utilizam um Algoritmo Genético para resolver um problema de coleta e entrega com janelas de tempo e apenas um veículo. Nesse algoritmo, a representação de uma rota é definida através de um cromossomo que representa a sequência de locais a serem atendidos pelo veículo. O algoritmo ainda permite a exploração de soluções inválidas

durante a busca. A função objetivo trata apenas os custos de viagem do veículo e as violações nas restrições.

Mauri (2006) propõe um modelo geral e multiobjetivo para o problema e a utilização da metaheurística *Simulated Annealing (SA)*. A solução inicial é gerada através de uma Heurística de Distribuição, que é responsável pela roteirização dos veículos, ou seja, pela formação dos agrupamentos dos locais nas rotas e da sequência de atendimento destes. Como esta heurística trata apenas da roteirização dos veículos, sem determinar os horários de chegada nos locais, pontos de partida, etc, é utilizada uma outra heurística denominada heurística de programação que é adaptada da heurística apresentada em Cordeau; Laporte (2003b). Esta realiza a programação de uma forma a tentar reduzir as violações nas janelas de tempo, a duração máxima das rotas e os tempos de viagem dos clientes.

Como estrutura de vizinhança foram utilizados três diferentes movimentos de troca: Reordenar rota, Re-alocar ponto e Trocar pontos.

O movimento Re-ordenar rota consiste basicamente em selecionar uma rota qualquer pertencente à solução, selecionar um ponto qualquer nessa rota, selecionar uma nova posição para esse ponto e trocar sua posição para a nova. O movimento Re-alocar pontos consiste basicamente em também selecionar duas rotas quaisquer pertencentes à solução, selecionar uma requisição qualquer em apenas uma das duas rotas, extrair (seus pontos de embarque e desembarque) de sua rota de origem e adicioná-la na outra rota, em posições quaisquer. Já o movimento Trocar pontos consiste basicamente em selecionar duas rotas quaisquer pertencentes à solução, selecionar uma requisição de transporte (ponto de embarque e seu respectivo ponto de desembarque) qualquer em cada uma das duas rotas, e trocá-las (MAURI, 2006).

O SA foi implementado de uma forma em que cada solução vizinha é gerada por apenas um desses movimentos, sendo a sua escolha feita de forma aleatória, porém uniformemente distribuída, possibilitando assim uma boa diversidade entre as soluções intermediárias geradas, e conseqüentemente uma boa exploração do espaço de soluções (MAURI, 2006). Para a avaliação da abordagem apresentada foram realizados experimentos utilizando as instâncias apresentadas por Cordeau; Laporte (2003b). Os resultados obtidos mostraram que a implementação proposta foi capaz de produzir soluções de boa qualidade, com tempos computacionais baixos.

### 3.4 O Problema de Roteirização e Programação do Transporte Escolar

Segundo Bodin; Golden (1981) no problema de roteirização e programação de ônibus escolares há um número de escolas e cada uma delas possui um conjunto de pontos de parada associados. Há também um número de estudantes associados a estes pontos. Cada escola tem um horário para início e fim das aulas com uma janela de tempo para a entrega dos estudantes em cada turno. O problema consiste em minimizar o número de ônibus utilizados ou o custo total do transporte e, ao mesmo tempo, atender os estudantes, com um nível de serviço pré-especificado e satisfazer as janelas de tempo.

Existem várias abordagens descritas na literatura para tratar do problema de roteirização para o transporte escolar. Estas se diferem em termos da decomposição do problema, das hipóteses utilizadas na modelagem e nos algoritmos utilizados para a solução (SPADA et al., 2003).

No que se refere à decomposição do problema, duas abordagens podem ser encontradas, uma baseada na escola e outra baseada nos alunos. Na primeira delas, um problema é resolvido para cada escola e não é permitido que alunos que estudam em escolas diferentes utilizem o mesmo ônibus ao mesmo tempo. Esta abordagem foi utilizada por vários autores como, Bodin; Berman (1979), Angel et al. (1972), Bennet; Gazis (1972), Steiner et al. (2000), Spasovic et al. (2001), Ripplinger et al. (2005), Rashidi et al. (2009) dentre outros.

Na segunda abordagem, a solução é baseada nos alunos e o problema é resolvido para um aluno de cada vez. Esta abordagem é mais flexível, pois permite carregamento misto, com alunos de diversas escolas no mesmo ônibus. Entretanto, as modificações na solução quando um estudante é incluído são mais complexas (SPADA et al., 2003). Esta abordagem também traz à tona uma restrição presente em problemas *dial-a-ride*, que é a relação de precedência, pois não é possível visitar uma escola para a qual um determinado aluno deve se encaminhado antes de apanhá-lo em seu ponto de parada ou em sua casa. Como exemplo de trabalhos que utilizam esta abordagem pode-se citar: Braca et al. (1997), Thangiah et al. (2004) e Haidemann (2007).

Do ponto de vista da modelagem, muitos autores procuram minimizar os custos, ou seja, o número de ônibus (CLARKE; WRIGHT (1994), BRACA et al., 1997) ou uma combinação do número de ônibus e do tempo de viagem (GAVISH; SHLIFER (1979), STEINER et al., 2000). Spada et al. (2003) procuraram otimizar o nível de serviço oferecido. Outro trabalho que utilizou este tipo de modelagem foi o de Bennett; Gazis (1972) o qual

inclui o tempo total gasto na viagem por todas as crianças em sua função objetivo (SPADA et al., 2003).

Quanto aos algoritmos utilizados existem várias propostas. Para as aproximações baseadas nas escolas, onde um problema de roteirização é resolvido para cada escola, Bennett; Gazis (1972) utilizaram o método proposto por Clarke; Wright (1964) e para tentar melhorar a solução encontrada por este método empregaram a heurística *3-opt* (LIN, 1965). Bodin; Berman (1979) utilizaram um método proposto por Newton; Thomas (1969). Desrosires et al. (1981) utilizaram uma adaptação dos métodos de Newton; Thomas (1964), Clarke; Wright (1964) e a técnica de inserção proposta por Rosenkrantz et al. (1974), seguida pela aplicação da heurística *2-opt* (LIN, 1965). Gavish; Shlifer (1979) utilizaram uma aproximação diferente, resolvendo o problema para cada escola com a aplicação do método *Branch-and-Bound*. Já Braca et al. (1997) que utilizaram uma aproximação baseada nos alunos, trabalharam com uma heurística gulosa.

### **3.4.1 Roteirização do Transporte Escolar Urbano**

A maioria dos trabalhos encontrados na literatura trata do transporte escolar urbano (BRACA et al., 1997, STEINER et al., 2000, SPADA et al., 2003, HAIDEMANN (2007), RASHIDI et al., 2009).

Braca et al. (1997) utilizaram a aproximação baseada nos alunos com o objetivo de minimizar a distância percorrida em cada rota. O algoritmo utilizado é uma adaptação do trabalho de Bramel; Simchi-Levi (1995). Eles inicialmente constroem uma rota selecionada aleatoriamente entre a casa e a escola associada. Então inserem o par casa-escola através de um procedimento guloso, escolhendo primeiro os pares que minimizam o tamanho total da rota e garantindo que todas as restrições serão satisfeitas. Essa solução não é revisada, exceto se existirem ônibus com poucas crianças.

Já no trabalho de Steiner et al. (2000), o problema é baseado nas escolas (neste caso, uma única escola com sede na região metropolitana de Curitiba). Como dito anteriormente este trabalho procurou minimizar a distância percorrida pela frota, reduzindo, por consequência, o tempo de permanência dos estudantes dentro dos ônibus. Segundo os autores, antes da execução dos algoritmos para obtenção das rotas foi executado um modelo matemático de Programação Linear Inteira, para a obtenção das quantidades ótimas de veículos e suas respectivas capacidades. Em seguida utilizou-se um algoritmo heurístico para

a obtenção das sementes (depósitos artificiais) baseado no trabalho de Paraíba et al. (1990), que foram utilizadas pelo algoritmo de agrupamento (*cluster*). O procedimento para obtenção dos *clusters* ótimos (BODIN et al., 1983) foi dividido em duas fases, na primeira os pontos de parada foram designados às sementes sem considerar as capacidades dos veículos e na segunda fase considerando as capacidades. Para a construção das rotas eles utilizaram o algoritmo de Inserção Mais Econômica e as rotas provenientes deste algoritmo foram melhorados por meio de algoritmo de troca intrarrota e interrota.

O trabalho de Spada et al. (2003) foi baseado nas escolas e procurou-se otimizar o nível de serviço provido pelos operadores dos ônibus. Primeiro é construída uma solução inicial para o problema. Esta heurística inicial ignora o número de ônibus disponível para o transporte dos alunos e utiliza o número necessário para que todas as restrições sejam satisfeitas. As escolas são inseridas em ordem crescente de início das aulas e a cada uma delas são associados os pontos de parada em ordem decrescente de suas distâncias até a escola. Para cada escola é utilizado um ônibus. Para melhorar os resultados encontrados pela solução inicial foram utilizados duas metaheurísticas: *Simulated Annealing* e Busca Tabu. Os resultados encontrados na aplicação destas foram comparados, chegando-se à conclusão que o *Simulated Annealing* gerou melhores resultados que a Busca Tabu.

Haidemann (2007) aborda o transporte escolar privado, neste caso, de uma associação de condutores de Joinville, Santa Catarina. Esta associação é composta por 115 condutores e transporta mais de seis mil alunos por dia. Cada condutor é responsável pelo transporte de um conjunto de alunos, que podem ter seus pontos de embarque modificados diariamente conforme suas necessidades (pais com guarda compartilhada, alunos que se encontram na casa de algum colega, doença, dentre outros). Dessa forma, para cada condutor existe um problema de roteirização e programação a ser resolvido.

Do ponto de vista da decomposição do problema, este é baseado nos alunos. O objetivo do problema é minimizar a quilometragem percorrida pela frota, respeitando as restrições de janelas de tempo. O algoritmo utilizado no problema é uma adaptação do trabalho de Psaraftis (1980) que utilizou um algoritmo exato (Programação Dinâmica).

Rashidi et al. (2009) trazem uma solução baseada na escola. Como função objetivo eles procuraram minimizar o tempo de viagem dos estudantes. O método heurístico utilizado para encontrar uma solução para o problema é composto de duas etapas. Na primeira gera-se uma solução inicial que é realizada com a aplicação de três algoritmos diferentes, pois os autores testam a sensibilidade do algoritmo de melhoria à solução inicial. Estes são chamados de *bad initial solution*, *intermediate initial solution* e *good initial solution*. No

processo de melhoria é utilizado um novo algoritmo chamado *Mixed Algorithm* baseado nos trabalhos de Rego (1998a, 1998b, 2001).

### **3.4.2 Roteirização do Transporte Escolar Rural**

Segundo Sanches; Ferreira (2006) o problema roteirização para o TER consiste em um número finito de alunos, localizados em determinados pontos da zona rural (fazendas ou o mais próximo possível delas), que devem ser transportados para uma escola localizada na zona urbana ou mesmo na área rural do município, procurando-se minimizar o custo do transporte, com um nível de serviço predeterminado.

Na zona urbana é possível trabalhar com a decomposição baseada nas escolas, pois a demanda de alunos assegura que os ônibus irão atingir a capacidade em um tempo adequado para os estudantes, além da capilaridade das vias que garantem diversas possibilidades de trajetos.

No entanto, na zona rural dos municípios brasileiros devem ser destacadas algumas particularidades que influenciam na programação das rotas, como a baixa densidade populacional, grandes extensões de terra, a dispersão dos estudantes pelas várias escolas, a pouca capilaridade da rede viária.

A demanda de estudantes na área rural é bem menor que na área urbana. Além disso, existem grandes extensões de terra e estes estudantes estão dispersos por essas regiões obrigando que o serviço seja, em muitos casos, porta a porta e que numa viagem não seja possível utilizar toda capacidade do veículo ou pelo menos sua capacidade mínima.

Outro ponto a ser levado em consideração é a dispersão dos estudantes pelas escolas, ou seja, os alunos, ou seus pais, podem escolher onde estudar e como estes estão bem dispersos pela zona rural pode ocorrer que num mesmo ponto sejam encontrados alunos que se destinam a diferentes escolas, tornando o problema mais complexo para ser resolvido.

Além disso, a pouca capilaridade da rede viária e as condições das estradas dificultam a escolha de trajetos alternativos e acabam influenciando no tempo de viagem dos estudantes.

Estas particularidades obrigam a utilização do modelo de decomposição baseado no aluno para resolver o problema. Dessa forma, é possível equilibrar melhor os custos e a qualidade do transporte.

São poucos os trabalhos encontrados na literatura que tratam da Roteirização para o Transporte Escolar Rural.

Almeida (1998) cita o trabalho de Chen; Kallsen (1990), como único a tratar do TER até a data de sua pesquisa. Mais recentemente, podem-se destacar os trabalhos de Thangiah et al. (2004), de Ripplinger (2005) e o trabalho de Silva et al. (2007).

O método proposto por Thangiah et al. (2004) aceita carregamento misto, além de permitir que um ponto de parada possa ser visitado mais de uma vez, pois eles também trabalham com estudantes portadores de necessidades especiais. O objetivo da implementação é minimizar a distância percorrida e o número de ônibus utilizados, diminuindo assim os custos de transporte. Este método, chamado de *Rural School Bus Routing Problem (RSBRP)* consiste na obtenção de uma rota inicial que leva em consideração o custo (fixo e variável) de inserir cada estudante numa rota existente ou criar uma nova rota para inserir o estudante. Em seguida a solução inicial é melhorada utilizando métodos de otimização local intrarota e interrota.

Os algoritmos de otimização local intrarota utilizados são o *1-opt* e *2-opt* (LIN, 1965); (LIN; KLINGMAN, 1973). Eles são utilizados para reduzir a distância percorrida em cada rota.

Para a otimização interrota são utilizadas heurísticas similares às implementadas por Salhi; Randi (1993). O objetivo dessas heurísticas é mover os estudantes entre as rotas, realocar os pontos iniciais dos ônibus e reduzir o número total de ônibus necessários para transportar os estudantes, minimizando os custos de transporte.

As heurísticas interrotas implementadas para o RSBRP são:

- *Customer-Interchange*: Esta heurística é baseada na troca de clientes entre um conjunto de rotas.
- *Sharing*: Esta heurística remove todos os estudantes de um ônibus e os aloca num outro ônibus não vazio. Se os estudantes removidos não puderem ser alocados no ônibus não vazio, eles são alocados em um ônibus vazio;
- *Reduction*: Remove todos os estudantes de um ônibus e move-os para um ônibus não vazio. Este método não utiliza um novo ônibus. Uma vez que um ônibus foi esvaziado, o novo custo é calculado;
- *Combine*: Remove todos os estudantes de dois ônibus e coloca-os em um ônibus vazio. A heurística tenta reduzir o custo total de se utilizar

dois ônibus para utilizar um. A nova rota criada é realocada para todos os depósitos compatíveis na busca de um ponto inicial que reduza o tempo de viagem;

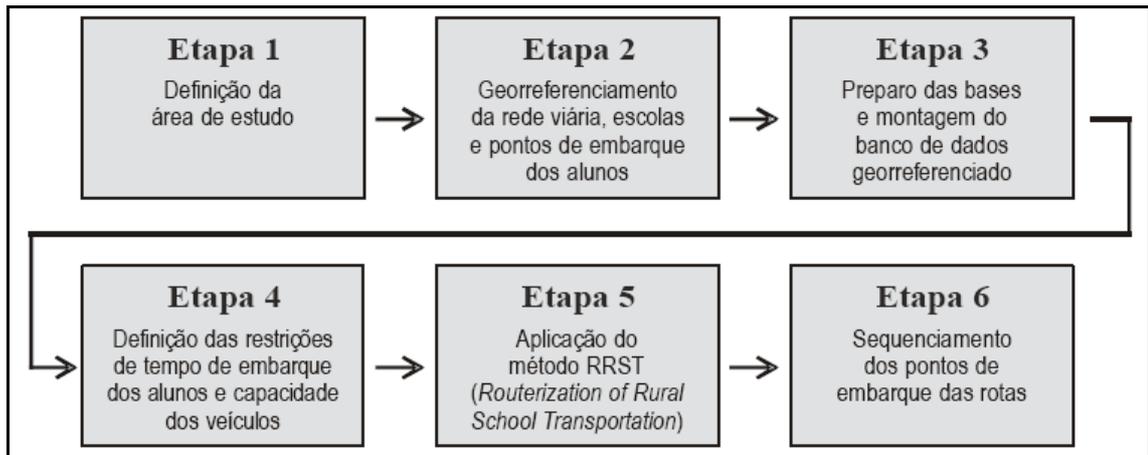
- *Swap Trucks*: Esta heurística realoca os pontos iniciais dos ônibus para encontrar novas rotas com tempos de viagem reduzidos. Cada rota tem um depósito inicial e final. O ponto final é a escola onde o estudante será originalmente deixado. O ponto inicial é realocado na busca de soluções que reduzam o custo total da rota.

Já no trabalho de Ripplinger (2005) não é possível o carregamento misto. O objetivo do problema é minimizar os custos financeiros e o tempo de viagem dos estudantes. A heurística proposta consiste em duas fases; na primeira os pontos de paradas são dispostos em ordem decrescente de distância da escola, logo após as rotas são construídas com base no ângulo que os pontos de parada fazem em relação à escola. Nesta fase não há preocupação com violação de restrições de capacidade ou tempo de viagem, isto só é levado em consideração na fase seguinte. Na segunda fase é utilizada a metaheurística Busca Tabu para melhorar as rotas da primeira fase e atender às restrições de tempo e capacidade dos veículos.

Um conjunto de rotas gerado após a segunda fase é aceito quando um dos três eventos ocorrerem: se o tempo de viagem for menor que o da solução inicial, se alguma rota inicial violar a restrição de capacidade ou se o tempo e as rotas recém criadas na segunda fase diminuïrem a magnitude da violação ou eliminarem a violação das restrições.

O trabalho de Silva et al. (2007) traz uma metodologia para a roteirização do TER que consiste de 6 etapas como mostra a Figura 3.1. Do ponto de vista da decomposição do problema a solução baseia-se na escola. Neste caso, as escolas localizam-se agrupadas em um único ponto no centro da cidade; o que pode não ser eficiente uma vez que estas podem, na realidade, estar bem distantes uma da outra. A modelagem optou por minimizar a distância percorrida, respeitando um tempo desejado para o cumprimento das rotas e a capacidade dos veículos. Este tempo pode ser estendido caso, não seja possível alocar todos os pontos de embarque às rotas existentes.

O algoritmo utilizado neste problema é o das economias de Clarke; Wriqth (1964), este é aplicado na Etapa 5 da metodologia desenvolvida.



**Figura 3.1** - Etapas da Metodologia Proposta  
Fonte: Silva et al. (2007)

Almeida (1998) apesar de utilizar carregamento misto também centraliza as escolas em um único ponto na zona urbana do município, pois o algoritmo disponível no TransCAD (ferramenta utilizada para o cálculo das rotas) é o das economias de Clarke; Wrigth (1964) e este não trata das restrições de precedência. Com isso, apesar dos bons resultados encontrados o problema não foi modelado no contexto real.

Outro problema desta modelagem é que os alunos que se destinavam às escolas das áreas rurais do município deixaram de ser atendidos pelo problema que contemplou somente os destinados à zona urbana. A possibilidade de contemplar também os alunos destinados a estas escolas pode ser importante para diminuir os custos decorridos de dispor ônibus para coletar estes alunos e também melhorar a taxa de ocupação nos veículos utilizados, pois estas escolas ficam no caminho de coleta de muitos alunos que se destinam à zona urbana.

Com base nos exemplos apresentados, nas particularidades do TER e na revisão bibliográfica sobre o PRV, pode-se dizer que no Brasil não existem até o momento desta pesquisa algoritmos desenvolvidos para tratar o TER e o uso dos já existentes para resolver o problema não trouxe resultados praticáveis em problemas reais.

Desse modo, faz-se necessária a implementação de um algoritmo que trate o TER de forma a levar em consideração as restrições e as particularidades do problema.

### 3.5 Observações Conclusivas

Este capítulo procurou descrever e caracterizar os problemas de roteirização de veículos e as estratégias utilizadas para sua solução com o objetivo principal de conceituar os problemas de roteirização e programação que dizem respeito ao transporte escolar, em especial o rural, que é o objeto de estudo.

Existem duas abordagens principais para tratar do problema, uma baseada nas escolas e outra baseada nos alunos. Foi possível perceber que a abordagem baseada nas escolas é facilmente aplicada à zona urbana, mas existem algumas características que impedem o uso desta para a zona rural dos municípios brasileiros, obrigando o uso da abordagem baseada nos alunos e com isso, impedindo a utilização de alguns algoritmos que não levam em consideração as restrições de precedência que surgem com a aplicação dessa decomposição.

Por fim, com tudo que é exposto conclui-se que não existem até o momento no Brasil um algoritmo que trate o problema levando em consideração suas características e restrições, fazendo-se necessário implementá-lo.

## 4 ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO

Este capítulo descreve a estratégia de solução adotada para o desenvolvimento da pesquisa. Utilizou-se para a implementação do algoritmo de roteirização, um Sistema de Informações Geográficas (TransCAD) e um módulo de programação que permite que novas funcionalidades sejam inseridas para resolver problemas específicos, não tratados pelos procedimentos já existentes no TransCAD, o GISDK.

### 4.1 TransCAD e GISDK

Sistemas de Informações Geográfica (SIG) são ferramentas importantes quando se trata de problemas que envolvem a localização geográfica como cidades, casas, escolas, ruas, empresas, redes de esgoto, redes de transmissão de energia, dentre outros; facilitando a tomada de decisão em diversas áreas, tais como planejamento urbano, gestão de recursos naturais, transporte, saúde e educação.

Na área de logística e transporte estas ferramentas se fazem cada vez mais úteis e são denominadas SIG-T, ou seja, Sistemas de Informações Geográficas para Transporte. Vários problemas de transporte podem ser tratados com a utilização de SIG-T como, por exemplo: roteirização de veículos, definição de menor caminho, alocação de facilidades, etc.

Dentre os diversos SIGs existentes, foi utilizado neste trabalho o TransCAD (CALIPER, 1996). O TransCAD é um SIG projetado especificamente para planejar, gerenciar e realizar operação e análise das características dos sistemas de transporte e aplicações logísticas, caracterizando-se, portanto, como um SIG-T.

O TransCAD inclui diversos procedimentos para planejamento de sistemas de transporte como: modelos de previsão de demanda, cálculo de caminhos mínimos, modelos de localização de instalações, procedimentos para roteirização de veículos, dentre outros.

Além das funcionalidades já implementadas, o TransCAD disponibiliza um kit de programação que permite que novas funcionalidades sejam inseridas para resolver problemas específicos, não tratados pelos módulos existentes: o GISDK (*Geographic Information System Developer's Kit*).

O GISDK é um kit de programação que utiliza a linguagem *Caliper Script* (uma linguagem de programação estruturada) e baseia-se no uso de procedimentos macro e *dbox* (*dialog box*). Tais funções são métodos comuns a toda linguagem de programação, a

diferença, neste caso, encontra-se na consideração de elementos gráficos pela *dbox*, que são responsáveis pela interação com o usuário (CALIPER, 1996).

Existem três modos para utilização do GISDK:

- Criação de “*Add-Ins*”: permite que o usuário estenda a capacidade do TransCAD, por exemplo, criando atalhos para operações que são executadas frequentemente;
- Criação de “*Custom Application*”: são aplicações que possuem interface própria, com menus, barra de ferramentas, caixas de diálogo; como em qualquer outro programa;
- Criação de “*Server Application*”: neste caso o TransCAD é utilizado como um servidor de mapas e de análise de funções espaciais para programas clientes. O programa cliente pode ser escrito em Visual Basic, C, C++, ou qualquer outra linguagem, incluindo linguagem macro de outras aplicações, como o *Excel*.

#### **4.1.1 Interface de Acesso às Funcionalidades GISDK**

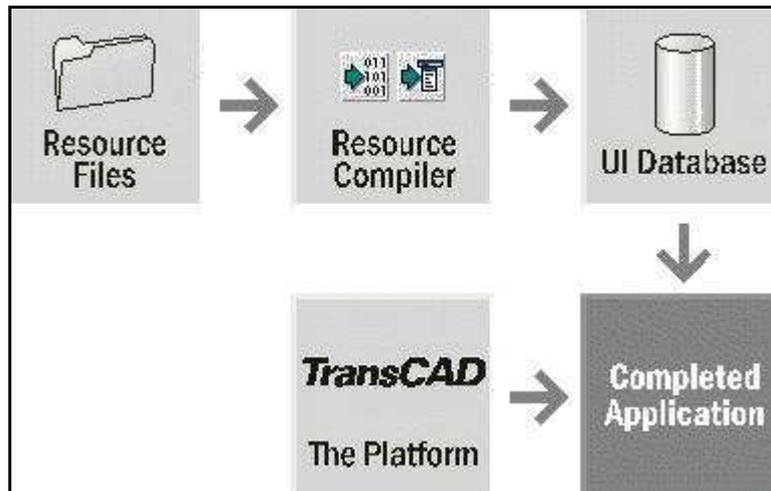
Para os usuários comuns, o TransCAD é um programa como outro qualquer, porém, o usuário que desenvolve em GISDK trabalha com duas partes distintas: a plataforma e a interface com o usuário (*UI - User Interface*). Apesar da distinção entre ambas, elas não podem ser utilizadas separadamente (CALIPER, 1996).

A plataforma é o centro do SIG e do sistema gerenciador de banco de dados (DBMS) e é usada na criação de mapas e realização das análises destes mapas e dados. A plataforma é composta por um arquivo executável (TCW.exe), várias bibliotecas (Dlls) e outros arquivos de suporte ao programa. A interface com o usuário é composta por um conjunto de menus, caixas de diálogos e ferramentas. Isto permite ao usuário acessar as funcionalidades e recursos disponíveis no sistema. As interfaces são armazenadas em bancos de dados, chamados de Bancos de Dados da Interface com o Usuário (*UI Database*).

Quando um usuário cria uma aplicação em GISDK, ele está criando sua própria *UI database*. Quando esta aplicação é executada, a plataforma e a *UI database* estão trabalhando juntas para gerar os resultados para os quais a aplicação foi programada.

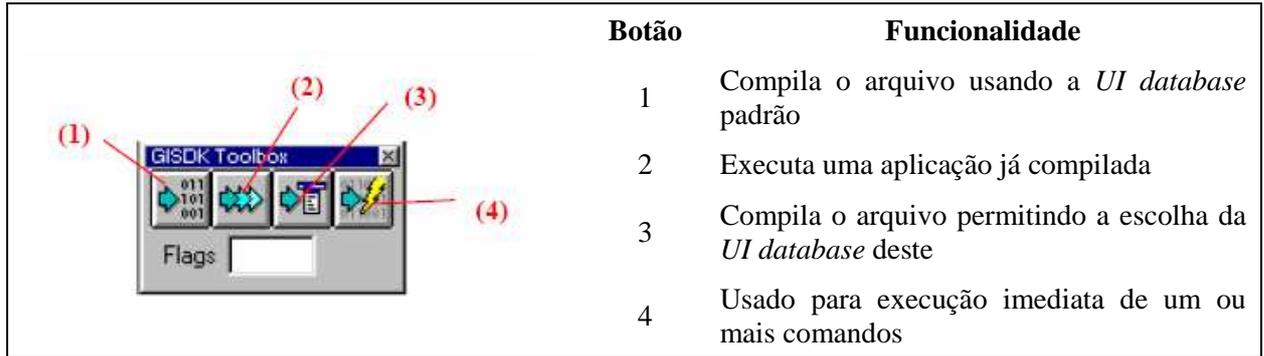
Os programas escritos em GISDK são armazenados em arquivos textos conhecidos como “*resource file*”. Nestes arquivos fica toda a estrutura do programa, caixa de diálogo, caixa de ferramentas e macros que serão utilizadas quando o programa for executado.

Depois de escritos, os programas devem ser compilados, para que erros de sintaxe ou funções que não existam possam ser identificados antes do programa ser executado. O programa responsável por isso é denominado “*Resource Compiler*”. Este programa gera um conjunto de arquivos necessários para a correta utilização do programa implementado. Este conjunto de arquivos é chamado *UI database*. Se o programa estiver correto, após passar pelo “*Resource Compiler*” estará pronto para ser utilizado, caso contrário será exibido um arquivo de erros, mostrando a linha aproximada e o tipo de erro. A Figura 4.1 mostra o processo pelo qual um programa escrito em GISDK passa até poder ser utilizado por um usuário, como descrito anteriormente.



**Figura 4.1** – Fluxo para compilação e execução de um programa escrito em GISDK  
 Fonte: Caliper (1996)

Para compilar um arquivo ou executar as aplicações já compiladas escritas em GISDK, o TransCAD apresenta uma ferramenta chamada *GISDK Toolbox* como mostra a Figura 4.2.



**Figura 4.2 - GISDK Toolbox**

Fonte: Peixoto; Senne (2002)

É possível observar que existem dois botões para compilar os arquivos, a diferença básica entre eles é que o botão (1) gera uma *UI database* dando um nome padrão definido internamente, já o botão (3) permite que o usuário escolha o nome que será dado ao arquivo compilado. Geralmente o botão (1) é utilizado somente nos testes iniciais das aplicações desenvolvidas, já o botão (3) é utilizado quando a aplicação está pronta; para que esta possa ser executada várias vezes sem a necessidade de ser compilada a cada utilização.

O GISDK dispõe de centenas de funções que podem ser utilizadas para criação de mapas, análise espacial e criação de aplicações personalizadas. Dentre elas podem ser destacadas:

- Manipulação de mapas: possui funções tanto para criar mapas, fazer seleções, adicionar camadas aos mapas, criar mapas temáticos, dentre outras;
- Análise de dados geográficos: funções para calcular a distância entre dois pontos, captura de pontos e outros dados geográficos escolhidos pelo usuário através de um “click” numa área do mapa, dentre outras;
- Tabelas: funções para criação, edição, junção de tabelas, captura de dados, e outras;
- Redes: obtenção de menores caminhos, criação e manipulação de redes;
- Rotas: funções para criação e edição de rotas.

Este kit de programação permite um grande salto na melhoria das funcionalidades presentes no TransCAD podendo agilizar algumas tarefas, tornar a interface com o usuário ainda mais amigável e suprir algumas carências não disponíveis pelo programa.

## 4.2 Algoritmo para Roteirização do TER

Uma dessas carências do TransCAD é não tratar o problema de roteirização para o TER de forma mais realista, como pode ser observado em Almeida (1998) e já discutido no Capítulo 3. Assim sendo, o GISDK foi utilizado para criar uma ferramenta para a geração das rotas para o TER no TransCAD, a fim de se aproximar um pouco mais da realidade do problema.

Em termos práticos o problema de roteirização e programação para o TER pode ser descrito como segue:

Um número finito de alunos espalhados pela zona rural do município devem ser apanhados em seus pontos de embarque (fazendas ou o mais próximos delas) e levados para as escolas localizadas na zona urbana ou mesmo na zona rural do município. Pode ocorrer que alunos com destino a diferentes escolas viajem no mesmo ônibus e, por isso, é necessário que, para cada ponto de embarque se conheça a quantidade de alunos e os pontos de desembarque (escolas) para os quais estes serão levados.

Estas características são típicas dos problemas *dial-a-ride* e, portanto, é possível caracterizar o problema de roteirização e programação do transporte escolar rural como um caso particular deste problema. Esta abordagem permite uma maior investigação do problema e conseqüentemente a possibilidade de encontrar uma solução mais próxima do ótimo.

Em termos de modelagem o *dial-a-ride* para o TER foi tratado de forma estática, com restrições de tempo (janelas de tempo) e de capacidade dos veículos, frota homogênea e garagem única.

O objetivo do problema é minimizar a quilometragem total percorrida pela frota e o número de veículos utilizados, tentando conseguir assim, um serviço de boa qualidade com o menor custo financeiro possível.

A ferramenta foi implementada na forma de uma “*Add-In*” que adiciona mais um menu à interface do TransCAD e permite ao usuário acessar as funcionalidades da ferramenta desenvolvida. A ferramenta é composta por um algoritmo que é utilizado para o cálculo das rotas e por uma interface para que o usuário entre com os dados necessários para o algoritmo realizar este cálculo; além de possibilitar a consulta de cada rota individualmente.

A ferramenta gera como saída a visualização das rotas no mapa, além de um relatório com o itinerário de cada rota. A seção 4.2.4 abordará a interface, os dados de entrada

e os dados de saída da ferramenta e o Apêndice A traz um manual com todas as informações para utilização da ferramenta.

A seguir será explicitado o método de solução utilizado como referência para cálculo das rotas e logo após as modificações para adaptação deste método ao TER.

#### **4.2.1 Método de Solução**

O método de solução utilizado é composto de duas etapas. Inicialmente é gerada uma solução inicial para o problema baseada na Heurística de Inserção Paralela, implementada por Znamensky (2000). Esta solução é melhorada através de processos de busca local interrota e intrarrota, baseadas nos trabalhos de Znamensky (2000) e de Mauri (2006).

Os procedimentos interrota testam possíveis trocas de solicitações entre rotas distintas, buscando otimizar e/ou diminuir o número de rotas já encontrado. Já os procedimentos intrarrota buscam trocas possíveis dos pontos de parada (embarque ou desembarque) dentro da rota tentando assim otimizar a distância percorrida.

Vale ressaltar que os dois trabalhos aqui citados tratam do transporte de pessoas com necessidades especiais, que possuem características diferentes do TER. Dessa forma, foram necessárias algumas adaptações para que as heurísticas pudessem ser utilizadas nesta pesquisa.

A escolha dessas heurísticas para uso no TER foi devido à simplicidade de suas implementações e aos bons resultados encontrados nos trabalhos que faziam referências a elas. A seguir serão explicitadas as heurísticas utilizadas, para depois serem apresentadas as implementações para o TER.

##### **4.2.1.1 Heurística de Inserção Paralela**

A heurística implementada por Znamensky (2000) foi baseada no trabalho de Madsen et al. (1995). Segundo o autor, esta heurística é de tal forma genérica que permite a utilização de frota heterogênea, inclusive com custos e características operacionais distintos para cada veículo.

Segundo Znamensky (2000) inicialmente as solicitações são ordenadas por ordem decrescente de “dificuldade”. A idéia de ordenar as solicitações por “dificuldade” tem

por intenção priorizar a programação das solicitações para as quais as restrições de horários são mais rígidas, bem como aquelas cuja demanda em número de assentos e cadeiras de rodas sejam maior, pois nos estágios iniciais da heurística as rotas estão mais vazias e há um número maior de alternativas de inserções viáveis.

É calculado então o custo de inserção da solicitação mais “difícil” em todas as rotas disponíveis (em todos os veículos, utilizados ou não), caso isso seja possível. Essa solicitação mais “difícil” é inserida na rota que acarrete o menor acréscimo de custo, se tal rota existir. Caso contrário, a solicitação é inserida numa lista de solicitações não atendidas. Em seguida, o mesmo processo se repete com a solicitação seguinte mais “difícil”, seguindo uma ordem não crescente de dificuldade, até que todas as solicitações tenham sido processadas (ZNAMENSKY, 2000).

O não atendimento de uma solicitação pode ocorrer, por exemplo, quando não houver mais veículos disponíveis, e a mesma não puder ser inserida em nenhum veículo com outros atendimentos já programados.

Na Figura 4.3 está mostrado o pseudocódigo do método de Inserção Paralela proposto por Znamensky (2000).

|    |                                                                                      |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | <b>início</b> // inserção paralela //                                                |
| 2  | Ordenar solicitações por “dificuldade”                                               |
| 3  | $X \leftarrow$ Solicitação mais “difícil”                                            |
| 4  | <b>enquanto</b> há solicitações não inseridas <b>faça</b>                            |
| 5  | <b>início</b>                                                                        |
| 6  | $C_{min} \leftarrow \infty$ ; $V_{min} \leftarrow 0$                                 |
| 7  | <b>para</b> $V=1$ até <i>Número_de_Veículos</i> <b>faça</b>                          |
| 8  | <b>início</b>                                                                        |
| 9  | $C \leftarrow$ Custo de inserir $X$ na rota do veículo $V$                           |
| 10 | <b>se</b> $C < C_{min}$ <b>então</b> $C_{min} \leftarrow C$ ; $V_{min} \leftarrow V$ |
| 11 | <b>fim</b>                                                                           |
| 12 | <b>se</b> $V_{min} = 0$ <b>então</b>                                                 |
| 13 | Colocar $X$ na lista de solicitações não roteirizadas                                |
| 14 | <b>senão</b> Inserir $X$ na rota do veículo $V_{min}$                                |
| 15 | $X \leftarrow$ Próxima solicitação mais “difícil”                                    |
| 16 | <b>fim</b> // enquanto //                                                            |
| 17 | <b>fim</b> // inserção paralela //                                                   |

**Figura 4.3** - Heurística de Inserção Paralela

Fonte: Znamensky (2000)

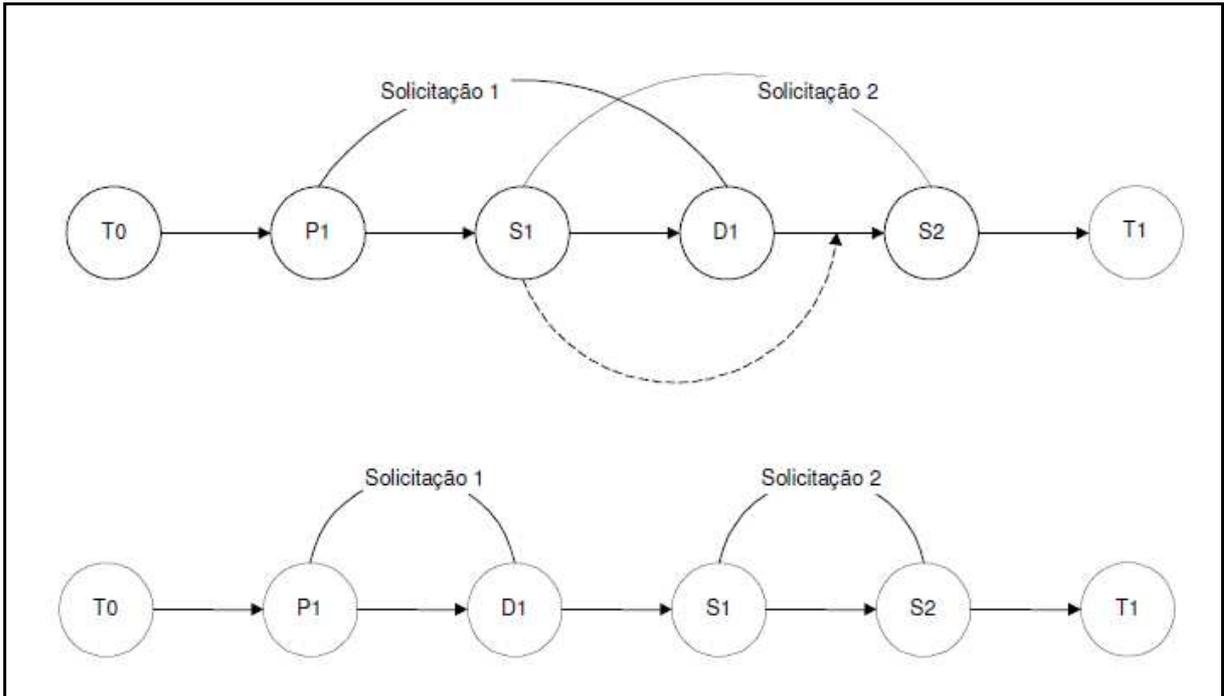
O ponto crucial de toda heurística é naturalmente o cálculo do custo de inserção de uma solicitação em uma determinada rota (linha 9 da Figura 4.3) pois, devem ser analisadas todas as restrições envolvidas no problema e a função objetivo a cada nova inserção na rota, tornando o processo mais custoso em termos computacionais. Madsen et al. (1995) mostraram que se aproveitando das restrições de janelas de tempo e de capacidade é possível tornar o método mais eficiente (ZNAMENKY, 2000). Este procedimento é descrito a seguir.

Por hipótese, todas as rotas possuem ao menos duas paradas  $T_0$  e  $T_1$ , correspondentes à garagem. A coleta e a entrega da solicitação a ser inserida são denominadas  $S_1$  e  $S_2$ , respectivamente. Por uma questão de facilidade e de visualização, as paradas são imaginadas dispostas da esquerda para direita, na sequência da programação da rota. Portanto, “mover uma parada para direita” significa trocar a ordem na roteirização com a parada imediatamente posterior (à direita) da parada em questão. Essa estratégia é detalhada a seguir, e exemplificada na Figura 4.4.

Passo 1: Inserir  $S_1$ ,  $S_2$  imediatamente após a parada  $T_0$  e atualizar os horários da rota.

Passo 2: Enquanto houver posições de inserção a testar fazer:

- a) Se  $S_2$  está imediatamente antes da última parada  $T_1$ , então mover  $S_1$  uma parada para a direita, inserir  $S_2$  imediatamente após  $S_1$  (ver figura 4.4) e atualizar os horários da rota.
- b) Verificar viabilidade da inserção:
  - i. Se a inserção é viável, isto é, não viola nenhuma restrição de janela de tempo, nem restrições de capacidade no veículo, então calcular a variação na função objetivo e comparar a variação das posições previamente testadas.
  - ii. Se a inserção não é viável, checar as seguintes condições:
    - A. Se a restrição de capacidade, tempo máximo de permanência no veículo, ou a janela de tempo de  $S_2$  foi violada, então mover  $S_1$  uma parada para direita, inserir  $S_2$  imediatamente após  $S_1$  e atualizar os horários da rota. Voltar ao passo 2, item (b).
    - B. Se a janela de tempo de  $S_1$  foi violada então parar.
    - C. Caso contrário voltar ao passo 2.



**Figura 4.4** - Roteirização antes e depois de mover a parada  $S1$  para a direita.  
Fonte: Znamensky (2000)

Em síntese, avança-se o embarque  $S1$  no tempo, testando-se as diferentes posições viáveis do desembarque  $S2$  para cada posição de embarque  $S1$ . A partir do momento que a janela de tempo do embarque  $S1$  é violada, não é necessário prosseguir a análise das demais posições de inserção.

#### 4.2.1.2 Processo de Melhoria

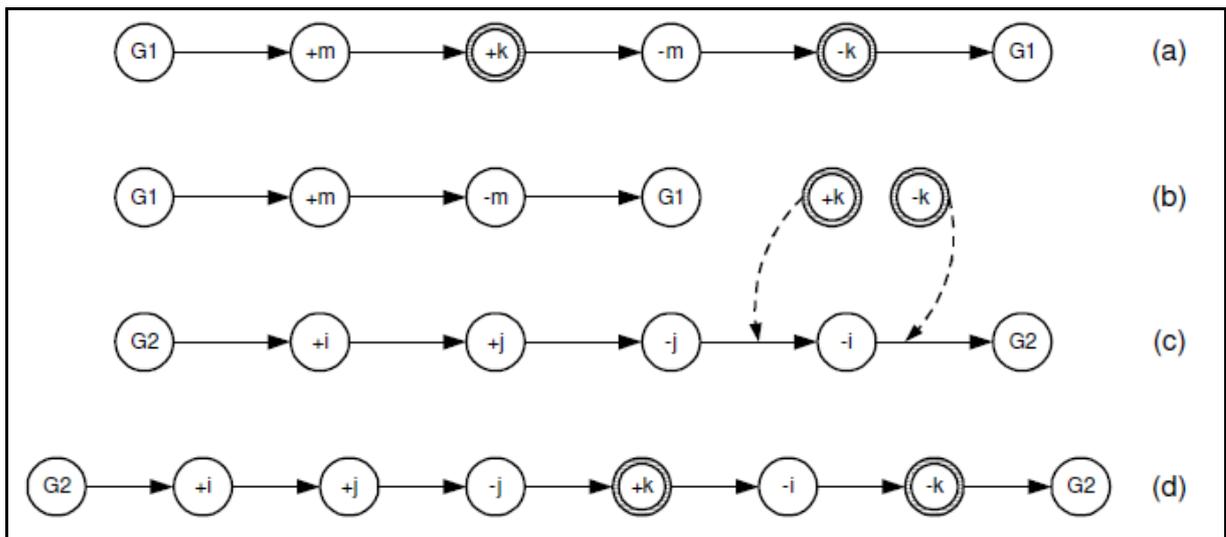
O objetivo de um processo de melhoria é aprimorar os resultados da solução inicial, pois, tratando-se esta de uma heurística é possível supor que estes não sejam o ótimo então, um processo de busca local pode trazer melhorias nos resultados já encontrados.

Três procedimentos foram implementados, dois deles foram baseados no trabalho de Znamensky (2000) e um terceiro baseado no trabalho de Mauri (2006). Os procedimentos baseados no trabalho de Znamensky são: (a) Reinserção de Solicitação e (b) Troca de Solicitações (os dois são procedimentos interrotas). Do trabalho de Mauri (2006) o procedimento é o (c) Re-ordenar rota (intrarota).

##### a) Reinserção de Solicitação

Segundo Znamensky (2000) o procedimento de Reinscrição de Solicitações pode ser assim definido: remover a solicitação  $i$  de sua rota original, e reinscrever as paradas correspondentes nas melhores posições viáveis dentre as rotas disponíveis. Podem ocorrer casos em que a melhor inserção seja na rota original, correspondendo à troca intrarota.

Na Figura 4.5 há um exemplo da aplicação do procedimento de Reinscrição. O autor convencionou que a coleta de um cliente será antecedida de um sinal positivo (+) e a entrega do mesmo com um sinal negativo (-). A rota inicial nessa figura é a rota  $(G1,+m,+k,-m,-k,G1)$ , onde  $G1$  é a garagem (Figura 4.5 (a)). A solicitação  $k$  é então desligada de sua rota original (Figura 4.5 (b)) e buscam-se as melhores posições viáveis para reinscrição das paradas  $+k$  e  $-k$  no conjunto de todas as rotas possíveis. As paradas são então inseridas na rota  $(G2,+i,+j,-j,-i,G2)$  (Figura 4.5 (c)), nas posições que acarretem o menor acréscimo de custo, ficando a nova sequência de atendimentos da forma mostrada na Figura 4.5 (d).



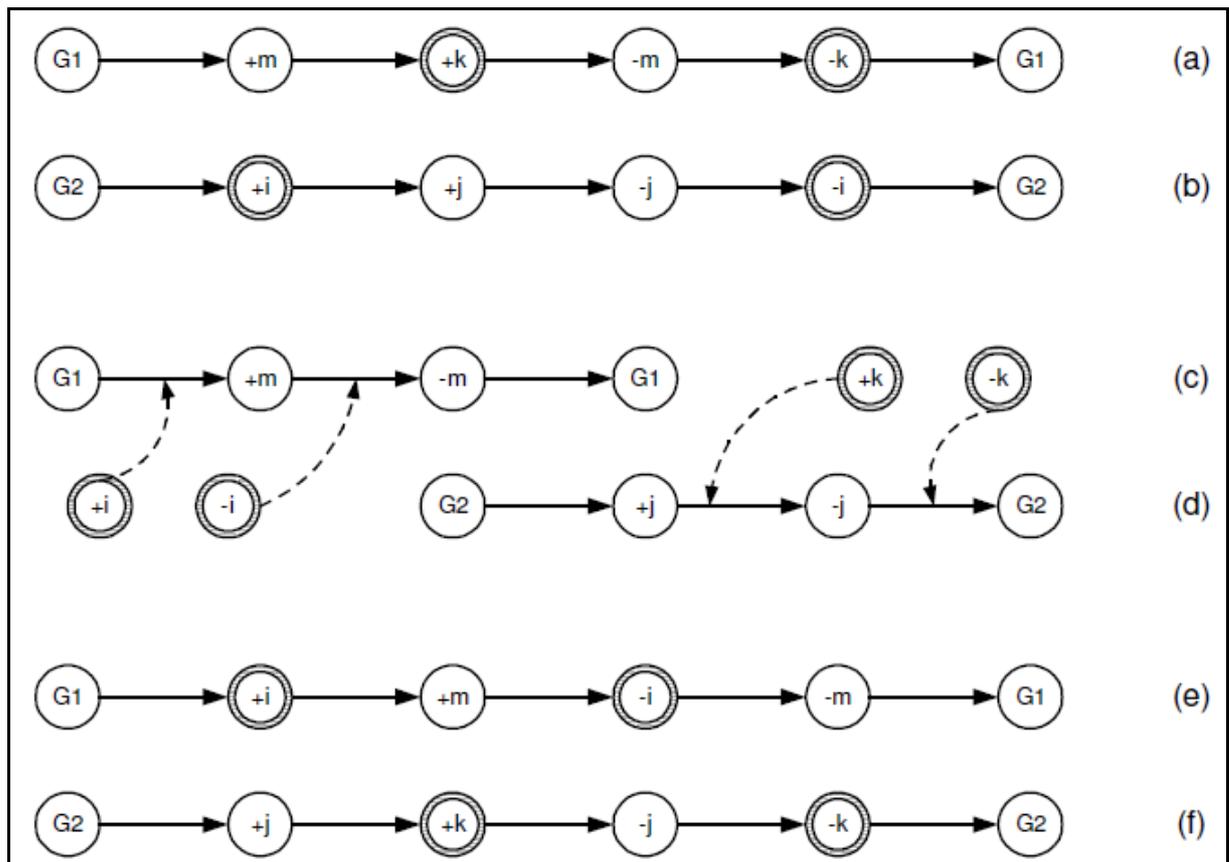
**Figura 4.5** – Exemplo de procedimento de reinscrição de solicitações

Fonte: Znamensky (2000)

#### b) Troca de Solicitações

O procedimento de Troca de Solicitações é descrito da seguinte forma: remover as solicitações  $i$  e  $j$  de suas rotas originais (necessariamente distintas), reinscrever as paradas correspondentes à solicitação  $i$  nas melhores posições viáveis na rota original da solicitação  $j$ , e analogamente reinscrever as paradas correspondentes à solicitação  $j$  nas melhores posições viáveis na rota original da solicitação  $i$  (ZNAMENSKY, 2000).

A Figura 4.6 mostra o processo de troca de solicitações entre duas rotas (4.6 (a) e 4.6 (b)). Inicialmente, a solicitação  $k$  é retirada de sua rota original ( $G1,+m,+k,-m,-k,G1$ ) ( Figura 4.6 (c)), o mesmo ocorrendo com a solicitação  $i$ , que é desligada de sua rota original ( $G2,+i,+j,-j,-i,G2$ ) (4.6 (d)). As solicitações  $i$  e  $k$  são então reinseridas trocando-se as rotas originais, buscando-se sempre as melhores posições viáveis de inserção o que resultou nas rotas mostradas na Figura 4.6 (e) e 4.6 (f).



**Figura 4.6** – Exemplo de procedimento de troca de solicitações

Fonte: Znamensky (2000)

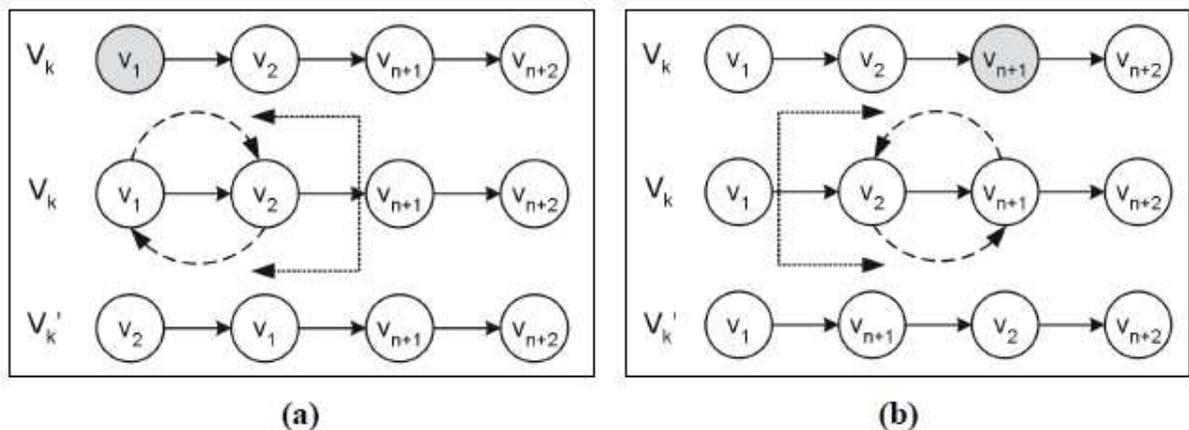
No procedimento de troca de solicitações a busca por posições viáveis é feita inicialmente em todas as rotas existentes, só então é realizada a troca, que corresponde à troca viável que resulte em maior diminuição do custo total (ZNAMENSKY, 2000).

### c) Re-ordenar Rota

Segundo Mauri (2006) o procedimento Re-ordenar rota consiste basicamente em selecionar uma rota qualquer pertencente à solução, selecionar um ponto qualquer nessa

rota, selecionar uma nova posição para esse ponto e trocar sua posição para a nova rota, isto pode ser visto na Figura 4.7.

Como é selecionado somente um ponto, este pode ser embarque ou desembarque. No primeiro caso (4.7 (a)) onde o ponto de embarque escolhido é  $(v_1)$ , a nova posição deverá, obrigatoriamente ser **anterior** ao seu respectivo ponto de desembarque  $(v_{n+1})$ . Já no segundo caso (4.7 (b)) que tem como ponto de desembarque escolhido o ponto  $(v_{n+1})$ , a nova posição deverá ser **posterior** ao seu respectivo ponto de embarque  $(v_1)$ . Esses “limites” são apresentados através das linhas pontilhadas na Figura 4.7.



**Figura 4.7** – Movimento Re-ordenar rota  
Fonte: Mauri (2006)

#### 4.2.2 Implementação do método de solução para o TER

Nesta seção descreve-se como os procedimentos descritos na seção 4.2.1 foram adaptados para o TER. Inicialmente será tratada a implementação da solução inicial, a seguir, o processo de melhoria é apresentado e por fim como estes algoritmos interagem para encontrar a solução final do problema.

Para facilitar o entendimento da implementação é assumida a seguinte notação:

$F = \{1,2,3,\dots,x\}$ , conjunto de pontos de embarque ou fazendas onde os alunos esperam os veículos que os levarão até as suas respectivas escolas.

$E = \{1,2,3,\dots,y\}$ , conjunto de pontos de desembarque ou escolas onde os alunos serão deixados.

O conjunto  $P$  ( $P = F \cup E$ ) é o universo de pontos a serem visitados pelo conjunto de rotas que compõem a solução do problema.

O conjunto de pares  $Fx, Ey$  corresponde a demanda  $D = \{1, 2, 3, \dots, t\}$  de alunos a ser roteirizada.

O agrupamento destes pares por ponto de embarque  $Fx$  e em cada ponto de embarque  $Fx$  por ponto de desembarque  $Ey$ , ou seja, por fazenda e em cada fazenda por escola corresponde às solicitações  $S = \{1, 2, 3, \dots, i\}$  a serem atendidas.

$R = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ , representa conjunto das  $n$  rotas que compõe a solução do problema.

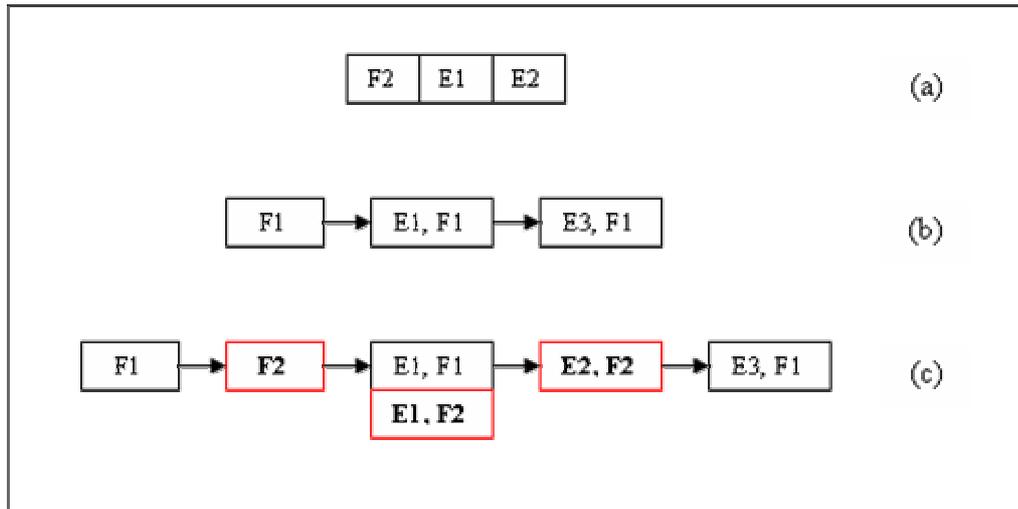
No algoritmo implementado considerou-se que a medida para avaliação da melhoria das rotas seria a quilometragem percorrida. Assim, toda vez que o texto se referir a custo, está se referindo à quilometragem percorrida.

#### 4.2.2.1 Solução Inicial

A implementação da heurística de Inserção Paralela para o TER sofreu algumas modificações em vista das particularidades do problema. Dessa forma, antes de tratar da heurística implementada para solução inicial, serão destacadas as diferenças do TER para o problema *dial-a-ride* para o transporte de pessoas com necessidades especiais e como estas foram tratadas. Adota-se aqui o termo DARP como problema *dial-a-ride* para o transporte de pessoas com necessidades especiais.

No DARP cada solicitação possui um ponto de embarque e um único ponto de desembarque. No caso do TER, no entanto, no mesmo ponto de embarque de uma solicitação pode haver mais de um ponto de desembarque, ou seja, num mesmo ponto de embarque pode haver alunos para diferentes pontos de desembarque (escolas). Assim sendo, o algoritmo deve tratar as duas possibilidades (somente uma escola por ponto de embarque ou mais de uma escola). Procurou-se ainda, agrupar os pontos de desembarque coincidentes na rota para que o ônibus não necessite visitá-los mais de uma vez.

Para entender melhor, suponha-se que exista uma solicitação  $S1$  de um ponto de embarque  $F2$  para os pontos de desembarque  $E1$  e  $E2$  (Figura 4.8 (a)) e uma determinada rota  $R1$  que já atende as solicitações da fazenda  $F1$  com desembarques nas escolas  $E1$  e  $E3$ , respectivamente (Figura 4.8 (b)). Como o ponto de desembarque  $E1$  já existe na rota e faz referência ao ponto de embarque  $F1$ , será acrescida mais uma referência para este ponto de desembarque agora para o ponto de embarque  $F2$ . A sequência mostrada na Figura 4.8 (c) é a ordem de visita dos pontos na rota  $R1$  após a inserção da solicitação  $S1$ .



**Figura 4.8** – Exemplo de inserção de solicitação com ponto de embarque já existente

Diferentemente do DARP aplicado ao transporte de pessoas com necessidades especiais, no TER um aluno não pode deixar de ser transportado. Assim, para aplicação da solução inicial é convencionado que existirá um veículo para cada ponto de embarque, desse modo, na pior das hipóteses existirá uma rota para cada ponto de embarque e garante-se que todos os alunos serão atendidos. É importante destacar que um novo veículo (rota) só é utilizado caso a solicitação (ponto de embarque e ponto(s) de desembarque) que está sendo analisada não puder ser inserida em nenhuma rota já existente respeitando as restrições do problema.

Quanto à definição do critério de dificuldade para ordenação das solicitações do TER é considerada a distância dos pontos de embarque (fazendas) até a garagem, esta ordenação é feita em ordem decrescente de distância da garagem. O objetivo é fazer com que o atendimento comece pelos pontos de embarque mais distantes de forma a tentar otimizar as rotas da solução inicial.

Após a ordenação tenta-se inserir as solicitações nas rotas que acarretem o menor acréscimo de custo, no nosso caso, que tenha a menor quilometragem percorrida e que respeitem as restrições de janela de tempo e capacidade dos veículos.

Para cada ponto de embarque é definida uma janela de tempo, esta possui um horário de início e um horário de fechamento que servem para limitar a hora de início de atendimento de um determinado ponto de embarque (horário de início) e a hora máxima que os alunos deste ponto poderão ser deixados em seus respectivos pontos de desembarque (horário de fechamento). O horário de fechamento da janela de tempo deve ser maior que o

horário de início e a diferença entre eles corresponde ao tempo máximo de viagem dos alunos do ponto de embarque especificado.

Para um melhor entendimento suponha-se que exista um ponto de embarque a ser visitado por um veículo com horário de início da janela de tempo igual à 11:00 horas e horário de fechamento igual à 12:00 horas. Então este ponto permite um tempo máximo de viagem dos alunos de 1 hora e a rota que irá atender este ponto só poderá iniciar o atendimento a partir das 11:00 horas e os alunos deverão ser deixados nas suas respectivas escolas (pontos de desembarque) antes das 12:00 horas.

Uma observação importante a ser feita, para o caso de uma solicitação ter mais de um ponto de desembarque, é que cada ponto da solicitação é inserido na rota separadamente, primeiro tenta-se inserir todos os pontos de desembarque nas posições que gerem o menor acréscimo de custo, a partir do momento que todos os pontos de desembarque foram inseridos procura-se a posição de menor custo para o ponto de embarque; se este puder ser inserido compara-se o custo inserção de todos os pontos dessa solicitação em todas as rotas já testadas, se o custo for menor esta inserção é retida.

A Inserção Paralela da forma descrita por Znamensky (2000) só é aplicada quando a solicitação tem somente um ponto de desembarque e se este ainda não existir na rota. Caso contrário cada ponto da solicitação (embarque e desembarque) é inserido separadamente como descrito anteriormente. Para otimizar o espaço de busca pela solução de menor custo, na utilização da Heurística de Inserção Paralela é aplicado a proposta de Madsen et al. (1995).

O procedimento para gerar a solução inicial para o TER pode ser assim descrito:

Passo 1: Obter a demanda ( $Dt$ ) de alunos.

Passo 2: Agrupar a demanda ( $Dt$ ) por ponto de embarque ( $Fx$ ) e em cada ponto de embarque ( $Fx$ ) por desembarque ( $Ey$ ).

Passo 3: Calcular o número de veículos a serem utilizados na solução inicial, que é igual ao número de pontos de embarque ( $Fx$ ).

Passo 4: Ordenar a demanda ( $Dt$ ) em ordem decrescente de dificuldade.

Passo 5: Enquanto houver solicitações ( $Si$ ) a serem inseridas:

- a) Se a solicitação ( $Si$ ) possui mais de um ponto de desembarque ( $Ey$ ).
  - i. Para cada rota ( $Rn$ ) pertencente à solução, percorrer as posições de cada uma verificando se o ponto de desembarque ( $Ey$ ) já existe.

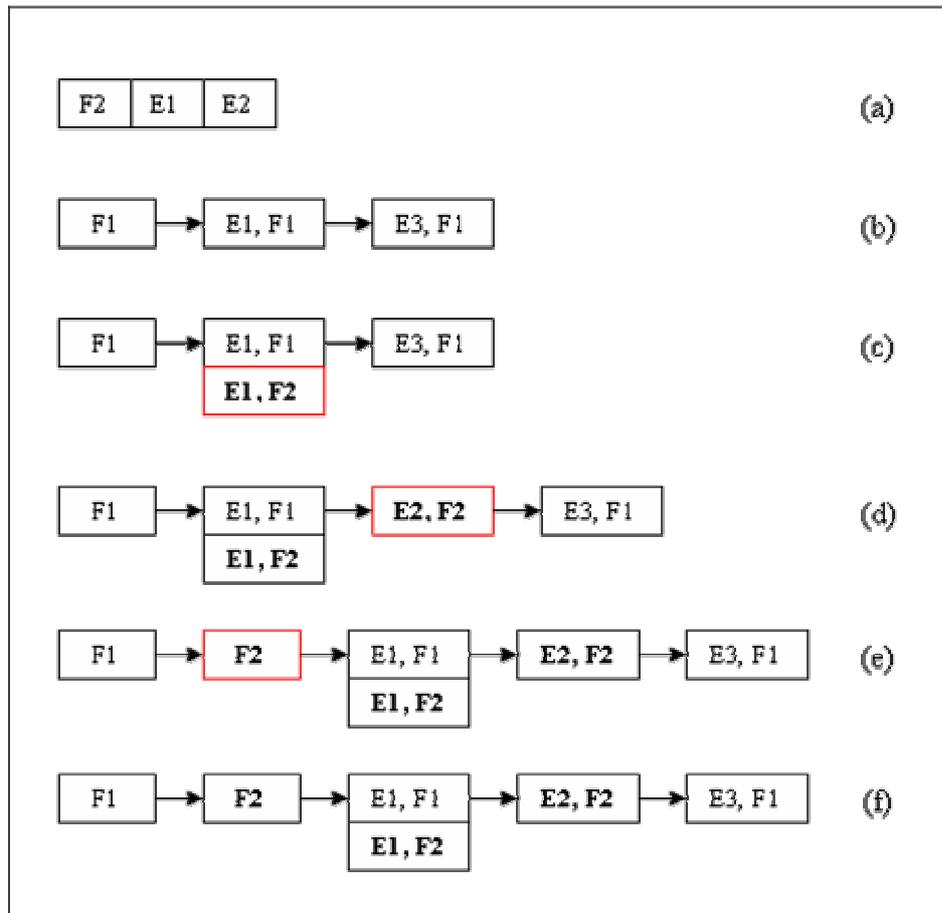
- A. Se existir, inserir este ponto no fim da lista, da posição encontrada.
  - B. Se não existir procurar a posição que acarrete o menor acréscimo de custo na rota ( $Rn$ ) para este ponto.
  - C. Se todos os pontos de desembarque ( $Ey$ ) puderem ser inseridos na rota ( $Rn$ ). Procurar a posição de inserção que acarrete o menor acréscimo de custo para o ponto de embarque ( $Fx$ ). Se tal posição existir comparar com o melhor custo de inserção conseguido até então, ou seja com aquela que apresenta a menor quilometragem percorrida, se for menor essa rota ( $Rn$ ) é aceita na solução.
- b) Se a solicitação ( $Si$ ) possui somente um ponto de desembarque ( $Ey$ )
- i. Para cada rota ( $Rn$ ) pertencente à solução, percorrer as posições de cada uma verificando se o ponto de desembarque ( $Ey$ ) já existe.
    - A. Se existir, insere este ponto de desembarque ( $Ey$ ) no fim da lista, da posição encontrada. Procurar a posição que acarrete o menor acréscimo de custo para o ponto de embarque ( $Fx$ ).
    - B. Se não existir, o procedimento de Inserção Paralela como descrito por Znamensky (2000) é executado.
- c) Se a solicitação ( $Si$ ) não puder ser atendida, pois a restrição de janela de tempo não foi satisfeita, essa solicitação é inserida numa lista de solicitações não atendidas.

Passo 6: Se após a tentativa de inserção de todas as solicitações em alguma rota existam solicitações não inseridas a ferramenta gera um arquivo texto com os pontos de embarque destas solicitações e pede ao usuário que a janela de tempo destes pontos seja alterada para que seja possível atendê-los. O procedimento de melhoria só é executado quando todas as solicitações puderem ser atendidas com a janela de tempo estipulada pelo usuário.

O exemplo da Figura 4.9 mostra uma solicitação  $S1$  a ser inserida que possui dois pontos de desembarque  $E1$  e  $E2$  (4.9 (a)) e a rota da Figura 4.9 (b). Seguindo o procedimento proposto, esta solicitação possui dois pontos de desembarque, então, primeiro procura-se para cada ponto de desembarque seguindo a ordem que aparecem na lista de solicitações (Figura 4.9 (a)) se este existe na rota. Neste caso, o primeiro ponto a ser inserido é o  $E1$  que já existe na rota, então este será inserido no fim da lista deste ponto como mostra a Figura 4.9 (c) em destaque. Em seguida o próximo ponto de desembarque ( $E2$ ) que não existe na rota é inserido na posição que acarrete o menor acréscimo de custo, como mostra a Figura 4.9 (d) em destaque.

Após todos os pontos de desembarque terem sido inseridos na rota, tenta-se inserir o ponto de embarque ( $F_2$ ) na melhor posição viável (Figura 4.9 (e)).

Todas as rotas são verificadas antes de ser definida a rota final que ficará a solicitação e a que causar menor acréscimo de custo na solução é aceita. A Figura 4.9 (f) mostra a rota final após a inserção da solicitação.



**Figura 4.9** – Exemplo de inserção de uma solicitação em uma rota.

#### 4.2.2.2 Processo de Melhoria

Como dito anteriormente três procedimentos de melhoria foram implementados com o objetivo de otimizar os resultados da solução inicial. Nesta seção descreve-se como cada um deles foi implementado e como são utilizados para a obtenção da solução final do problema.

Do mesmo modo que na solução inicial os pontos de desembarque coincidentes são agrupados na mesma posição da rota em todos os procedimentos de melhoria

implementados e se uma solicitação possui mais de um ponto de desembarque estes também são inseridos separadamente como acontece na solução inicial.

#### a) Reinserção de Solicitação

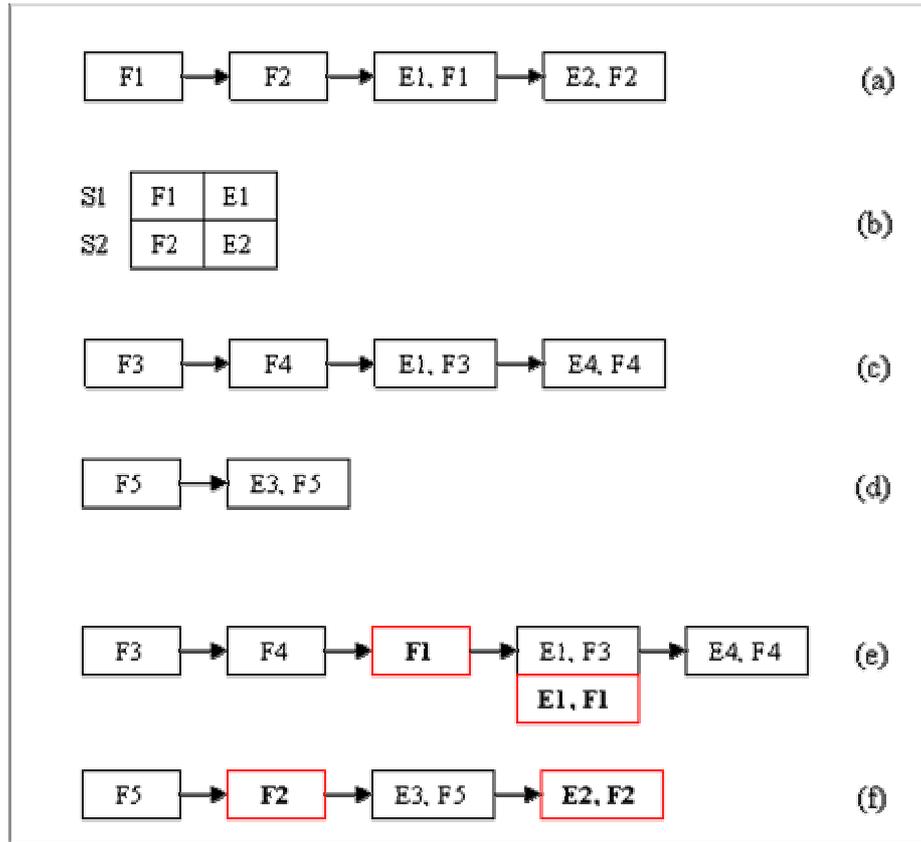
O procedimento Reinserção de Solicitação implementado para o TER, não considera a possibilidade de a solicitação continuar na mesma rota, pois o procedimento Reordena rota já irá colocar os pontos pertencentes às solicitações que compõe a rota nas posições que diminuem o custo.

O procedimento Reinserção de Solicitação pode ser descrito como segue:

Inicialmente gera-se uma lista com todas as solicitações por rota. Para cada solicitação  $S_i$  da rota ( $R_x$ ) tenta-se inserir na posição que acarrete o menor acréscimo de custo na rota ( $R_y$ ). Se a inserção for viável, ou seja, se as restrições forem respeitadas, compara-se o resultado do custo desta inserção com o menor custo já conseguido até então nas rotas já analisadas, caso seja menor, esta rota é retida. Se ao final, ou seja, após ter testado a inserção da solicitação  $S_i$  em todas as rotas pertencentes à solução, existir uma com o menor custo, retira-se essa solicitação da rota ( $R_x$ ) original e insere na rota ( $R_y$ ) com o melhor resultado. Caso contrário, a solicitação continua na mesma rota.

A Figura 4.10 apresenta um exemplo do procedimento de reinserção, existem na solução inicialmente três rotas representadas pela Figura 4.10 (a), (c) e (d), a heurística de reinserção de solicitações foi aplicada para reinserir às solicitações da rota da Figura 4.10 (a) nas outras rotas existentes. Na Figura 4.10 (b) uma lista de solicitações da rota (a) é gerada e cada posição desta lista representa uma solicitação da rota.

Para cada solicitação da rota é verificada a possibilidade de reinserção nas outras rotas existentes, o que resulta na rota da Figura 4.10 (e) que absorveu a solicitação “S1” da rota em análise e na rota da Figura 4.10 (f) que ficou com a solicitação “S2” da rota.



**Figura 4.10** – Procedimento de Reinsereir Solicitação

### b) Troca de Solicitações

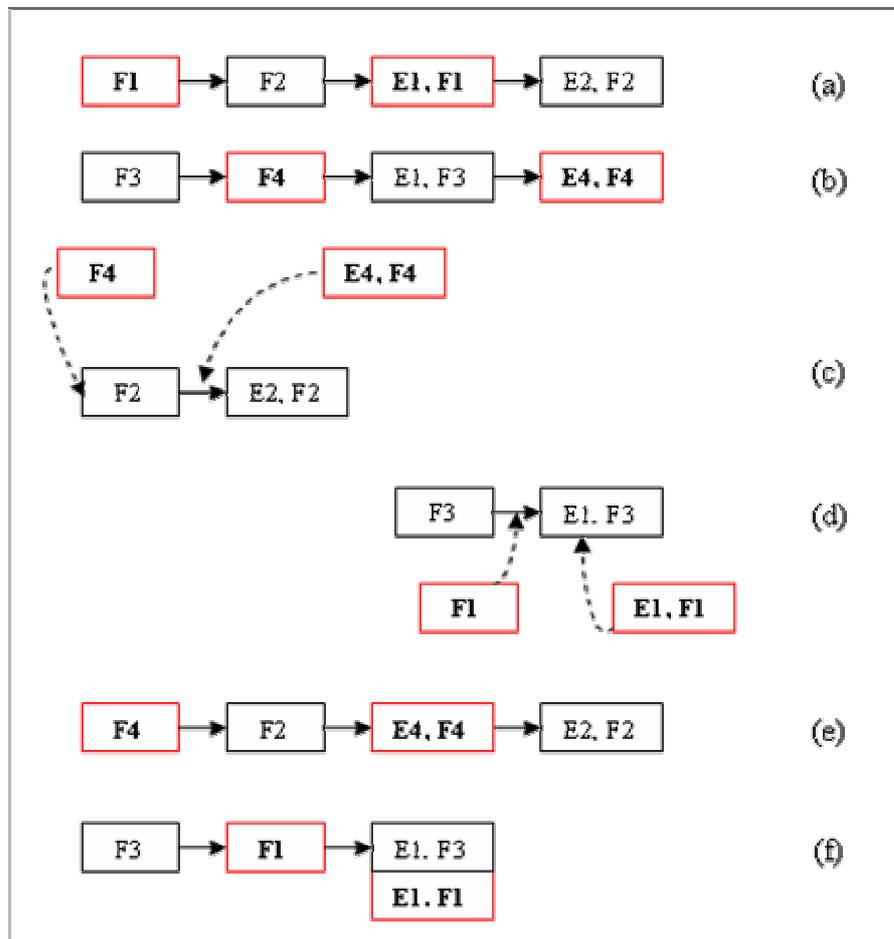
No procedimento de Troca de Solicitações implementado, para cada solicitação  $S_i$  de uma rota  $R_x$  escolhe-se aleatoriamente apenas uma solicitação  $S_j$  de uma rota  $R_y$  para que a troca aconteça. Não foram testadas todas as solicitações da rota  $R_y$  com a solicitação  $S_i$  da rota  $R_x$ , pois, tornaria o algoritmo muito lento, já que teria que testar para cada solicitação  $S_i$  da rota  $R_x$  todas as solicitações  $S_j$  da rota  $R_y$ .

O algoritmo pode ser assim descrito:

Para cada solicitação  $S_i$  de uma rota  $R_x$ , busca-se uma solicitação  $S_j$  gerada aleatoriamente numa rota  $R_y$  e tenta realizar a troca, ou seja, inserir a solicitação  $S_i$  na rota  $R_y$  e a solicitação  $S_j$  na rota  $R_x$ . Caso a soma dos custos dessa troca seja menor que a soma dos custos com as solicitações em suas rotas originais, essa troca é aceita. Todas as rotas disponíveis são testadas, guardando sempre aquela que acarretar a maior diminuição do custo, se tal troca existir ela é aceita na solução.

Na Figura 4.11 pode ser observado um exemplo de aplicação do procedimento, as rotas iniciais que servem de base para a troca estão na Figura 4.11 (a) e (b) e possuem cada uma duas solicitações, as trocas acontecem com as solicitações em destaque. A solicitação da rota da Figura 4.11 (b) a ser trocada foi escolhida de forma aleatória.

A inserção das solicitações em cada uma das rotas é feita nas posições viáveis que acarretam o menor acréscimo de custo (Figuras 4.11 (c) e (d)). É possível observar o caso do ponto de desembarque da solicitação da Figura 4.11 (a) que já existe na rota da Figura 4.11 (b), dessa forma, ele será inserido no fim da lista deste ponto como mostra a Figura 4.11 (f). As rotas finais após a troca são mostradas na Figura 4.11 (e) e (f).



**Figura 4.11** – Exemplo do procedimento Troca de Solicitações para o TER.

### c) Re-ordenar Rota

No procedimento Re-ordenar rota, para cada ponto pertencente à solução de uma rota procura-se uma outra posição que diminua os custos da rota inicial. Deve ser levado

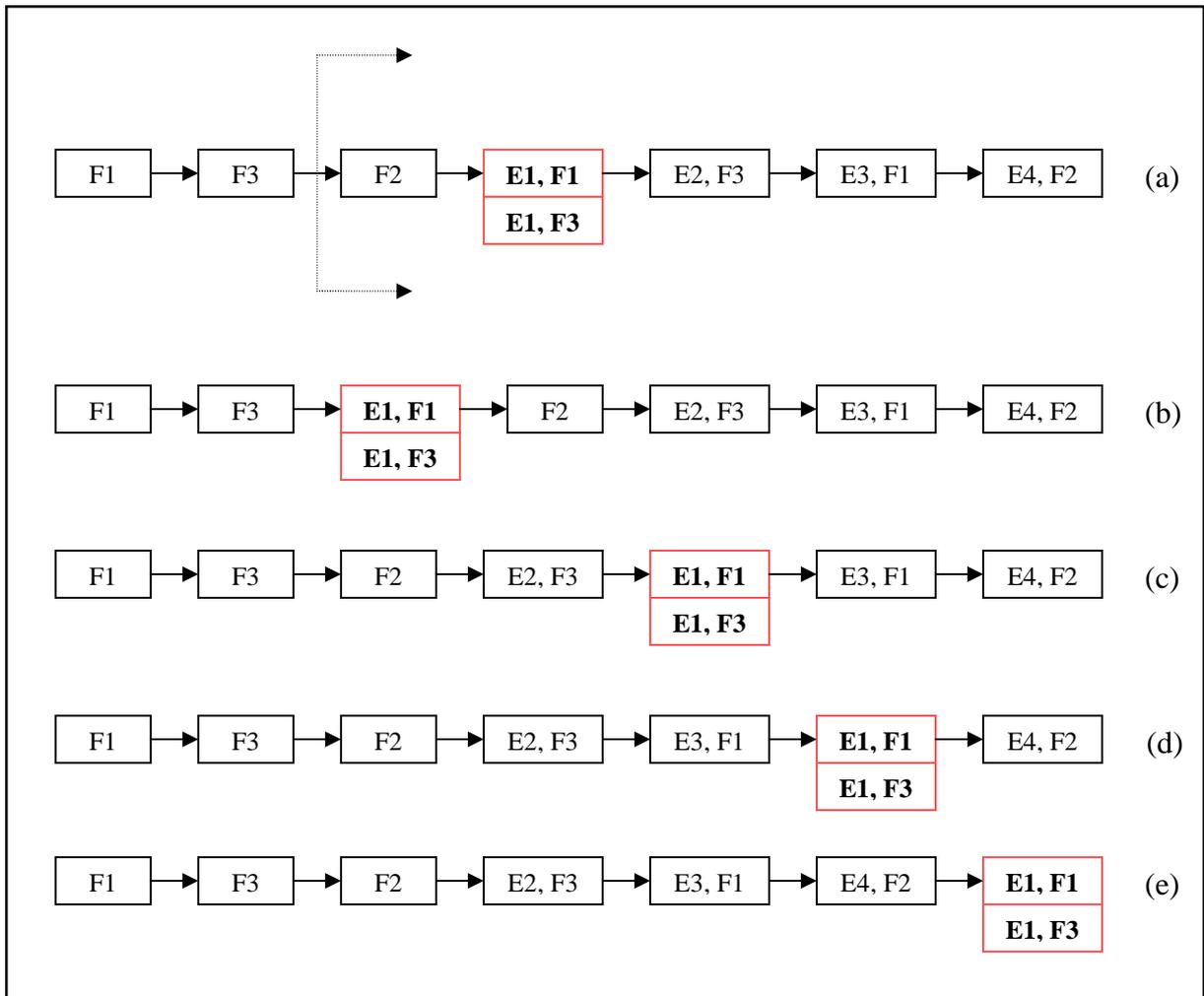
em consideração o fato de um ponto a ser modificado poder ser de embarque ou de desembarque. Isso limitará o espaço de busca pela melhor posição para o ponto.

No TER ainda existe um outro problema, quando um ponto de desembarque ( $Ey$ ) faz referência a mais de um ponto de embarque ( $Fx$ ); nesse caso é preciso verificar qual ponto de embarque ( $Fx$ ) pertencente a este ponto está por “último” dentro da rota e a partir da posição desse ponto de embarque ( $Fx$ ) para frente buscar a melhor posição do ponto de desembarque ( $Ey$ ) (o sentido da rota é sempre da esquerda para direita).

A cada mudança na posição de um ponto é verificado se as restrições são respeitadas, ou seja, se a nova solução respeita o limite das janelas de tempo e a capacidade do veículo. Caso as restrições sejam satisfeitas o procedimento verifica se o custo com a nova rota é menor que o custo com o ponto na posição original da rota, se for, essa mudança é aceita.

A Figura 4.12 mostra um exemplo que será descrito a seguir. Na rota da Figura 4.12 (a) o ponto de desembarque  $E1$  possui referência para dois pontos de embarque  $F1$  e  $F3$ , o “último” ponto de embarque a ser percorrido que o ponto de desembarque  $E1$  faz referência é o ponto de embarque  $F3$  então, o algoritmo irá buscar essa posição na rota e a partir dela procurar uma outra posição para o ponto de desembarque  $E1$ . A linha pontilhada indica de onde a busca pela melhor posição do ponto em destaque pode iniciar.

A cada iteração o ponto a ser modificado é retirado de sua posição inicial (Figura 4.12 (a)) e inserido em outras posições, essas novas posições são testadas e aquela que apresentar maior diminuição de custo comparado com a situação inicial do ponto (Figura 4.12 (a)) é aceita. Nas Figuras 4.12 (b), (c), (d) e (e) são mostradas as possíveis posições de inserção do ponto em destaque e como fica o restante dos pontos com a modificação na rota.



**Figura 4.12** – Exemplo de um ponto de desembarque que faz referência a duas fazendas

### 4.2.3 Algoritmo TER

O método de solução para o problema de roteirização e programação do TER é composto pela geração de uma solução inicial e um procedimento de melhoria que é executado certo número de vezes (iterações). O número de iterações será estabelecido após os testes realizados no estudo de caso e o melhor resultado conseguido (menor quilometragem percorrida) ao longo de todas as iterações é a solução final do problema.

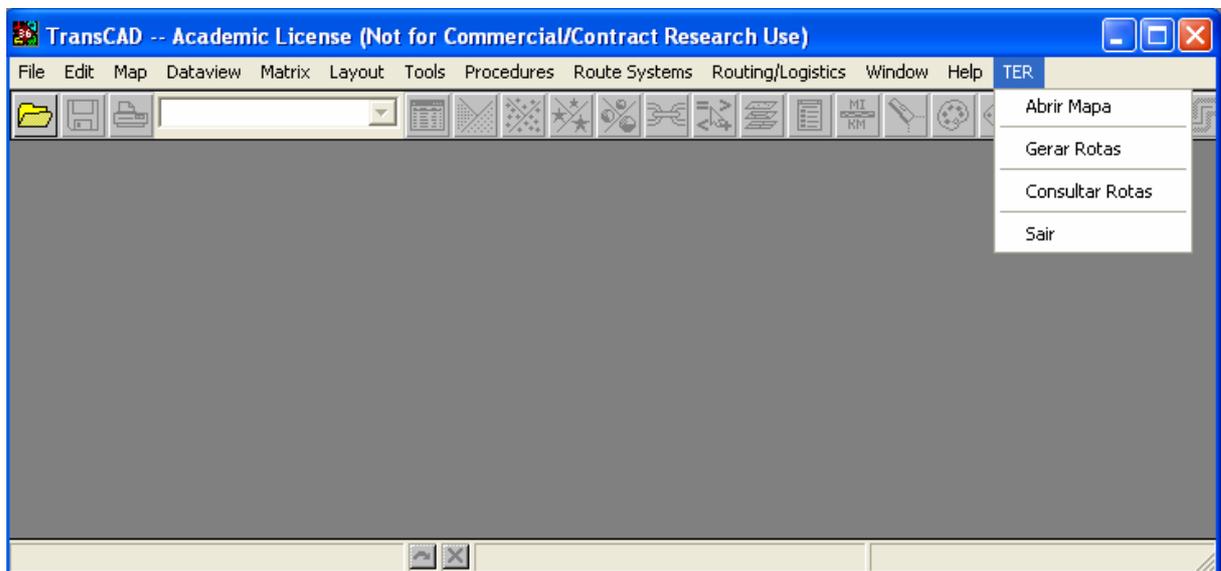
No procedimento de melhoria todas as heurísticas implementadas serão executadas a cada iteração. Isto é feito como segue: Primeiramente o procedimento Re-ordenar rota é executado para que seja possível achar a melhor posição para os pontos pertencentes às rotas, seguido pelo procedimento de Reinsere Solicitação que tenta diminuir o número de rotas utilizadas. Novamente o procedimento Re-ordenar rota é executado, seguido do procedimento de Troca de Solicitações.

O Apêndice C contém o pseudocódigo de todos os procedimentos implementados, incluindo a ordem de execução dos procedimentos para obtenção da solução final.

#### 4.2.4 Interface para o cálculo das rotas do TER

A Figura 4.13 exibe o menu responsável pelo acesso às funcionalidades chamado “TER”. Este menu é composto pelo submenu que permite a abertura do mapa que será utilizado (“Abrir Mapa”), o submenu responsável pelo cálculo das rotas (“Gerar Rotas”), o que permite a visualização das rotas individualmente (“Consultar Rotas”) e ainda o responsável por excluir o menu “TER” da barra de menus do TransCAD (“Sair”).

Nesta seção será descrito resumidamente o submenu “Gerar Rotas”, dando-se mais destaque aos dados de saída da ferramenta. O Apêndice A traz informações detalhadas de como utilizar cada um destes submenus, além de todos os dados iniciais necessários para que a ferramenta funcione corretamente.



**Figura 4.13** – Janela do TransCAD exibindo a ferramenta para o TER

Selecionando o submenu “Gerar Rotas” será exibida a caixa de diálogos da Figura 4.14. Esta é a interface da ferramenta responsável pela definição das rotas e permite que o usuário entre com os dados necessários para que este procedimento possa ser efetuado.

Esta caixa de diálogo está dividida em três partes: (1) na guia “Arquivos” o usuário deverá localizar o arquivo com a demanda de alunos que precisam ser apanhados nos

pontos de embarque e levados para suas respectivas escolas, (2) na guia “Configurações” o usuário deve escolher o turno para o qual as rotas serão geradas e informar também a capacidade dos veículos, (3) a guia “Escolha Camadas” é responsável por coletar os dados do mapa.

O mapa a ser utilizado deve conter quatro camadas e nestas camadas alguns atributos devem ser informados:

1. Fazendas:

Nesta camada estão os pontos que representam as fazendas (pontos de embarque) onde os alunos devem ser apanhados. O usuário deve informar o nome da camada que representa as fazendas, o atributo que representa o nome da fazenda, o atributo que representa o código que foi utilizado para gerar o arquivo de demanda, o atributo que representa o horário de abertura da janela de tempo e o atributo que representa o horário de fechamento da janela de tempo;

2. Escolas:

Nesta camada estão representadas as escolas (pontos de desembarque) onde os alunos devem ser deixados. O usuário deve informar qual a camada onde estão as escolas, qual atributo nesta camada representa o nome das escolas e qual o atributo que representa o código que também foi utilizado para o arquivo de demanda;

3. Garagem:

Esta camada representa o ponto onde está localizada a garagem de onde partem os ônibus para percorrer os itinerários. É necessário informar somente o nome da camada que representa a garagem;

4. Estradas:

Esta camada representa o sistema viário (estradas). O usuário deve informar qual a camada que representa as estradas e o atributo que representa o tempo gasto para percorrer cada trecho dessas estradas.

O botão “Gerar Rotas” é responsável por executar o método de solução para a definição das rotas.

Transporte Escolar Rural

Arquivos: \_\_\_\_\_

Demanda

Configurações:

Turno: \_\_\_\_\_

Capacidade dos Veículos: \_\_\_\_\_

Escolha Camadas:

Fazendas | Escolas | Garagem | Estradas

Camada: \_\_\_\_\_

Campo Nome: \_\_\_\_\_

Cod. Fazenda: \_\_\_\_\_

Hora Abertura: \_\_\_\_\_

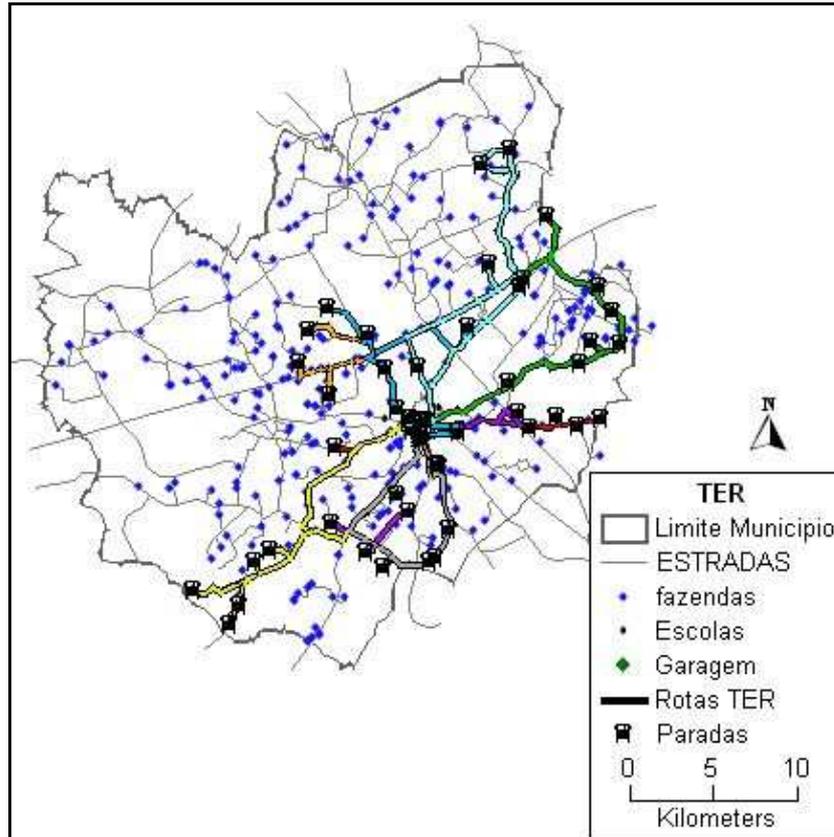
Hora Fechamento: \_\_\_\_\_

Gerar Rotas

Cancela

**Figura 4.14** – Interface de entrada de dados para cálculo das rotas

Após a definição das rotas a ferramenta gera como saída o desenho destas no mapa. A Figura 4.15 apresenta como essas rotas são desenhadas no mapa; cada linha colorida representa uma rota e cada um dos símbolos “ônibus” representa um ponto de parada do veículo que percorre o itinerário.



**Figura 4.15** – Desenho das rotas no mapa

Além do desenho das rotas a ferramenta ainda gera um arquivo texto com a descrição dos itinerários (Figura 4.16).

Rota: 1

quilometragem com alunos: 33.2km  
 quilometragem ociosa: 13.2km  
 quilometragem Total: 46.4km  
 Tempo Médio de viagem na rota: 9 Minutos  
 Hora Saída da Garagem: 17:41  
 Taxa de ocupação por Rota: 1.6

| ID: | Nome                            | Sobe | Desce | Horário | Distância |
|-----|---------------------------------|------|-------|---------|-----------|
| 0   | Garagem                         | 0    | 0     | 00:00   | 0         |
| 1   | Sítio São Luis                  | 1    | 0     | 18:00   | 11.2      |
| 2   | Sítio Boa Fortuna               | 2    | 0     | 18:04   | 13.1      |
| 3   | Fazenda Santa Cruz              | 3    | 0     | 18:08   | 14.9      |
| 4   | Profa. Dalva Vieira Itavo       | 0    | 5     | 18:22   | 22.3      |
| 5   | Profa. Maria Ubaldina B Furquim | 0    | 1     | 18:26   | 25.1      |
| 6   | Fazenda Gotardi                 | 6    | 0     | 18:33   | 31        |
| 7   | Sítio Santa Ana                 | 3    | 0     | 18:40   | 37        |
| 8   | Capitão Narciso Bertolino       | 0    | 2     | 18:41   | 38.1      |
| 9   | Dona Anita Costa                | 0    | 1     | 18:42   | 39        |
| 10  | Dr. Antonio Augusto Reis Neves  | 0    | 3     | 18:43   | 40.1      |
| 11  | Fazenda Capichaba               | 1    | 0     | 18:47   | 42.3      |
| 12  | Joaquim Miguel dos Santos       | 0    | 4     | 18:51   | 44.4      |
| 0   | Garagem                         | 0    | 0     | 00:00   | 46.4      |

**Figura 4.16** – Arquivo texto como o itinerário das rotas

Este arquivo é um relatório composto pelo itinerário de cada rota incluindo a sequência em que os pontos de embarque e desembarque são visitados, quantos alunos sobem ou descem nestes pontos, o horário de chegada em cada ponto e a distância percorrida (km) para chegar a este ponto.

É possível observar na Figura 4.16 que o primeiro e último ponto de parada de cada rota correspondem à garagem de onde partem e para onde retornam os ônibus após percorrer os pontos de embarque e desembarque pertencentes à rota.

Para cada rota o relatório também exibe a distância total percorrida carregando alunos (representada pelo campo “Quilometragem com alunos”); quilometragem ociosa (“Quilometragem Ociosa”), ou seja, quantos quilômetros o ônibus percorre vazio (da garagem até o primeiro ponto embarque da rota e do último ponto de desembarque até a garagem); a quilometragem total (“Quilometragem Total”), que corresponde à soma da quilometragem com alunos e da quilometragem ociosa; o tempo médio de viagem dos alunos na rota (“Tempo Médio de viagem na rota”); a hora que o ônibus deve sair da garagem para chegar ao primeiro ponto de embarque da rota (“Hora Saída da Garagem”); e a taxa de ocupação do veículo na rota (“Taxa de Ocupação por Rota”).

A taxa de ocupação do veículo na rota é calculada de acordo com equação 4.1.

$$\text{Ocup}_{\text{rota}} = \frac{N_{\text{rota}}}{C} \quad (4.1)$$

Onde:

- $\text{Ocup}_{\text{rota}}$  = Taxa de ocupação do veículo na rota;
- $N_{\text{rota}}$  = Número de alunos transportados na rota;
- $C$  = Capacidade do veículo que atende a rota.

É importante deixar claro que em algumas rotas esta taxa poderá ser maior que 1 (ver Figura 4.16), mas isso não significa que a restrição de capacidade do veículo foi violada. O que pode acontecer é que dentro da janela de tempo estipulada seja possível transportar uma quantidade de alunos, deixá-los em suas respectivas escolas e voltar a transportar uma outra quantidade e também deixá-los em suas respectivas escolas, sem extrapolar as restrições impostas ao problema. Sendo assim, algumas rotas podem aparentemente transportar mais alunos do que a capacidade do veículo permite.

Ao final do relatório é exibido um resumo contendo o número total de rotas geradas, a quilometragem total percorrida carregando alunos, a quilometragem total ociosa, a quilometragem total percorrida na rota (soma da quilometragem com alunos e quilometragem ociosa) e a taxa média de ocupação dos veículos no sistema.

A taxa média de ocupação dos veículos no sistema é calculada através da equação 4.2.

$$\text{Ocup} = \frac{N}{(n \times C)} \quad (4.2)$$

Onde:

- $\text{Ocup}$  = Taxa média de ocupação dos veículos;
- $N$  = Número total de alunos transportados;
- $n$  = Número de rotas geradas na solução do problema;
- $C$  = Capacidade dos veículos utilizados.

### 4.3 Observações Conclusivas

Este capítulo procurou trazer algumas informações sobre o SIG-T utilizado neste trabalho (TransCAD), com enfoque para a linguagem de programação GISDK que permite a adição de novas funcionalidades ao programa.

Utilizando esta linguagem de programação foi criada uma ferramenta para a definição das rotas do TER. Esta ferramenta é composta por um algoritmo que gera uma solução aproximada para o problema e de uma interface que tem como objetivo coletar os dados necessários para o cálculo das rotas e apresentar os resultados ao usuário através do mapa e de um arquivo texto.

O problema de roteirização e programação do TER foi tratado neste trabalho como um caso particular do problema *dial-a-ride* e o algoritmo para o cálculo das rotas é composto de uma solução inicial e de um procedimento de melhoria baseados nos trabalhos de Znamensky (2000) e Mauri (2006).

É importante destacar que a solução implementada neste trabalho é uma heurística e, portanto, não garante a solução ótima do problema, mas esta solução e a forma como os resultados finais são exibidos se tornam um grande auxílio aos gestores do TER que na maioria das vezes precisam tratar todas as restrições e variáveis envolvidas no transporte de forma manual ou precisam adaptar resultados gerados por uma ferramenta que não leva em consideração a possibilidade de carregamento misto nos veículos.

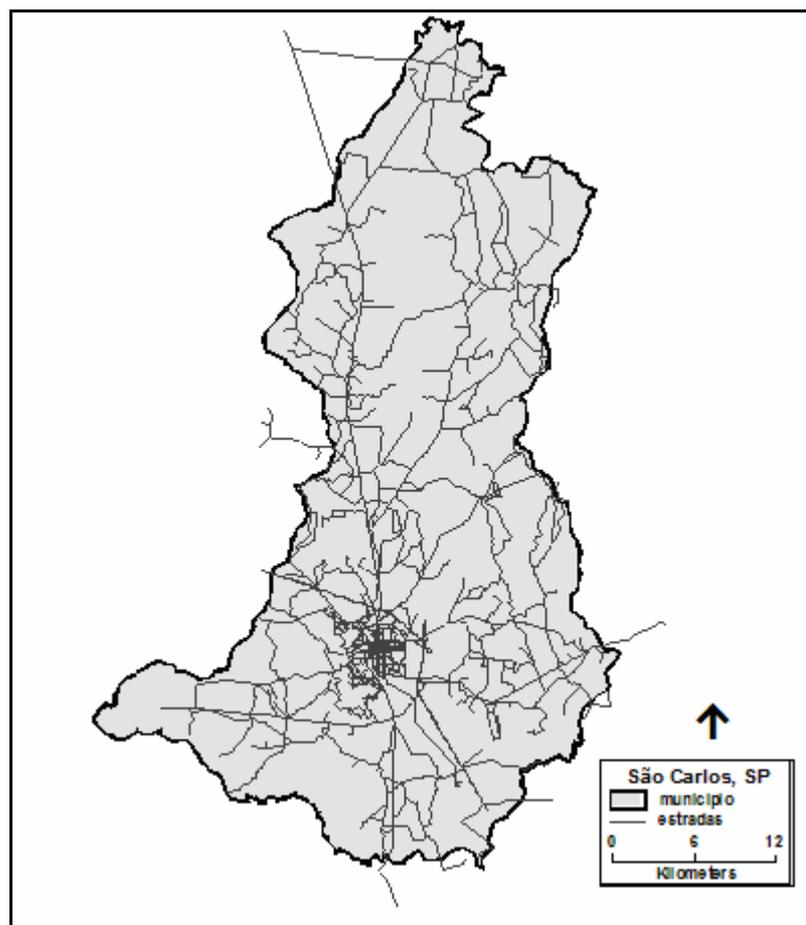
No Capítulo 5 são apresentados alguns resultados encontrados com a utilização da ferramenta num estudo de caso. O Apêndice A apresenta um manual de utilização da ferramenta e no Apêndice C é possível ter acesso ao pseudocódigo das heurísticas implementadas.

## 5 ESTUDO DE CASO

A fim de analisar a viabilidade do algoritmo, foi realizado um estudo de caso com dados do Transporte Escolar Rural de dois municípios paulistas com características bastante diferentes tanto em relação à demanda e a rede viária, como em relação ao tipo de veículo utilizado: São Carlos e Olímpia. Essas diferenças permitirão uma boa avaliação do algoritmo implementado.

### 5.1 Transporte Rural Escolar em São Carlos

São Carlos é uma cidade de porte médio, com cerca de 220 mil habitantes. A área total do município é de 1144 km<sup>2</sup>, sendo que cerca 1096 km<sup>2</sup> corresponde à área rural (Figura 5.1).



**Figura 5.1** – Município de São Carlos

O transporte escolar em São Carlos é organizado pela Prefeitura Municipal através da Secretaria de Transporte e da Secretaria Municipal de Educação e Cultura (SMEC),

mas é realizado por uma empresa terceirizada, escolhida através de licitação. Os dados necessários para o desenvolvimento deste estudo de caso foram fornecidos pela Secretaria de Transportes da Prefeitura Municipal de São Carlos.

O valor orçado pela Prefeitura no início de 2007, para os 60 meses seguintes, foi de cerca de 20 milhões de reais. A empresa concessionária dispõe de uma frota de ônibus com 35, 41 e 46 assentos e recebe mensalmente em função da quilometragem rodada, sendo o valor pago por quilometro igual a R\$ 2,68 (valor referente a Fevereiro de 2007). Este valor é reajustado a cada 12 meses pelo Índice de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA/IBGE), ou em caso de extinção, pelo índice que vier a substituí-lo.

Para chegar a este valor pago por quilometro rodado a SMEC leva em consideração custos fixos e variáveis. Os custos fixos compreendem as despesas com pessoal em todas as categorias, incluindo salários, horas-extras, encargos sociais e benefícios; custos com peças e acessórios; com despesas administrativas diversas; seguros e custos de capital, incluindo depreciação dos ativos e remuneração dos investimentos.

Já os custos variáveis são baseados nas despesas com óleo diesel; lubrificantes em geral e material de rodagem (pneus e serviços de recapagem).

Os custos variáveis vão oscilar de acordo com a quilometragem total percorrida. Os custos fixos dependem do número de veículos utilizados para percorrer as rotas, pois esta quantidade irá influenciar no número de motoristas, monitores, no valor a ser pago com seguro e licenciamento e no valor gasto com depreciação, dentre outros. Dessa forma, quanto menor o número de veículos utilizados menor será o gasto com custos fixos.

Mensalmente a empresa concessionária recebe um valor pela prestação do serviço este valor é calculado pela equação 5.1:

$$R = C_{km} \times [km_{reg} \times (1 + \%_{oc})] \quad (5.1)$$

Onde:

- R = Remuneração mensal paga à empresa (R\$);
- $C_{km}$  = Valor pago por quilômetro rodado;
- $km_{reg}$  = Quilometragem total percorrida no mês;
- $\%_{oc}$  = Percentual de quilometragem ociosa incidente sobre a quilometragem total percorrida transportando alunos nos mês.

Conforme pode ser observado na equação 5.1 a quilometragem ociosa (quilometragem percorrida sem transportar alunos) também é utilizada para o cálculo do valor

mensal pago à empresa concessionária. Esta porcentagem não pode ser superior a 86% da quilometragem total percorrida.

Além do Transporte Escolar Rural (TER), esta empresa também atende os alunos de outros três projetos que são:

- Transporte regular de alunos da zona urbana em atividades extracurriculares – projetos;
- Transporte de alunos em eventos de interesse da Rede Educacional de Ensino, dentro e fora do Município;
- Transporte de alunos com necessidades especiais.

Para este estudo de caso considerou-se somente o TER, referente ao ano 2007. Conforme se pode verificar na Tabela 5.1 este é o serviço que demanda a maior quilometragem, com uma média diária de 6148 quilômetros.

O cadastramento dos alunos é feito anualmente na Secretaria Municipal de Transporte, Trânsito e Vias Públicas através do preenchimento de um cadastro específico com os dados e documentos dos alunos. Esses dados são organizados em um sistema que indica a linha do serviço de transporte para cada aluno. Os alunos recebem uma carteira de identificação onde consta a linha que deverão utilizar. Essa carteira também serve de controle para os monitores dos ônibus.

**Tabela 5.1 - Quilometragem de cada serviço do Transporte Escolar de São Carlos (2007)**

| Mês   | Dias Letivos | Quilometragem percorrida (km) |                  |           |              | Média (km/dia) |
|-------|--------------|-------------------------------|------------------|-----------|--------------|----------------|
|       |              | Regular rural                 | Regular projetos | Eventos   | Total        |                |
| 1     | *            |                               |                  |           |              |                |
| 2     | 10           | 65.002,61                     | 14.147,50        | 32,00     | 79.182,11    | 7.928,95       |
| 3     | 20           | 139.734,95                    | 33.253,00        | 1.118,00  | 174.105,95   | 8.716,84       |
| 4     | 19           | 115.998,26                    | 26.944,50        | 1.348,00  | 144.290,76   | 7.604,34       |
| 5     | 23           | 146.036,74                    | 33.132,50        | 3.535,00  | 182.704,24   | 7.954,15       |
| 6     | 21           | 128.689,00                    | 29.785,50        | 4.615,00  | 163.089,50   | 7.776,29       |
| 7     | 10           | 64.526,20                     | 14.468,00        | 804,00    | 79.798,20    | 7.990,48       |
| 8     | 23           | 146.581,44                    | 33.580,50        | 1.654,00  | 181.815,94   | 7.915,57       |
| 9     | 21           | 127.010,37                    | 29.797,00        | 1.148,00  | 157.955,37   | 7.531,68       |
| 10    | 20           | 114.810,32                    | 25.000,00        | 1.200,00  | 141.010,32   | 7.060,00       |
| 11**  | 21           | 124.793,83                    | 30.000,00        | 1.200,00  | 155.993,83   | 7.438,10       |
| 12**  | 15           | 74.876,30                     | 20.000,00        | 800,00    | 95.676,30    | 6.386,67       |
| Total | 203          | 1.248.060,00                  | 290.108,50       | 17.454,00 | 1.555.622,50 |                |

\* sem serviço / \*\* previsão

Fonte: SÃO CARLOS (2007)

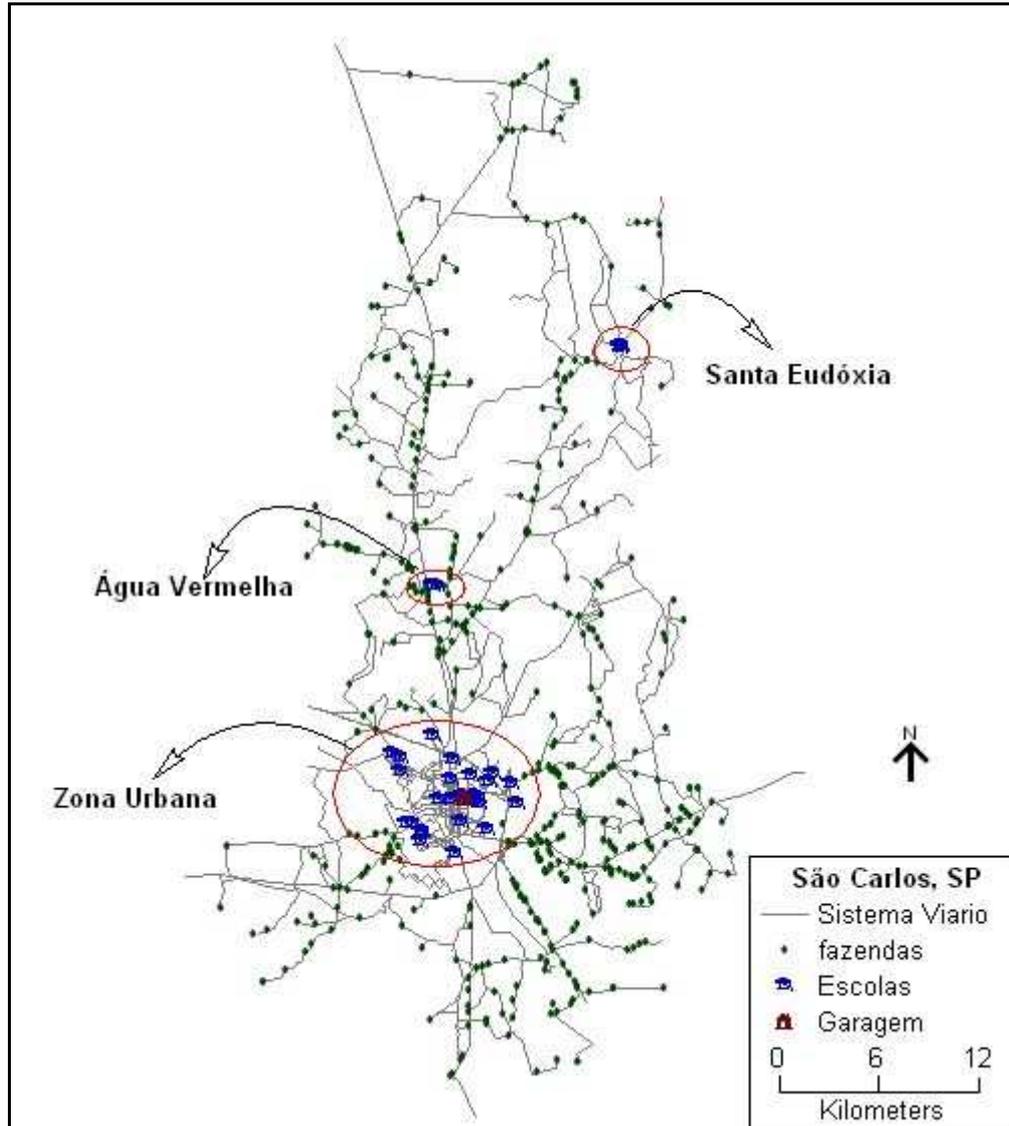
O TER em São Carlos pode ser assim caracterizado:

- É o transporte de alunos que residem em propriedades agrícolas (fazendas, chácaras, etc) e nos dois subdistritos do município: Santa Eudóxia e Água Vermelha e que estudam em escolas públicas municipais e estaduais na zona urbana ou nos subdistritos citados;
- Os ônibus utilizados para este serviço devem seguir normas fixadas pela Prefeitura e contar com monitores treinados para atender aos alunos e garantir a segurança necessária;
- Este serviço atende 32 escolas e um universo de 1868 alunos cadastrados na Secretaria de Transportes da Prefeitura Municipal de São Carlos, divididos nos três turnos (Manhã, Tarde e Noite) (Tabela 5.2). No entanto, o número médio de embarques diários é menor (cerca de 1.310) com uma média de 28 embarques por rota (Figura 5.3);
- Cada rota é percorrida com antecedência ao horário de entrada dos alunos

nas escolas e logo após o encerramento da jornada de aula, perfazendo um percurso no sentido residência-escola e outro no sentido escola-residência;

- Para o ano de 2007 foram definidas 47 rotas (Manhã: 15 rotas; Tarde: 22 rotas; Noite: 10 rotas) e a frota operacional destinada a este serviço foi de 30 veículos;
- Os percursos são realizados em vias de acesso às propriedades rurais, estradas vicinais, rodovias estaduais e vias urbanas, algumas delas em terra, com uma velocidade média atual, ponderada pela extensão das rotas de 28 km/h;
- O tempo médio gasto pelos veículos para percorrer cada rota é de uma hora e trinta minutos.

No mapa da Figura 5.2 nota-se a dispersão dos pontos de embarque (fazendas) e escolas. Também é possível notar a capilaridade da rede viária na zona rural do município que influencia na escolha dos trajetos e conseqüentemente na distância percorrida e no tempo de viagem. Os círculos em vermelho destacam as escolas que são atendidas pelo TER, nas localidades descritas anteriormente.



**Figura 5.2** – Mapa de São Carlos com a localização das escolas e fazendas

Das 32 escolas que são atendidas pelo TER, cinco estão localizadas na área rural do município (2 em Água Vermelha e 3 em Santa Eudóxia), as outras vinte e sete estão localizadas na área urbana do município. A Tabela 5.2 mostra a demanda de alunos em cada turno por destino. Nesta tabela percebe-se que há uma maior demanda para as escolas da zona urbana e para o turno da tarde.

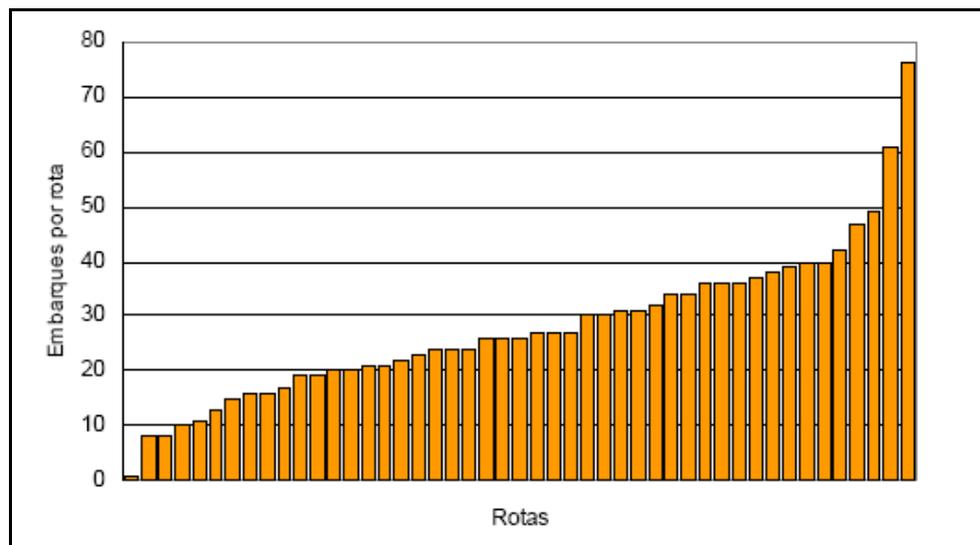
Uma preocupação muito grande dos responsáveis pela definição das rotas é a questão dos horários de entrada e saída das escolas, pois, como uma rota geralmente atende a mais de uma escola é preciso estar atento para que o aluno não espere muito tempo para o início das aulas ou para ser apanhado pelo ônibus no fim das aulas, o que pode resultar na sua dispersão. Assim sendo, a janela de tempo dentro da qual pode se realizar a viagem dos

alunos é bastante restrita. Deve-se garantir que o estudante não fique um tempo muito longo dentro do veículo e também que não chegue muito antes (ou depois) do início das aulas.

**Tabela 5.2** – Quantidade de Alunos por turno e por destino (2007)

| Destinos                 | Número de Alunos |       |       |       |
|--------------------------|------------------|-------|-------|-------|
|                          | Manhã            | Tarde | Noite | Total |
| Escolas de Santa Eudóxia | 0                | 124   | 18    | 142   |
| Escolas de Água Vermelha | 257              | 245   | 9     | 511   |
| Escolas da Zona Urbana   | 386              | 579   | 210   | 1175  |
| Total                    | 643              | 948   | 237   | 1828  |

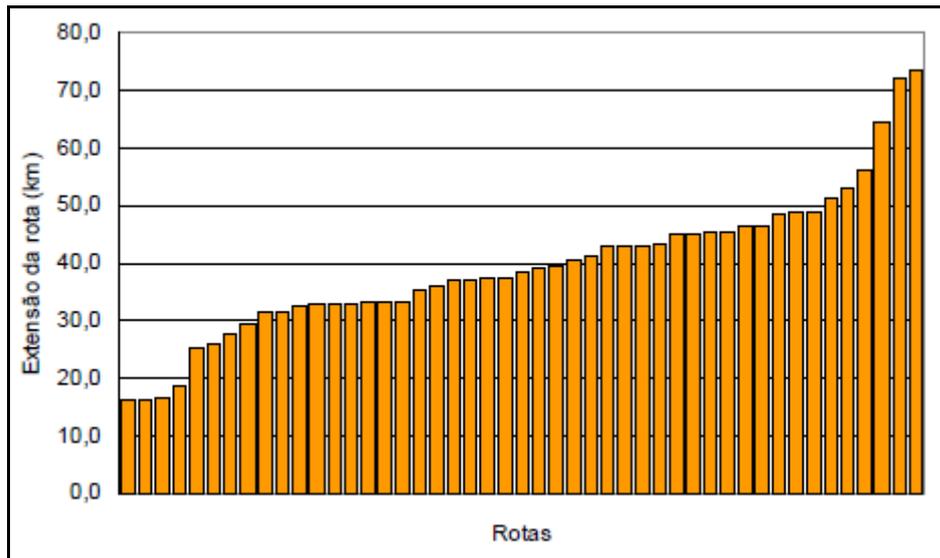
É possível observar que, em algumas rotas, os veículos são subutilizados e em outras circulam com um número de alunos acima da quantidade de assentos disponível nos ônibus. Isto pode ser observado na Figura 5.3, lembrando-se que todos os ônibus utilizados têm capacidade superior a 30 passageiros.



**Figura 5.3** - Embarques por rota

Fonte: São Carlos (2007)

Na Figura 5.4 percebe-se a variação das extensões das rotas, estas vão de 16,4 a 73,5 quilômetros com uma média de 39,5 km por rota. Esta variação pode ser atribuída às grandes extensões de terra da área rural, a dispersão dos alunos por essa área, a localização das escolas e pela capilaridade da rede viária do município.



**Figura 5.4 –** Quilometragem das rotas

Fonte: São Carlos (2007)

Outra questão observada é o tempo gasto dentro da área urbana desembarcando os alunos em suas respectivas escolas. Em algumas rotas este tempo chega a 40 minutos, deixando mais evidente a desvantagem de trabalhar com as rotas centralizadas num ponto da área urbana e a vantagem de se utilizar uma ferramenta que leve em consideração também este tempo.

### 5.1.1 Aplicação do Algoritmo no Estudo de Caso

O algoritmo para a definição das rotas foi aplicado para a demanda do turno da tarde, por ser a maior e estar bem dispersa pelo município, permitindo fazer uma boa análise do desempenho do algoritmo.

A idéia original era fazer uma comparação entre rotas executadas na prática do TER de São Carlos e as rotas geradas pela ferramenta implementada. No entanto, não foi possível mapear todos os pontos de embarque dos alunos.

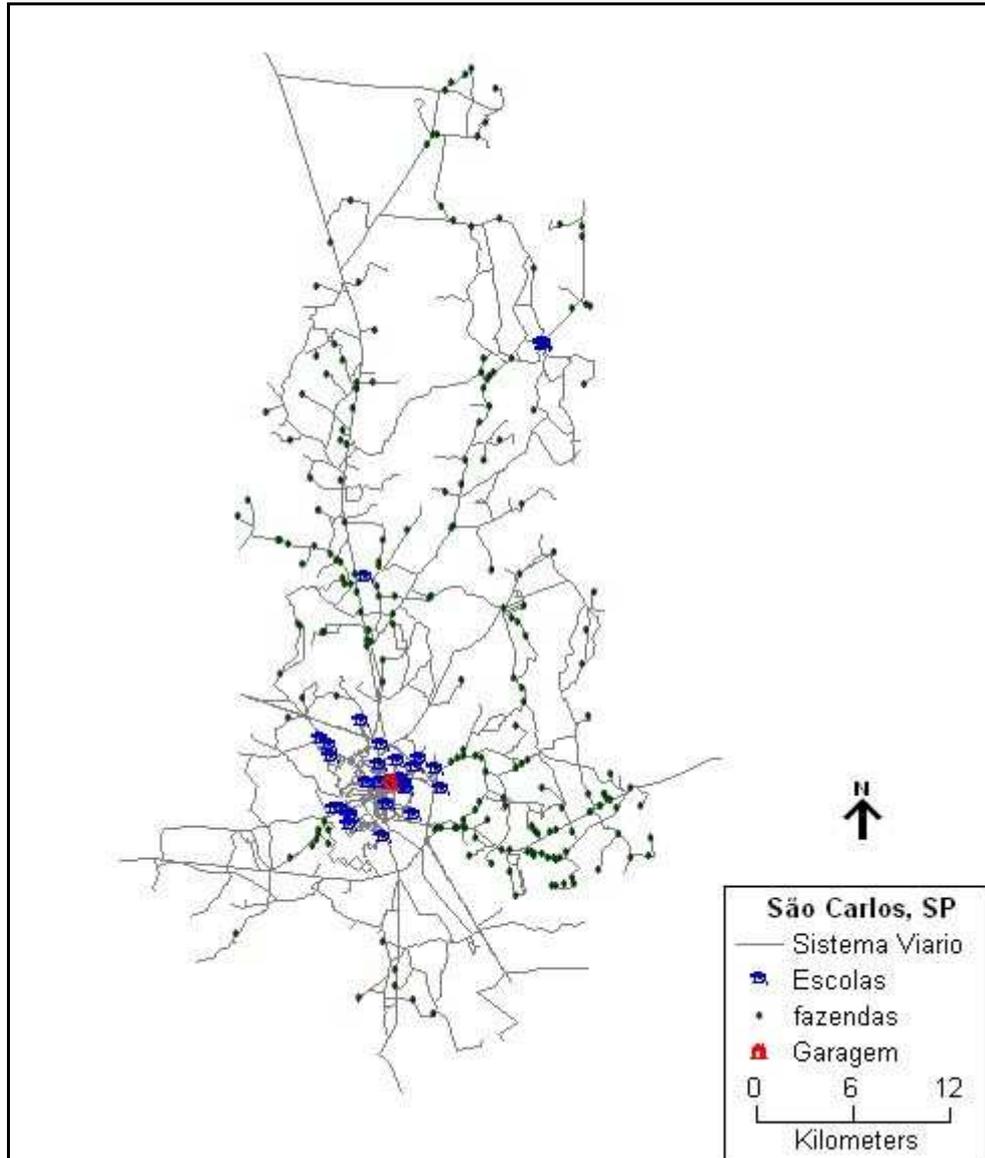
Dos 948 alunos cadastrados para utilizar o TER em 2007 no turno da tarde, foram localizados os pontos de embarque de apenas 850, distribuídos por 212 pontos de embarque. Assim sendo, esta demanda foi utilizada para analisar o desempenho do algoritmo (Tabela 5.3).

**Tabela 5.3** – Demanda de alunos utilizada no estudo de caso

| Destinos      | Nº Alunos |
|---------------|-----------|
| Água Vermelha | 229       |
| Santa Eudóxia | 110       |
| Zona Urbana   | 511       |
| Total         | 850       |

Embora não tenha sido possível levantar toda demanda é interessante ressaltar que para todas as rotas executadas na prática foi possível localizar pelo menos alguns pontos de embarque. Dessa forma, praticamente todo o espaço de busca foi coberto permitindo uma boa análise da viabilidade do algoritmo.

O mapa da Figura 5.5 mostra a dispersão destes pontos de embarque (representado pelas fazendas no mapa) e das escolas (pontos de desembarque). Nesta figura também é possível observar a localização da garagem da Secretaria de Transportes da Prefeitura. Este ponto é utilizado como ponto de partida dos ônibus para o cálculo da quilometragem percorrida pelas rotas.

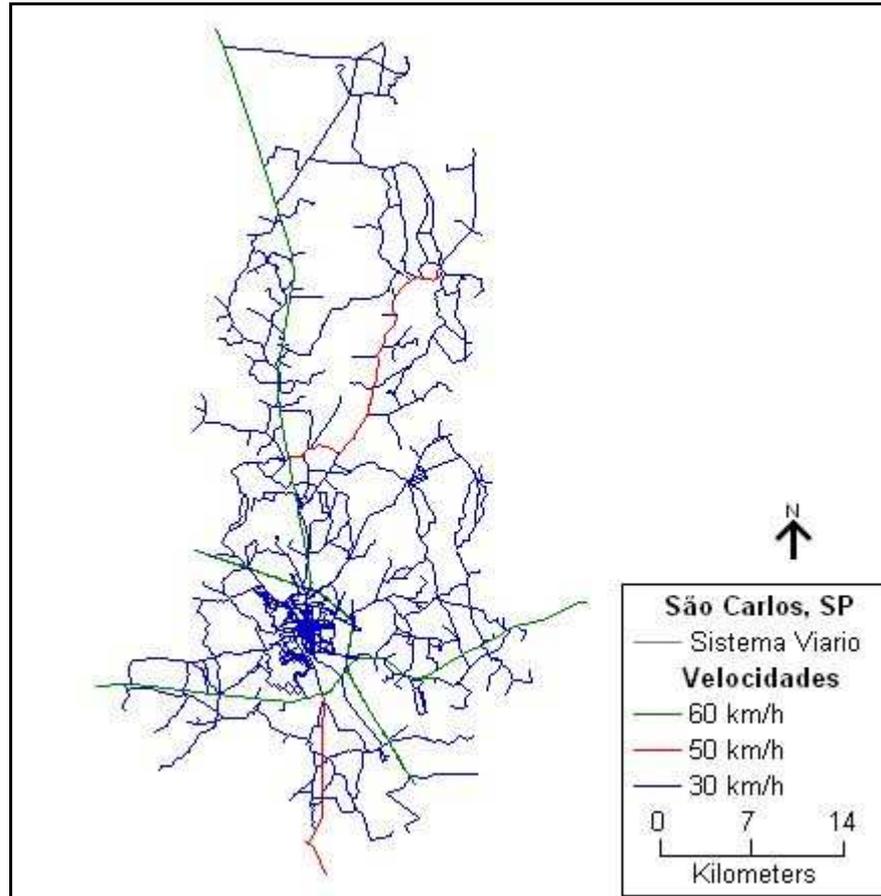


**Figura 5.5** – Mapa com a demanda para o estudo de caso

Pode-se observar no mapa da Figura 5.5 que em algumas áreas há uma maior concentração de pontos de embarque permitindo que a capacidade dos veículos utilizados seja bem aproveitada. Já nas áreas com menor demanda é mais difícil atingir uma capacidade razoável dos veículos dentro da janela de tempo especificada.

Para o cálculo dos tempos de viagem foram consideradas velocidades médias diferentes nas diversas categorias de vias (Figura 5.6):

- 30 km/h (trechos em azul): trechos em terra e vias da área urbana;
- 50 km/h (trechos em vermelho): rodovias municipais;
- 60 km/h (trechos em verde): rodovias estaduais.



**Figura 5.6** – Mapa com as velocidades nos trechos das vias

Com a demanda mapeada foram realizadas algumas simulações (ver Quadro 5.1), utilizando duas capacidades de veículos e três faixas de tempo de viagem.

O Código de Trânsito Brasileiro proíbe que alunos viagem em pé nos veículos de transporte escolar. Esta restrição faz com que o número máximo de alunos que um veículo pode transportar seja igual ao número de assentos. Nas simulações em que a capacidade dos veículos foi adotada como 55 alunos, considerou-se que esta restrição pode ser flexibilizada, acomodando-se, quando necessário, três alunos em cada assento duplo. Ressalte-se que esta situação deve apenas acontecer em trechos curtos, já próximos da zona urbana.

O tempo máximo de permanência dos alunos nos ônibus é definido, geralmente, como sendo igual a 60 minutos. Nestas simulações foram adotados valores maiores a fim de verificar o comportamento do algoritmo e eventuais economias em número de veículos e quilometragem percorrida.

**Quadro 5.1** – Simulações realizadas

| Simulações | Tempo de viagem (min.) | Capacidade do veículo |
|------------|------------------------|-----------------------|
| 1          | 60                     | 44                    |
| 2          | 60                     | 55                    |
| 3          | 70                     | 44                    |
| 4          | 70                     | 55                    |
| 5          | 80                     | 44                    |
| 6          | 80                     | 55                    |
| 7          | 90                     | 44                    |
| 8          | 90                     | 55                    |

A Tabela 5.4 mostra os resultados obtidos, para cada uma das simulações após a realização de 15 iterações. Nesta tabela é possível observar a variação do número de rotas, da taxa média de ocupação dos veículos no sistema, da quilometragem percorrida transportando alunos (“Quilometragem com alunos”), da quilometragem ociosa (sem transportar alunos, da garagem à primeira fazenda e da última escola até a garagem) e da quilometragem total nas simulações.

**Tabela 5.4** – Resultado das simulações

| Simulações | Nº rotas | Taxa média ocupação (%) | Quilometragem com alunos (km) | Quilometragem ociosa (km) | Quilometragem total (km) |
|------------|----------|-------------------------|-------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 1          | 34       | 57                      | 1100,0                        | 1042,8                    | 2142,8                   |
| 2          | 32       | 48                      | 1020,9                        | 980,2                     | 2001,1                   |
| 3          | 28       | 69                      | 1043,6                        | 874,5                     | 1918,1                   |
| 4          | 27       | 57                      | 1032,2                        | 814,3                     | 1846,5                   |
| 5          | 24       | 80                      | 1034,7                        | 712,2                     | 1746,9                   |
| 6          | 24       | 64                      | 1009,5                        | 762,2                     | 1771,7                   |
| 7          | 22       | 88                      | 1059,5                        | 711,5                     | 1771,0                   |
| 8          | 21       | 74                      | 1013,4                        | 714,7                     | 1728,1                   |

Nas simulações 5 e 6 o aumento da capacidade dos veículos não resultou em diminuição do número de rotas e acarretou um pequeno aumento da quilometragem percorrida. Nas demais simulações, aumentando a capacidade dos veículos foi possível diminuir o número de rotas e a quilometragem percorrida.

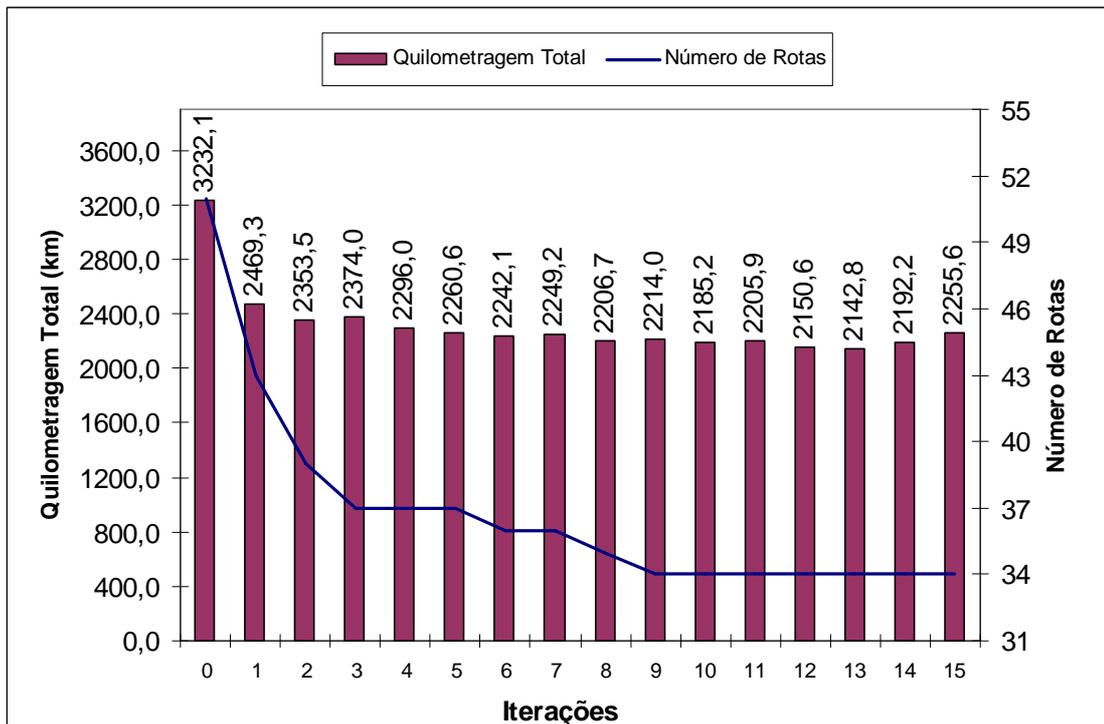
A taxa média de ocupação dos veículos no sistema diminuiu, quando se manteve o tempo de viagem e variou-se a capacidade dos veículos, pois, a diminuição do número de rotas ocasionado pelo aumento da capacidade dos veículos em algumas simulações não foi suficiente para haver um aumento da taxa de ocupação dos veículos.

É possível constatar que para as características do município estudado, maiores tempos de viagem permitem que seja possível diminuir tanto a quilometragem percorrida quanto o número de rotas, pois dessa forma o algoritmo consegue construir rotas mais organizadas e aproveitar melhor a capacidade dos veículos.

Observando as simulações 1 e 3 verifica-se que aumentando em apenas 10 minutos o tempo máximo de viagem dos alunos é possível diminuir em seis unidades o número de rotas. Com vinte minutos a mais (simulações 1 e 5) é possível diminuir em 10 unidades o número de rotas. Nas simulações 1 e 7 (com 30 minutos a mais) é possível obter um decréscimo de doze unidades no número de rotas. Em todas estas simulações foi possível diminuir a quilometragem percorrida com relação a simulação 1.

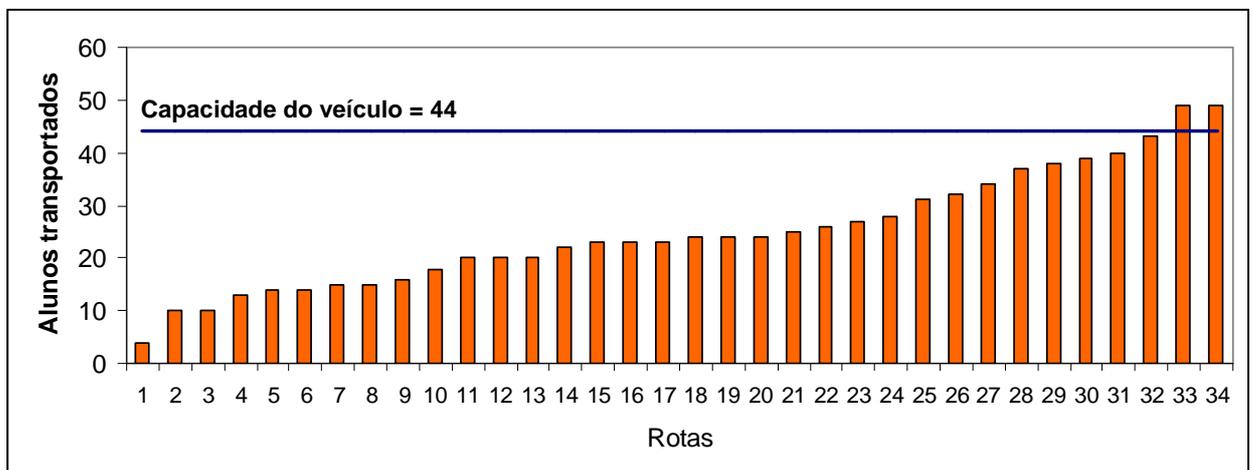
Nas Figuras 5.7 e 5.8 é possível notar como a quilometragem total (soma da quilometragem com alunos e quilometragem ociosa) e o número de rotas variam a cada iteração do processo de melhoria. É possível perceber que o procedimento de melhoria proporciona uma boa melhora dos resultados gerados pela solução inicial (representada pela iteração número 0).

Também é mostrado o número de alunos transportados por rota na melhor solução encontrada para o problema (com 15 iterações). Outra observação a ser feita é que, em todas as simulações, as melhores soluções só foram encontradas a partir da décima iteração.



**Figura 5.7** – Simulação 1 – Quilometragem e número de rotas

Para a simulação 1 (Figura 5.7) a melhor solução foi encontrada na décima terceira iteração do processo de melhoria.



**Figura 5.8** – Simulação 1 – Alunos transportados por rota – melhor solução

A Figura 5.8 mostra o número de alunos transportados por rota na melhor solução. Verifica-se que a maioria das rotas transporta mais de 20 alunos e que duas rotas transportam mais que 44 alunos. No entanto, isso não significa que a restrição de capacidade foi violada. O que acontece é que alunos foram deixados em suas respectivas escolas e outros foram pegos para serem transportados sem, contudo, desprezar a restrição imposta.

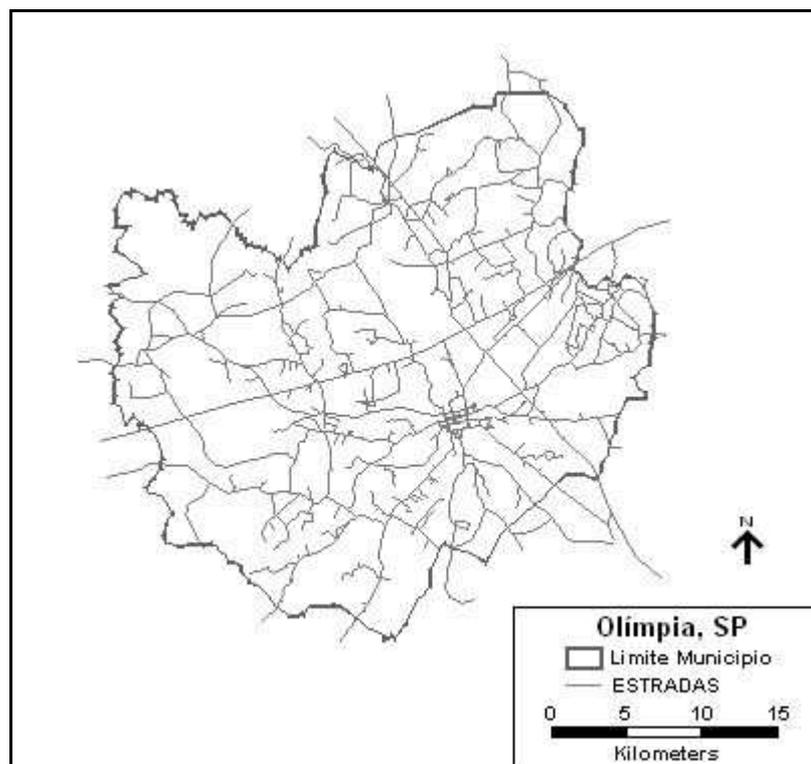
Os resultados detalhados das demais simulações são mostrados no Apêndice B.

É interessante observar que em todas as simulações poucas rotas conseguiram atingir a capacidade máxima dos veículos. Isto pode ser justificado pela grande dispersão da demanda que ficou concentrada em algumas regiões e em outras é bem reduzida.

O tempo de processamento do algoritmo depende do número de iterações e da demanda utilizada, quanto maior a demanda e o número de iterações mais tempo de processamento será necessário para o cálculo das rotas.

## 5.2 Olímpia

O município de Olímpia está localizado na região noroeste do Estado de São Paulo, tem área de 803 km<sup>2</sup> e uma população de cerca de 46 mil habitantes (Censo IBGE 2000). A Figura 5.9 mostra a área ocupada pelo município e as estradas utilizadas para circulação viária.



**Figura 5.9** – Município de Olímpia

Os dados utilizados para este estudo de caso são referentes ao ano de 2002 e foram coletados através de uma assessoria prestada pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos para organizar o sistema existente. Apesar de estarem

um pouco defasados, estes dados estão bem organizados e poderão servir para comparação com as rotas geradas pela ferramenta.

Em Olímpia o transporte dos alunos é realizado por motoristas autônomos contratados pela PRODEM (Progresso e Desenvolvimento Municipal – Olímpia). Estes motoristas utilizam veículos do tipo *Kombi* e são remunerados por quilômetro rodado. O valor desta remuneração correspondia, em 2002, a 47% do preço do litro da gasolina por quilômetro rodado.

Os alunos residentes na área rural do município são transportados para as escolas da zona urbana, para as escolas dos distritos de Baguaçu e Ribeiro dos Santos, e para a escola rural de Campo Alegre. A Tabela 5.5 exhibe a distribuição da demanda para as localidades citadas.

**Tabela 5.5** – Demanda de alunos e destinos

| Destino                                   | Número de alunos |            |           |            |
|-------------------------------------------|------------------|------------|-----------|------------|
|                                           | Manhã            | Tarde      | Noite     | Total      |
| Escolas da zona urbana de Olímpia         | 275              | 200        | 74        | 549        |
| Escola rural de Campo Alegre              | 38               | 0          | 0         | 38         |
| Escolas do distrito de Ribeiro dos Santos | 32               | 30         | 11        | 73         |
| Escolas do distrito de Baguaçu            | 0                | 29         | 0         | 29         |
| <b>Total</b>                              | <b>345</b>       | <b>259</b> | <b>85</b> | <b>689</b> |

Fonte: Sanches et al. (2002)

Esta demanda está distribuída em 59 rotas nos três turnos como mostrado na Tabela 5.6.

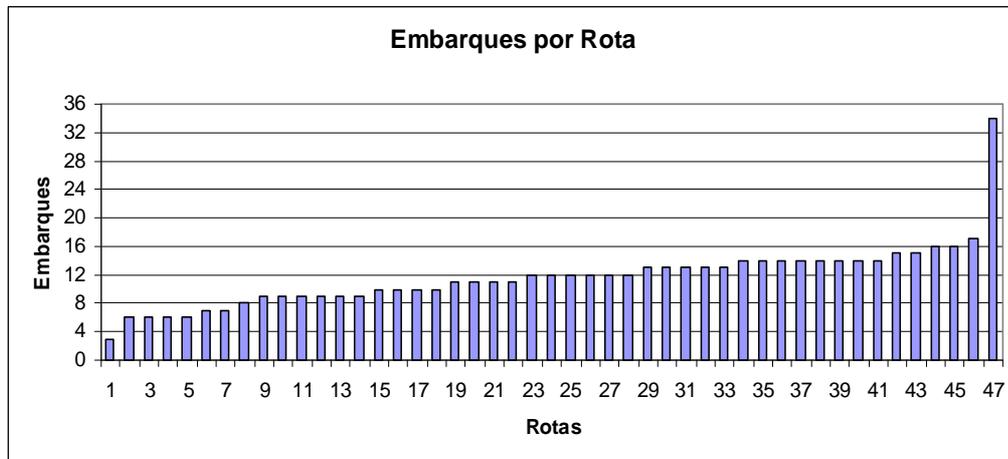
**Tabela 5.6** – Número de rotas por período

| Período      | Número de rotas |              |                    |          |           |
|--------------|-----------------|--------------|--------------------|----------|-----------|
|              | Olímpia         | Campo Alegre | Ribeiro dos Santos | Baguaçu  | Total     |
| Manhã        | 23              | 2            | 3                  | 0        | 28        |
| Tarde        | 16              | 0            | 3                  | 2        | 21        |
| Noite        | 8               | 0            | 2                  | 0        | 10        |
| <b>Total</b> | <b>47</b>       | <b>2</b>     | <b>8</b>           | <b>2</b> | <b>59</b> |

Fonte: Sanches et al. (2002)

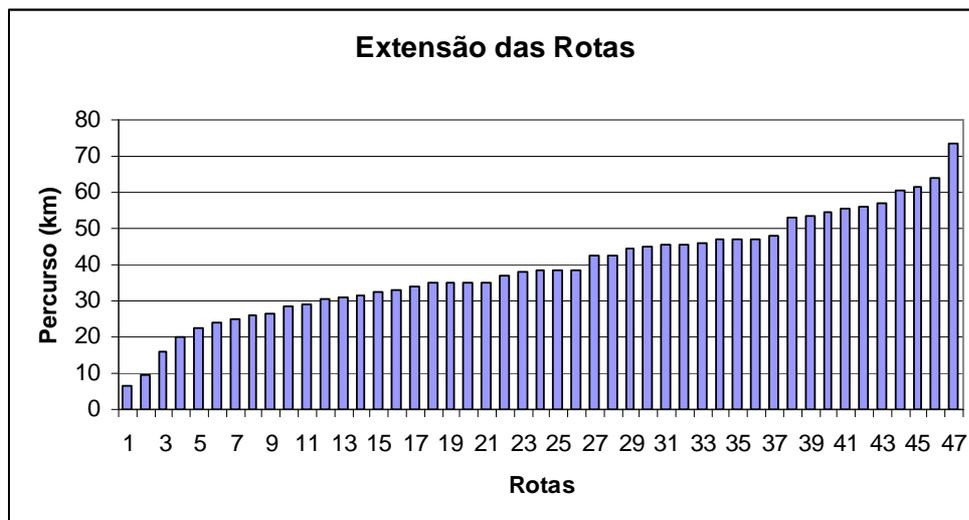
As Figuras 5.10 e 5.11 mostram respectivamente o número embarques por rota e o comprimento das rotas que se destinam às escolas da zona urbana. É importante destacar

que a rota 47 apesar de ser contada como uma única rota (ver Figura 5.16), na prática é realizada por três veículos diferentes.



**Figura 5.10** – Rotas com destino às escolas da zona urbana de Olímpia

É possível observar na Figura 5.10 que muitas rotas carregam mais alunos do que um veículo tipo *Kombi* comporta. Isso prejudica bastante a qualidade do serviço prestado.



**Figura 5.11** – Extensão das Rotas com destino à zona urbana

As extensões das rotas (ver Figura 5.11) variam entre 6,6 e 73,5 quilômetros com uma média de 39,3 quilômetros por rota. Essas rotas iniciam na Rodoviária de Olímpia, passam pelas propriedades rurais recolhendo os alunos, deixando-os nas escolas e retornam à Rodoviária. Cabe ressaltar que também existe o percurso de volta entregando os alunos em suas respectivas propriedades que equivale, neste caso, a mesma distância percorrida no sentido residência-escola, bastando somente dobrar a quilometragem das rotas exibidas na Figura 5.11.

A Tabela 5.7 mostra a quilometragem percorrida por turno considerando apenas o sentido residência-escola (“Quilometragem das Rotas”) e nos dois sentidos (“Quilometragem Diária”) para a demanda que se destina às escolas da zona urbana.

**Tabela 5.7** – Quilometragem percorrida por turno para zona urbana de Olímpia

| Período | Quilometragem das Rotas (km) | Quilometragem Diária (km) |
|---------|------------------------------|---------------------------|
| Manhã   | 923,8                        | 1847,6                    |
| Tarde   | 621,3                        | 1242,6                    |
| Noite   | 301,1                        | 602,2                     |
| Total   | 1846,2                       | 3692,4                    |

Após a assessoria realizada pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos foram sugeridas novas rotas que respeitassem as seguintes restrições:

- Tempo máximo de permanência dos alunos nos veículos de uma hora;
- Capacidade dos veículos utilizados: 12 alunos para o período da manhã e da tarde (pois estes períodos transportam basicamente crianças com menos de 12 anos) e 10 alunos para o período da noite, pois se trata do transporte de adultos e adolescentes.

Estas rotas foram definidas com o auxílio do TransCAD e assumem que os veículos partem da Rodoviária de Olímpia, passam pelas propriedades rurais apanhando os alunos, pelas escolas deixando-os e retornam à Rodoviária.

A Tabela 5.8 mostra o número de rotas sugeridas pela assessoria. É possível perceber que houve um aumento do número de rotas, já que estas agora estão limitadas pelo tempo e pela capacidade máxima de alunos transportados.

**Tabela 5.8** – Número de rotas propostas por período

| Destino                                   | Número de rotas |           |           |           |
|-------------------------------------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|
|                                           | Manhã           | Tarde     | Noite     | Total     |
| Escolas da zona urbana de Olímpia         | 24              | 18        | 9         | 51        |
| Escola rural de Campo Alegre              | 3               | -         | -         | 3         |
| Escolas do distrito de Ribeiro dos Santos | 3               | 3         | 1         | 7         |
| Escolas do distrito de Baguaçu            | -               | 3         | -         | 3         |
| <b>Total</b>                              | <b>30</b>       | <b>24</b> | <b>10</b> | <b>64</b> |

Fonte: Sanches et al. (2002)

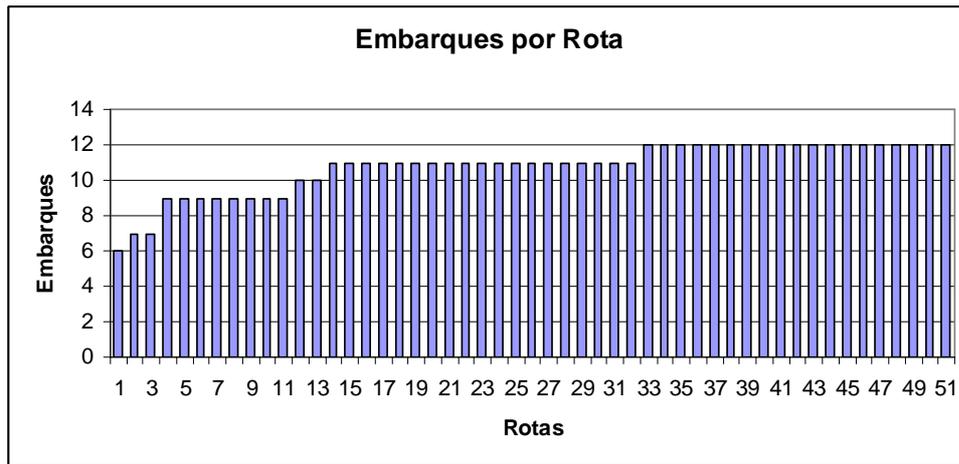
Houve também um aumento da quilometragem percorrida, conforme mostrado na Tabela 5.9.

**Tabela 5.9** – Quilometragem das rotas propostas

| Destino                                   | Quilometragem |              |              |               |
|-------------------------------------------|---------------|--------------|--------------|---------------|
|                                           | Manhã         | Tarde        | Noite        | TOTAL         |
| Escolas da zona urbana de Olímpia         | 897,3         | 655,2        | 339,7        | 1892,2        |
| Escola rural de Campo Alegre              | 130,7         | -            | -            | 130,7         |
| Escolas do distrito de Ribeiro dos Santos | 104,1         | 90,7         | 43,2         | 238,0         |
| Escolas do distrito de Baguaçu            | -             | 78,1         | -            | 156,2         |
| <b>Total</b>                              | <b>1262,8</b> | <b>824,0</b> | <b>382,9</b> | <b>2469,7</b> |

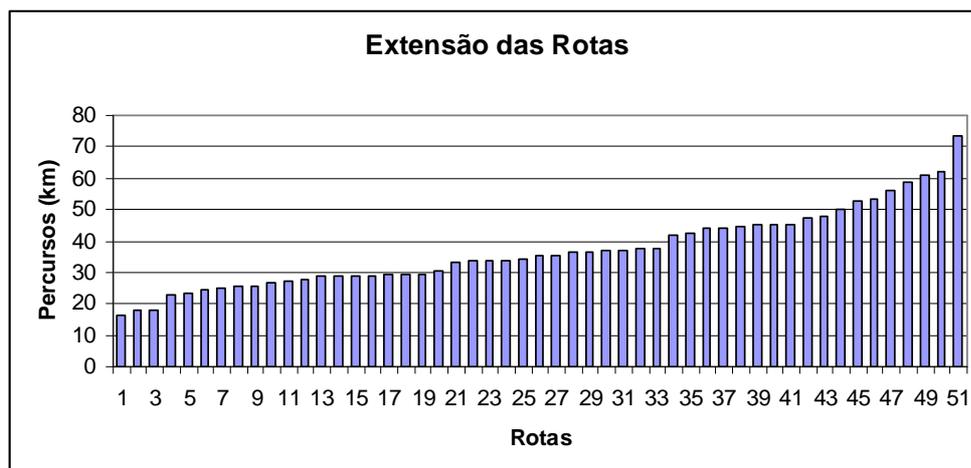
Fonte: Sanches et al. (2002)

A Figura 5.12 mostra a variação do número de embarques para as rotas que se destinam às escolas da zona urbana de Olímpia. É possível perceber que nenhuma das rotas extrapola o limite da capacidade definida para os veículos.



**Figura 5.12** – Embarques rotas propostas

Na Figura 5.13 é mostrada a extensão das rotas propostas, estas variam de 16,1 a 73,3 quilômetros com uma média de 37,1 quilômetros por rota.



**Figura 5.13** – Extensão das rotas propostas

A assessoria também apresentou uma nova proposta para remuneração dos motoristas, pois a forma praticada (47% do preço da gasolina por quilômetro rodado) favorecia aqueles motoristas que percorriam uma quilometragem maior.

A metodologia proposta para a estimativa do custo operacional das *kombis* está mostrada na Tabela 5.10. A metodologia baseou-se na revista Transporte Moderno (n° 396, Junho/Julho 2001) e leva em consideração o preço dos insumos referentes ao mês de julho de 2002.

**Tabela 5.10** – Cálculo do custo operacional da *kombi*

|                                         | Coeficiente | Custo do insumo | Total           |
|-----------------------------------------|-------------|-----------------|-----------------|
| <b>Custo Fixo</b>                       |             |                 |                 |
| Depreciação                             | 0,1104      | 22.920,00       | 2.530,37        |
| Remuneração                             | 0,1008      | 23.400,00       | 2.358,72        |
| Licenciamento e seguro obrigatório      | 1,0000      | 890,00          | 890,00          |
| Seguro de responsabilidade civil        | 0,0936      | 23.400,00       | 2.190,24        |
| <b>Custo fixo anual (R\$ / ano)</b>     |             |                 | <b>7.969,33</b> |
| <b>Custo Variável</b>                   |             |                 |                 |
| Peças e materiais de oficina            | 0,000003    | 22.920,00       | 0,068760        |
| Pneus, câmaras e recapagens             | 0,0001      | 120,00          | 0,012000        |
| Combustível                             | 0,1462      | 1,80            | 0,263160        |
| Óleo de Carter                          | 0,000366    | 4,40            | 0,001610        |
| Óleo de câmbio e diferencial            | 0,000073    | 4,90            | 0,000358        |
| Lavagem e graxas                        | 0,0004      | 20,00           | 0,008000        |
| <b>Custo variável por km (R\$ / km)</b> |             |                 | <b>0,353890</b> |

Fonte: Sanches et a. (2002)

O critério de remuneração mensal apresentado é constituído de três parcelas de custo: uma referente aos custos fixos do veículo, uma parcela referente à remuneração pelo trabalho do motorista e uma correspondente aos custos variáveis.

A parcela mensal referente aos custos fixos está representada pela equação 5.2:

$$CF = \frac{\text{custofixoanual}}{12} (\text{R\$ / mês}) \quad (5.2)$$

Onde:

- CF = Custo fixo mensal do veículo;
- custofixoanual = Custo fixo anual gasto com o veículo mostrado na Tabela 5.10.

Já a parcela referente à remuneração mensal pelo trabalho do motorista é proporcional às horas de trabalho. O valor pago por uma jornada de 8 horas diárias é equivalente a 3 salários mínimos mais 40% de encargos sociais.

A parcela referente ao custo variável, ou seja, por quilômetro rodado, corresponde a 20% do preço da gasolina.

Dessa forma, a composição da remuneração mensal de cada motorista por rota pode ser expressa pela equação 5.3:

$$C_{\text{mensal}} = CF + RM + (\text{km} \times R\$_{\text{km}}) \quad (5.3)$$

Onde:

- $C_{\text{mensal}}$  = Custo mensal por rota;
- CF = Custo fixo mensal do veículo;
- RM = Remuneração mensal do motorista (este valor depende do número de horas trabalhadas, como dito anteriormente);
- km = Quilometragem percorrida no mês;
- $R\$_{\text{km}}$  = Custo do valor por quilômetro rodado (20% do preço do litro da gasolina).

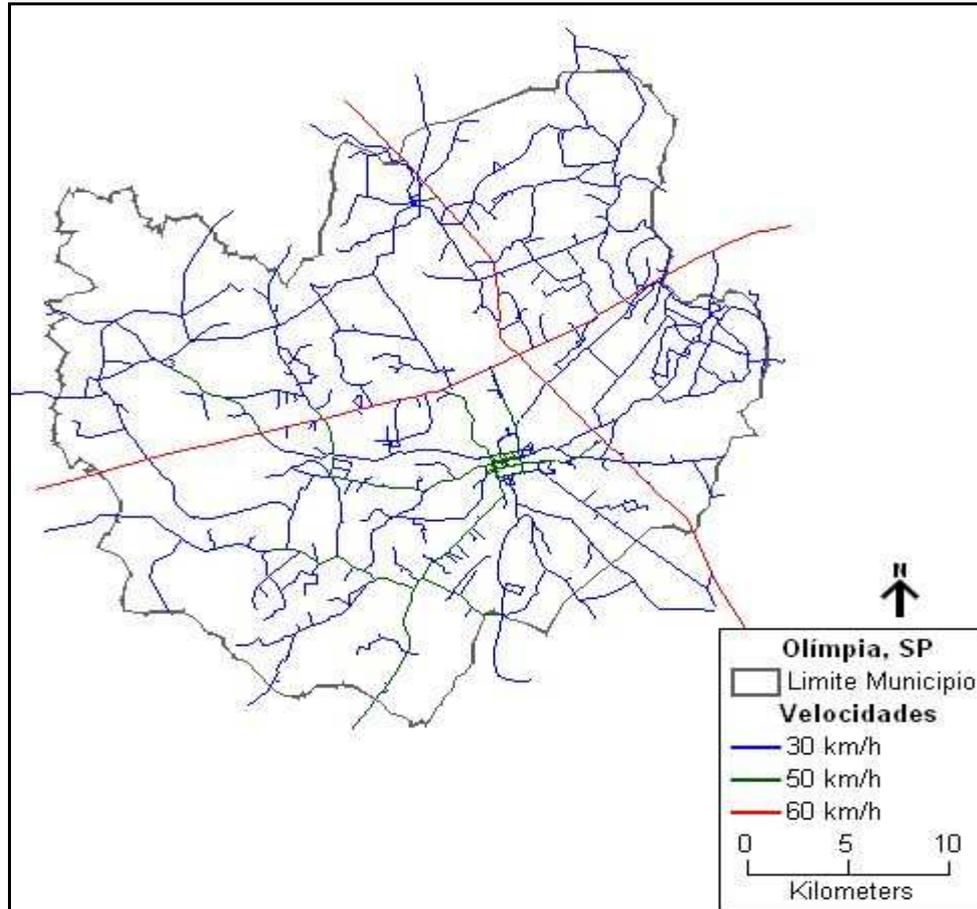
Segundo Sanches et al. (2002) comparando o custo financeiro mensal gasto com a remuneração atual (47% do preço da gasolina por quilômetro rodado) e a forma de remuneração sugerida pela assessoria, foi possível verificar que a remuneração sugerida além ser mais justa permitiu uma redução neste custo.

Comparando-se as rotas propostas pela assessoria para as escolas da zona urbana de Olímpia com as rotas executadas originalmente é possível perceber que houve um aumento da quilometragem percorrida (2,5%) e no número de rotas, mas a qualidade do transporte aumentou, pois, as capacidades dos veículos são respeitadas e o tempo de permanência dos alunos nos veículos não ultrapassa uma hora.

### 5.2.1 Aplicação do Algoritmo implementado

Somente a demanda de alunos que se destinam às escolas da zona urbana de Olímpia foi utilizada para testar a eficiência do algoritmo implementado. Os resultados obtidos serão apresentados nesta seção e comparados com as rotas executadas e com rotas propostas pela assessoria realizada.

As velocidades utilizadas nos trechos das vias para o cálculo do tempo médio de viagem estão mostradas na Figura 5.14. Os trechos em azul (velocidade de 30 km/h) são os trechos a zona rural, já os trechos em verde (velocidade de 50 km/h) são utilizados na zona urbana e estradas municipais asfaltadas e os trechos em vermelho (velocidade 60 km/h) correspondem às rodovias estaduais que cortam o município.



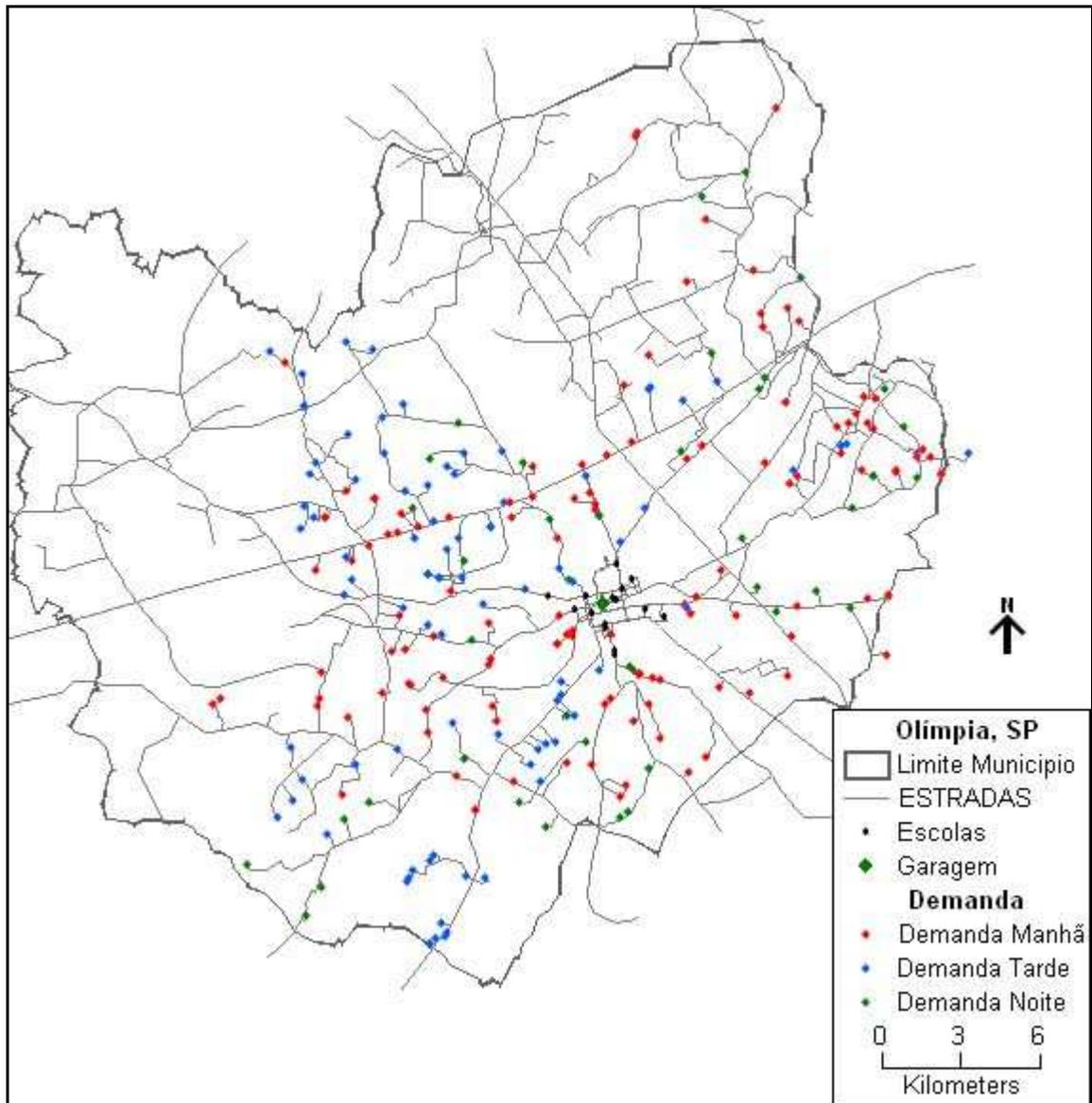
**Figura 5.14** – Velocidades nos trechos das vias

O Quadro 5.2 exhibe as restrições utilizadas em cada turno para o cálculo das rotas. O processo de melhoria foi executado durante 15 iterações.

**Quadro 5.2** – Restrições utilizadas no estudo de caso

| Turno | Tempo máximo de viagem (min) | Capacidade do veículo |
|-------|------------------------------|-----------------------|
| Manhã | 60                           | 12                    |
| Tarde | 60                           | 12                    |
| Noite | 60                           | 10                    |

A Figura 5.15 mostra a dispersão da demanda, cada cor representa os pontos de embarque da demanda por turno. O ponto na legenda chamado “Garagem” representa a Rodoviária de Olímpia, de onde partem as *kombis* para percorrer as rotas.



**Figura 5.15** – Dispersão da demanda pelo município

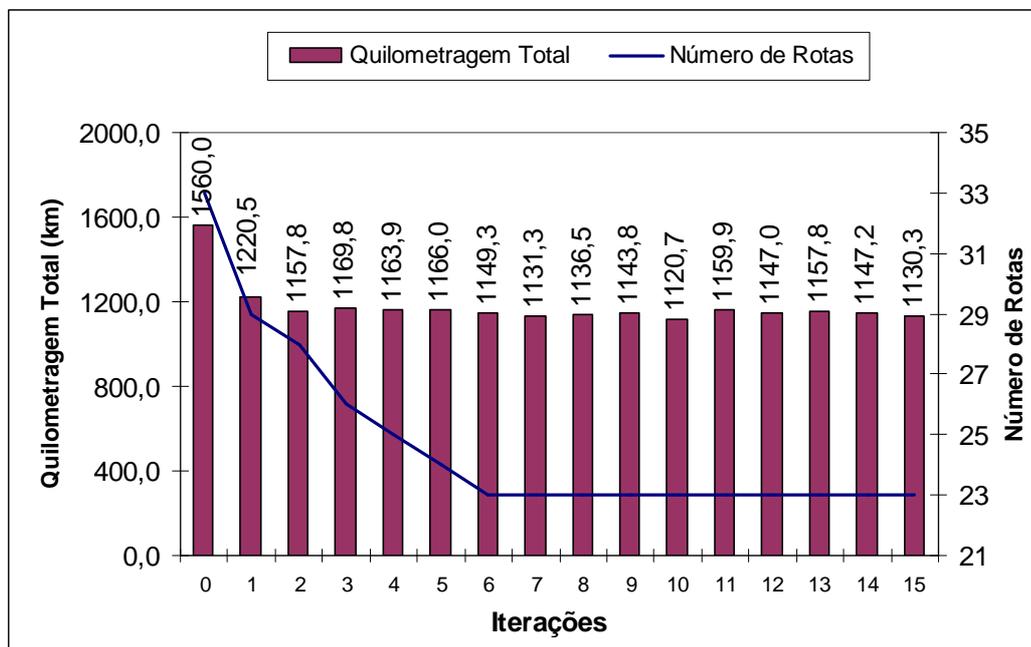
A Tabela 5.11 traz o número de rotas, a taxa média de ocupação dos veículos no sistema, a quilometragem percorrida e a quilometragem diária (percurso de ida e volta) para cada turno, resultantes da aplicação do algoritmo.

**Tabela 5.11** – Resultados encontrados aplicação do algoritmo

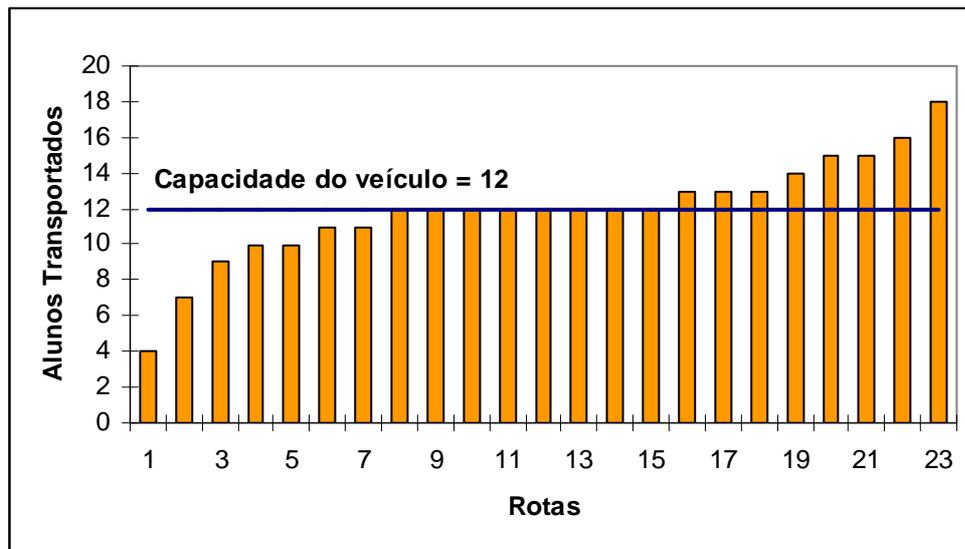
| Período | Nº de Rotas | Taxa Média de Ocupação (%) | Quilometragem das Rotas (km) | Quilometragem Diária (km) |
|---------|-------------|----------------------------|------------------------------|---------------------------|
| Manhã   | 23          | 100                        | 1120,7                       | 2241,4                    |
| Tarde   | 16          | 100                        | 790,1                        | 1580,2                    |
| Noite   | 8           | 90                         | 362,6                        | 725,2                     |
| Total   | 47          | -                          | 2273,4                       | 4546,8                    |

As Figuras 5.16, 5.18 e 5.20 mostram a quilometragem percorrida e o número de rotas da solução inicial (representado pelo número zero) e a cada iteração do processo de melhoria para o turno da manhã, tarde e noite, respectivamente. E nas Figuras 5.17, 5.19 e 5.21 é possível observar o número de embarques por rota da melhor solução para cada turno.

É importante destacar que apesar de algumas rotas possuírem mais alunos transportados do que a capacidade estipulada para os veículos, a restrição não foi violada. O que acontece é que alguns alunos são deixados em suas escolas e outros são pegos nos seus pontos de embarque, sem extrapolar a capacidade dos veículos e dentro da janela de tempo estipulada.

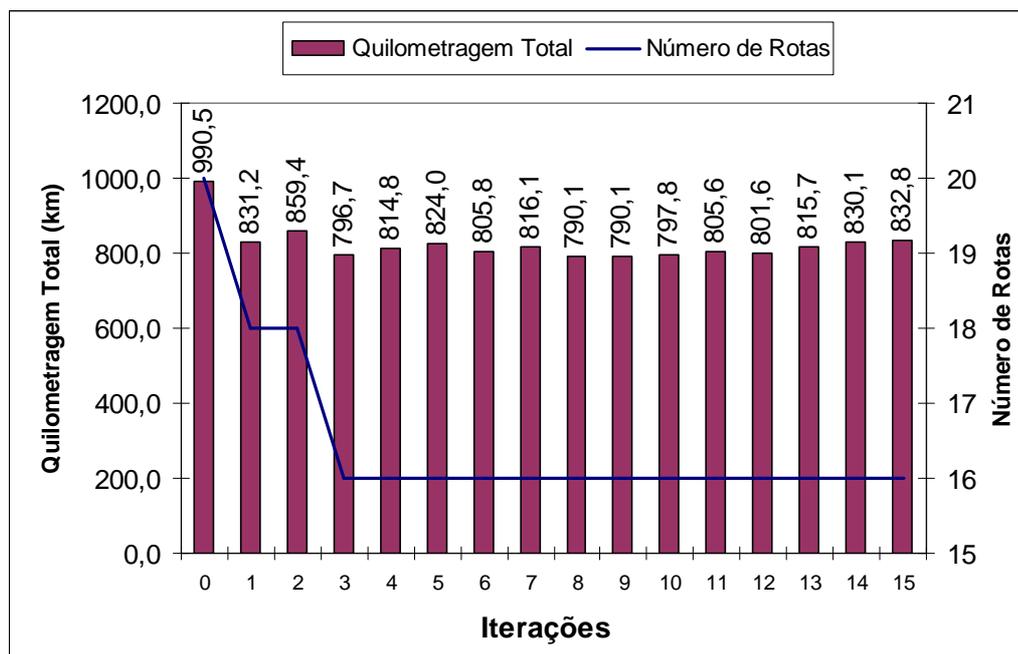


**Figura 5.16** – Turno Manhã – Quilometragem e número de rotas



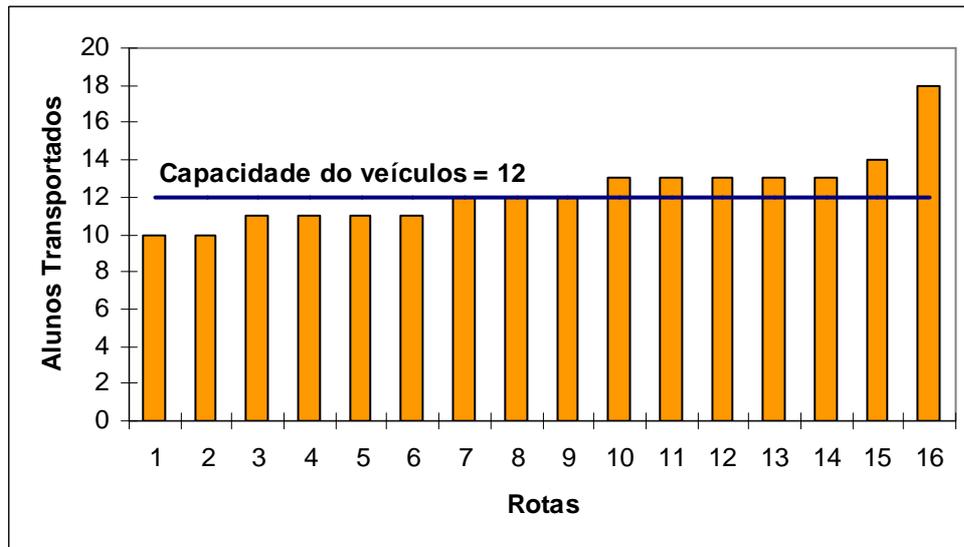
**Figura 5.17** – Turno Manhã – Alunos transportados por rota – melhor solução

A melhor solução para o turno da manhã foi conseguida na décima iteração (ver Figura 5.16). É possível perceber na Figura 5.17 que a capacidade dos veículos está sendo bem aproveitada, somente duas rotas tem menos de 8 alunos transportados.



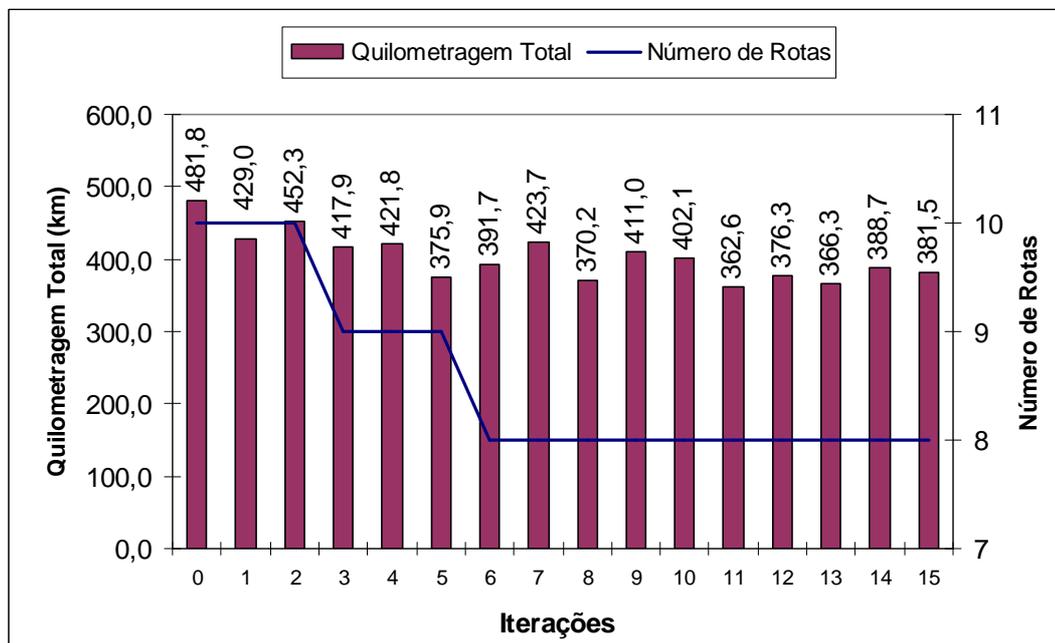
**Figura 5.18** - Turno Tarde – Quilometragem e número de rotas

Para o turno da tarde a melhor solução foi conseguida na oitava iteração como pode ser observado na Figura 5.18 e todas as rotas possuem 10 embarques ou mais (Figura 5.19).

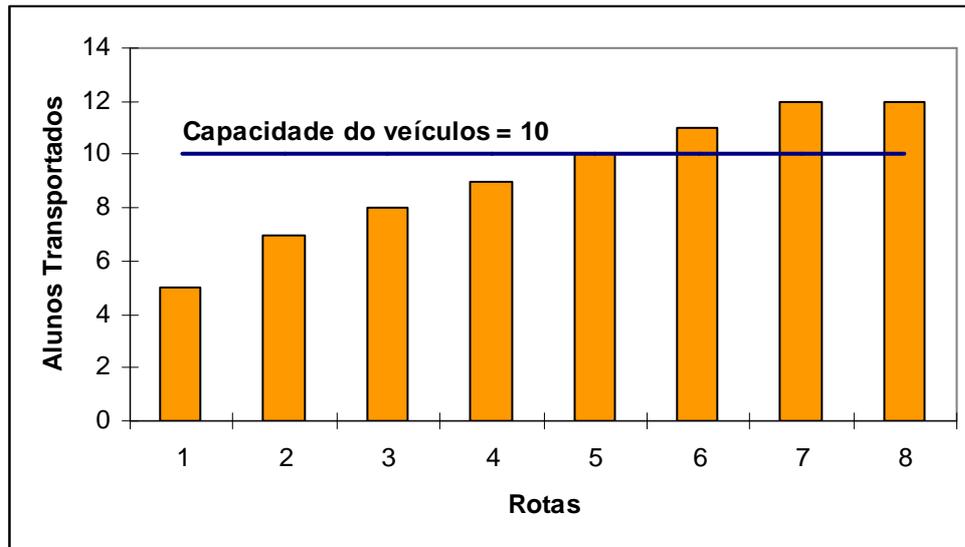


**Figura 5.19** – Turno Tarde – Alunos Transportados por rota –melhor solução

Já para o turno da noite a melhor solução foi encontrada na décima primeira iteração como pode ser observado na Figura 5.20. Somente duas rotas ficaram abaixo de 8 embarques como mostrado na Figura 5.21.



**Figura 5.20** – Turno Noite – Quilometragem e número de rotas



**Figura 5.21** – Turno Noite – Alunos transportados – melhor solução

Comparando-se os resultados encontrados na aplicação do algoritmo com as rotas existentes e as propostas (ver Tabelas 5.12 e 5.13) é possível observar, que houve diminuição do número de rotas em relação às rotas propostas, mas um aumento na quilometragem percorrida (16,8%). Já em relação às rotas existentes, manteve-se o número de rotas e houve um aumento na quilometragem percorrida (18,8%). Cabe ressaltar que as rotas existentes não levam em consideração as restrições de tempo e de capacidade dos veículos.

**Tabela 5.12** – Comparação do número de rotas

|                        | Número de Rotas |       |       |       |
|------------------------|-----------------|-------|-------|-------|
|                        | Manhã           | Tarde | Noite | Total |
| Algoritmo Implementado | 23              | 16    | 8     | 47    |
| Rotas Propostas        | 24              | 18    | 9     | 51    |
| Rotas Existentes       | 23              | 16    | 8     | 47    |

**Tabela 5.13** – Comparação da quilometragem percorrida

|                        | Quilometragem Percorrida (km) |       |       |        |
|------------------------|-------------------------------|-------|-------|--------|
|                        | Manhã                         | Tarde | Noite | Total  |
| Algoritmo Implementado | 1120,7                        | 790,1 | 370,2 | 2281,0 |
| Rotas Propostas        | 897,3                         | 655,2 | 339,7 | 1892,2 |
| Rotas Existentes       | 923,8                         | 621,3 | 301,1 | 1846,2 |

É interessante destacar também que o algoritmo existente no TransCAD considera todas as escolas localizadas em um único ponto da área urbana. Assim o percurso entre escolas foi feito manualmente pelos responsáveis pela assessoria. Inicialmente foram geradas as rotas (com o auxílio do TransCAD) considerando que todas as escolas se encontram agrupadas num único ponto (Rodoviária de Olímpia) e depois foram incluídas manualmente, para cada rota, as escolas para as quais os alunos se destinavam aumentando a quilometragem percorrida. Este procedimento, além de trabalhoso, não garante que o resultado obtido seja o “ótimo”.

### **5.3 Observações Conclusivas**

O objetivo deste capítulo foi analisar a viabilidade do algoritmo através do estudo de caso em duas cidades com características e demandas diferentes.

Para a cidade de São Carlos não foi possível comparar os resultados com as rotas executadas na prática, mas analisou-se o comportamento do algoritmo quando se trabalha com diferentes capacidades de veículos e diferentes tempos máximos de viagem.

Para o Transporte Escolar Rural de Olímpia foram utilizados dados coletados em 2002 através de uma assessoria prestada pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos. Foram comparados os resultados gerados pelo algoritmo com as rotas existentes e as propostas pela assessoria, obtendo-se resultados interessantes.

É importante observar que se trata de um método heurístico e que dessa forma não se obriga a encontrar a solução ótima para o problema, mas a forma como os dados são apresentados pela ferramenta facilita a visualização do usuário e permite que este consiga melhorar os resultados encontrados da maneira que melhor lhe aprouver.

Pode-se concluir também que o número de iterações do processo de melhoria estipulado para os estudos de caso mostrou-se satisfatório, pois, na maioria dos casos a melhor solução para o problema foi encontrada bem antes da última iteração. Sendo assim, este número será utilizado como padrão para o algoritmo.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este capítulo apresenta as conclusões do trabalho e algumas recomendações para trabalhos futuros.

### 6.1 Conclusões

Devido à grande relevância social e econômica do Transporte Escolar Rural, este trabalho propôs um algoritmo para tratar o problema das rotas, utilizando como ferramenta um Sistema de Informações Geográficas para Transporte.

O problema de roteirização do Transporte Escolar Rural foi tratado como um caso particular do problema de roteirização e programação do serviço de transporte de pessoas, conhecido como *Dial-a-Ride* e o algoritmo implementado foi baseado nos trabalhos de Znamensky (2000) e Mauri (2006) que tratam do transporte de pessoas com necessidades especiais.

O algoritmo foi desenvolvido em GISDK, um kit de desenvolvimento disponível do SIG-T TransCAD e, para que este pudesse ser utilizado de forma mais fácil, criou-se uma ferramenta que permite ao usuário entrar com os dados necessários ao algoritmo para a definição das rotas.

Esta ferramenta gera como saída o desenho das rotas no mapa e um arquivo texto bem completo com os itinerários das rotas, além de permitir a consulta destas individualmente e a geração de uma figura de cada rota selecionada.

Para testar a viabilidade do algoritmo foram realizados dois estudos de caso em cidades com características bem diferentes (São Carlos e Olímpia), gerando em todos os casos soluções viáveis.

Para São Carlos uma cidade com grande extensão territorial e demanda bem dispersa, além de possuir um grande número de escolas envolvidas, não foi possível comparar os resultados gerados pelo algoritmo com as rotas executadas na prática, mas analisou-se o comportamento do algoritmo quando se trabalha com diferentes capacidades de veículos e diferentes tempos máximos de viagem (janela de tempo).

Observando as características do município e a dispersão da demanda foi possível constatar que o tempo de viagem influencia muito na determinação das rotas, pois

dessa forma o algoritmo consegue minimizar a quilometragem percorrida e obter rotas que aproveitem melhor a capacidade dos veículos.

Já para Olímpia que possui uma demanda de alunos e um número de escolas bem menor em comparação com São Carlos, os resultados encontrados pelo algoritmo foram comparados com as rotas existentes e com as rotas propostas por uma assessoria realizada pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos.

Comparando as rotas existentes com as rotas geradas pelo algoritmo foi possível perceber que houve um aumento da quilometragem percorrida, mas as rotas executadas não levam em consideração a capacidade dos veículos nem o tempo de viagem dos estudantes o que justifica a menor quilometragem conseguida.

Com relação às rotas propostas pela assessoria houve uma diminuição do número de rotas e um aumento na quilometragem percorrida. É necessário levar em consideração que as rotas propostas foram geradas utilizando o procedimento de roteirização do TransCAD que considera que todas as escolas se localizam em um único ponto na área urbana; a ordem de visita das escolas para as quais os alunos das rotas se destinam foram especificadas manualmente aumentando a quilometragem e dificultando o trabalho dos profissionais envolvidos.

Outra questão a ser levada em conta é que para o cálculo do valor pago aos motoristas (de acordo com a sugestão da assessoria) também é levado em consideração o número de veículos utilizados e não somente a quilometragem percorrida. Dessa forma, a quantidade de rotas geradas pelo algoritmo proposto resulta em um custo menor do que o número de rotas proposto pela assessoria, mesmo que estas tenham aumentado a quilometragem total percorrida.

O tempo de processamento do algoritmo para obtenção das rotas variou bastante, pois este depende do número de pontos de embarque e pontos de desembarque envolvidos. Para as análises realizadas no município de São Carlos o tempo médio para cada simulação foi oito horas. Para o turno da manhã em Olímpia (turno com maior número de pontos de embarque) o tempo de processamento foi em torno de cinco horas. Já no período da tarde o tempo foi de uma hora e meia. No período da noite este tempo foi de vinte minutos.

Como vantagem do trabalho proposto pode-se evidenciar a forma como os dados são mostrados pela ferramenta (mapa com as rotas e arquivo texto com os itinerários) facilita bastante o entendimento e a programação das rotas por parte dos gestores do TER, o que pode economizar bastante o tempo de planejamento.

Outra vantagem é que a ferramenta permite que usuários sem muito conhecimento do TransCAD consigam gerar as rotas com pouca interação com as outras funcionalidades disponíveis neste *software*.

Apesar dos estudos de caso apresentados considerarem a utilização de várias escolas, o algoritmo também permite que se tenha somente uma escola no processo de roteirização.

Como o procedimento de Troca de Solicitações conta com certa aleatoriedade, para definir as solicitações que farão parte da troca, pode acontecer que com a mesma demanda e executando o programa várias vezes seja possível gerar diferentes soluções e estas serem melhores que a primeira em termos de quilometragem percorrida e número de rotas.

Como desvantagens e deficiências, destaca-se que o algoritmo só trabalha com frota homogênea e não garante a solução exata do problema, pois se trata de uma heurística, mas este consegue boas soluções para o problema.

## 6.2 Recomendações

Seria interessante investigar o uso de diferentes capacidades de veículos (frota heterogênea), já que a demanda do Transporte Escolar Rural encontra-se dispersa e pode variar muito dentro do município, além do mais muitos municípios utilizam frota heterogênea para atender a demanda.

Levando em consideração que o algoritmo utilizado é uma heurística que pode facilmente ficar presa a ótimos locais seria conveniente investigar o uso de outros procedimentos. Como exemplo, sugere-se a metaheurística *Simulated Annealing* que é de fácil implementação e que pode utilizar as heurísticas do procedimento de melhoria já implementado neste trabalho como estrutura para geração da vizinhança.

Como o TransCAD é um software proprietário de alto custo, inviável para muitas prefeituras, uma boa solução seria a implementação desta ferramenta em um SIG livre. Como exemplo pode-se citar o *OpenJUMP* e *TerraView*, dentre outros, dos quais se pode encontrar trabalhos bem interessantes relacionados à logística e transportes.

## 7 REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. F. B. **Roteirização de Veículos para o Transporte de Alunos da Zona Rural**. 1998. 191 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1998.
- ANGEL, R.; CAUDLE, W.; NOONAN, R.; WHINSTON, A.. Computer-assisted school bus scheduling. **Management Science Part: B**, v. 18, p. 279-288. 1972.
- BABA, C M.; CORRÊA, F. H. M.; SOUZA, S. A. C.; WAHBA, T. M.; MEDINA, A. C. Otimização da colônia de formigas aplicada ao problema da programação e roteirização de veículos para o transporte de pessoas portadoras de deficiência. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO – ENEGEP, 24, 2004, Florianópolis. **Anais...** Disponível em: <[http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2004\\_Enegep0601\\_2073.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2004_Enegep0601_2073.pdf)>. Acesso em: 10 Fevereiro de 2008.
- BENNETT, B.; GAZIS, D. School bus routing by computer. **Transportation Research**, v. 6, p. 317-326. 1972.
- BODIN, L.; BERMAN, L. Routing and scheduling of school buses by computer. **Transportation Science**, v. 13, n. 2, p. 13-129. 1979.
- BODIN, L.D.; GOLDEN, B.; ASSAD, A.; BALL, M.. Routing and scheduling of vehicles and crews: The state of the art. **Computers and Operations Research**, v. 10, n. 2. p. 63-211. 1983.
- BODIN, L.; GOLDEN, B. Classification in Vehicle Routing and Scheduling. **Networks**, v. 11, n. 2, p. 97-108. 1981.
- BRACA, J.; BRAMEL, J.; POSER, B.; SIMCHI-LEVI, D. A computerized approach to the new york city school bus routing problem. **IIE Transactions**, v. 29, p. 693-702. 1997.
- BRAMEL, J.; SIMCHI-LEVI, D. A Location Based Heuristic for General Routing Problems. **Operations Research**, v. 43, n. 4, p. 649-660. 1995.
- CALIPER. **TransCAD Transportation GIS Software**. User's Guide Version 3.0 for Windows. Caliper Corporation, Newton, EUA, 1996.
- CHEN, D.; KALLSEN, H. A Bus Routing System for Rural School Districts. **Computers and Industrial Engineering**, v. 19, p. 322- 325. 1990.
- CLARKE, G.; WRIGHT, J. Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. **Operations Research**, v. 12, n. 4, p. 568-581, 1964.
- CORDEAU, J. F.; LAPORTE, G. The dial-a-ride problem (DARP): Variants, modeling issues and algorithms. **4OR - Quarterly Journal of the Belgian, French and Italian Operations Research Societies**, v. 1, n. 2, p. 89-101, 2003a.
- CORDEAU, J. F.; LAPORTE, G. A tabu search heuristic for the static multi-vehicle dial-a-ride problem. **Transportation Research Part: B**, v. 37, p. 579-594, 2003b.

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

DESROSIERS, J.; FERLAND, J.; ROUSSEAU, J.-M.; LAPALME, G.; CHAPLEAU, L. An overview of a school busing system. In: SCIENTIFIC MANAGMENT OF TRANSPORT SYSTEMS. INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRANSPORTATION, 9, 1980. New Delhi. **Proceedings...** New Delhi: 1980, p. 235–243.

FNDE - Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação. **Metodologia de Caracterização do Transporte Escolar Rural**. Projeto: Transporte Escolar Rural, Volume I, Brasília, 2007a.

FNDE - Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação. **Questionário Web**. Projeto: Transporte Escolar Rural, Volume II. Brasília, 2007b.

FNDE – Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação. **Na Rota da Educação. Transporte Escolar Rural: Acesso e permanência na Escola**. Brasília, 2007c.

FNDE – Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação. **Transporte Escolar**. Disponível em: <[http://www.fnde.gov.br/home/index.jsp?arquivo=pnate\\_pnte.html](http://www.fnde.gov.br/home/index.jsp?arquivo=pnate_pnte.html)>. Acesso em: 28 de Abril de 2009. 2009a.

FNDE – Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação. **Resolução nº 14 de 8 de Abril de 2009**. Disponível em: <[ftp://ftp.fnde.gov.br/web/resolucoes\\_2009/res014\\_08042009.pdf](ftp://ftp.fnde.gov.br/web/resolucoes_2009/res014_08042009.pdf)>. Acesso em: 1 de Maio de 2009. 2009b.

FNDE – Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação. **Pnate 2009**. Disponível em: <[ftp://ftp.fnde.gov.br/web/transporte\\_escolar/alunos\\_beneficiados\\_e\\_valores\\_do\\_pnate\\_2009.pdf](ftp://ftp.fnde.gov.br/web/transporte_escolar/alunos_beneficiados_e_valores_do_pnate_2009.pdf)>. Acesso em: 30 de Abril de 2009. 2009c.

FRAGA, M. C. P. **Uma metodologia híbrida Colônia de Formigas – Busca Tabu - Reconexão por Caminhos para resolução do Problema de Roteamento de Veículos com Janelas de Tempo**. 2006. 79p. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional) - Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2006.

GAVISH, B.; SHLIFER, E. An approach for solving a class of transportation scheduling problems. **Europe Journal Operation Research**, v. 3, p. 122-134. 1979.

GEIPOT - Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes. **Avaliação Preliminar do Transporte Rural - destaque para o Segmento Escolar**. Ministério dos Transportes, Brasília, 1995.

Guimarães, A. Por que o Transporte Escolar anda mal. **Nova Escola on-line**, n. 170. 2004. Disponível em: <[http://novaescola.abril.com.br/index.htm?ed/170\\_mar04/html/transporte](http://novaescola.abril.com.br/index.htm?ed/170_mar04/html/transporte)>. Acesso em: 04 de Julho de 2007.

HAIDEMANN, H. P. **O problema Dial-a-Ride estático: estudo de caso para o transporte escolar**. 2007. 148 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1884/14450>>. Acesso em: 25 de Abril de 2009.

INEP – Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira. **Mapa do Transporte Escolar Brasileiro: 1º Levantamento do Transporte Escolar- Sinopse Estatística**. 2006. Disponível em:

<<http://www.publicacoes.inep.gov.br/detalhes.asp?pub=4074#>>. Acesso em: 5 de Maio de 2009.

INEP - Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira. **Sinopses Estatísticas da Educação Básica**. Disponível em:

<<http://www.inep.gov.br/basica/censo/Escolar/Sinopse/sinopse.asp>>. Acesso em: 28 de Dezembro de 2008.

JAW, J.-J.; ODONI, A. R.; PSARAFTIS, H. N.; WILSON, N. H. M. A heuristic algorithm for the multi-vehicle advance request dial-a-ride problem with time windows. **Transportation Research Part: B**, v. 20, n. 3, p. 243-257. 1986.

JIH, W. R.; KAO, C. Y.; HSU, F. Y. J. Using family competition genetic algorithm in pickup and delivery problem with time window constraints. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTELLIGENT CONTROL, 2002, Vancouver, Canada. **Proceedings**. p. 496 – 501.

LIN, S. Computer Solution of the Traveling Salesman Problem. **Bell System Technical Journal**, v. 44, p. 2245-2269. 1965.

LIN, S.; KLINGMAN, D. An Effective Solution to the Traveling Salesman Problem. **Operations Research**, v. 20, p. 498-516. 1973.

MADSEN, O.B.G.; RAVN, H.F.; RYGAARD, J.M. A heuristic for a dial-aride problem with time windows, multiple capacities, and multiple objectives. In: OPERATIONS RESEARCH, 1995. **Proceedings...** v. 60, n. 1, p. 193-208.

MAURI, G. R. Pesquisas **Uma Nova Abordagem para o Problema de Roteirização e Programação de Veículos**. 2006. 40 p. Qualificação (Doutorado em Computação Aplicada). Instituto Nacional de Espaciais - INPE, São José dos Campos, 2006.

MEC – Ministério da Educação. **Termo de Intenção**. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/arquivos/pdf/proescolar.pdf>>. Acesso em: 30 Abril de 2009. 2007.

MOLE, R. H.; JAMESON, S. A Sequential Route-building Algorithm Employing a Generalized Savings Criterion. **Operational Research Quartely**, v. 27, p. 503-511. 1976.

NEWTON, R. M.; THOMAS, W. H. Design of school bus routes by computer. **Socio-Economic Planning Science**, v. 3, p. 75-85. 1969.

NOVAES, A, G. Roteirização de Veículos. In: \_\_\_\_\_. **Logística e Gerenciamento da Cadeia de Distribuição: estratégia, operação e avaliação**. 2 ed. Rio de Janeiro: Campos e Elsevier, 2004. p. 289- 320.

PARÁIBA, L. C.; FERNANDES, J. F. R.; ANDO, A. S. **Um Algoritmo Heurístico de Construção Paralela para o Problema do M-Caixeiro Viajante**. Campinas: UNICAMP/Departamento de Engenharia Elétrica e Sistemas, 1990. Trabalho de circulação interna.

PEGORETTI, M. S. **Definição de um Indicador para Avaliar a Acessibilidade dos Alunos da Zona Rural às Escolas da Área Urbana**. 2005. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

PEIXOTO, M. Q. B; SENNE, E. L. F. **Solução de Problemas de Localização e Roteamento em Redes com Sistemas de Informações Geográficas**. Guaratinguetá: Unesp - Universidade Estadual Paulista/Departamento de Engenharia de Produção, 2002. Relatório de Estágio.

PSARAFTIS, H. N. A Dynamic Programming Solution to the Single-Vehicle Many-to-Many Immediate-Request Dial-A-Ride Problem. **Transportation Science**, v. 14, n. 2, p. 130-154. 1980.

RASHIDI, T. H.; ZOKAEI-AASHTIANI, H.; MOHAMMADIAN, A. School Bus Routing Problem in Large-Scale Networks: A New Approach Utilizing Tabu Search on Case Study in Developing Countries. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 88, 2009. Washington. **Proceedings... DVD**.

REGO, C. Relaxed tours and path ejections for the traveling salesman problem. **European Journal of Operational Research**, v. 106, n. 2, p. 522-538. 1998a.

REGO, C. A Subpath Ejection Method for Vehicle Routing Problem. **Operational and Research and the Management Science**, v. 44, n 10, p. 1447- 1459. 1998b.

REGO, C. Node Ejection Chains for the Vehicle Routing Problem: Sequential and Parallel Algorithms. **Parallel Computing**, v. 27, p. 201-222. 2001.

RIBEIRO, C.C. Metaheuristics and Applications. In: ADVANCED SCHOOL ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE, Estoril, Portugal, 1996.

RIPPLINGER, D. The Rural School Vehicle Routing Problem. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 1922, p. 105-110. 2005.

ROSENKRANTZ, D.; STEARNS, R.; LEWIS, P. Approximate algorithms for the traveling sales person problem. In: ANNUAL IEEE SYMPOSIUM ON SWITCHING AND AUTOMATA THEORY, 15, 1974. **Proceedings... p. 33-42**.

SALHI, S.; RAND, G. K. Incorporating Vehicle Routing into the Vehicle Fleet Composition Problem. **European Journal of Operational Research**, v. 66, p. 313-330. 1993.

SANCHES, S.P.; FERREIRA, M.A.G. Avaliação do padrão de acessibilidade em um sistema de transporte de alunos da zona rural. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES – ANPET, 17, 2003, Rio de Janeiro. **Anais... Rio de Janeiro: 2003, v. 2, p. 931-942**.

SANCHES, S.P.; FERREIRA, M.A.G. Avaliação Multicriterial de um Sistema de Transporte de Alunos da Zona Rural. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES – ANPET, 20, 2006, Brasília. **Anais... Brasília: 2006, v. 1, p. 278-289**.

SANCHES, S. P; FERREIRA, M. A. G.; SILVA, F. S. D.; CORREA, M. A. F. **Estudo do Transporte de Alunos da Zona Rural de Olímpia** São Carlos: Universidade Federal de São Carlos/Departamento de Engenharia Civil, 2002. 42 p. Programa de Assessoria e Consultoria

a Pessoas ou Instituições Públicas ou Privadas em Estudos Relacionados à Engenharia de Transportes.

SÃO CARLOS. Secretaria Municipal da Fazenda. **Concorrência Pública nº 001/2007**. Processo nº 21647/2006.

SILVA, A. R.; TEDESCO, G. M. I.; YAMASHITA, Y.; GRANEMANN, S. R. Metodologia para Roteirização do Transporte Escolar Rural. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES – ANPET, 21, 2007, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: 2007. CD-ROM.

SOUZA, W. M. **Aplicação da mineração de dados para o levantamento de critérios do Programa Nacional do Transporte Escolar**. 2004. 168 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Departamento de engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília. Disponível em: <<http://www.transportes.unb.br/paginas/2004>>. Acesso em: 4 de Maio de 2009.

SOUZA, M. J. F. **Inteligência Computacional para Otimização**. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto/Departamento de Computação, 2008. 59 p. Notas de aulas. Disponível em: <<http://www.decom.ufop.br/prof/marcone>>. Acesso em: 10 de Setembro de 2008.

SPADA, M.; BIERLAIRE, M.; LEIBLING, T. Decision-aid Methodology for the School Bus Routing and Scheduling Problem. In: SWISS TRANSPORT RESEARCH CONFERENCE, 3. 2003. Disponível em: <<http://infoscience.epfl.ch/record/117131/files/>> . Acesso em: 10 de Dezembro de 2008.

SPASOVIC, L.; CHIEN, S.; KELNHOFER-FEELEY, C. A Methodology for Evaluation of School Bus Routing – A Case Study of Riverdale, New Jersey. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 80, 2001, Washington. **Proceedings...** CD-ROM.

STEINER, M. T. A.; ZAMBONI, L. V. S.; COSTA, D. M. B.; CARNIERI, C.; SILVA, A. L. O Problema de Roteamento no Transporte Escolar. Scielo Brasil. **Pesquisa Operacional**, v. 20, n. 1, p. 83-99. 2000. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0101-74382000000100009](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-74382000000100009)>. Acesso em: 20 de Julho de 2007.

SUTCLIFFE, C.; BOARD, J. Optimal solution of a vehicle-routeing problem: transporting mentally handicapped adults to an adult training centre. **Journal of the Operational Research Society**, v. 41, n. 1, p. 61-67. 1990.

THANGIAH, S. R.; WILSON, B.; PITLUGA, A.; MENNELL, W. **School Bus Routing in Rural Districts**. Working paper. 2004. Disponível em: <<http://srufaculty.sru.edu/sam.thangiah/publications.htm>>. Acesso em: 20 de Junho de 2007.

TOTH, P.; VIGO, D. Fast local search algorithms for the handicapped persons transportation problem. In: OSMAN, I. H.; KELLY, J. P. **Meta-Heuristics: Theory and Applications**. Berlin Springer, 1996. p. 677-690.

VASCONCELLOS, E. A.. Transporte Rural: o resgate de um tema esquecido. **Revista dos Transportes públicos**, n. 75, p. 31-48, 1997.

ZNAMENSKY, A. **Um Modelo para a Roteirização e Programação do Transporte de**

**Deficientes.** 2000. 189 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

ZNAMENSKY, A.; CUNHA, C. B. Heurísticas para o Problema de Roteirização e Programação do Transporte de Deficientes. **Transporte em Transformação V.** Prêmio CNT 2000.

## **APÊNDICES**

**APÊNDICE A** – Manual de utilização da ferramenta desenvolvida

**APÊNDICE B** – Resultado das simulações de São Carlos

**APÊNDICE C** – Pseudocódigo das heurísticas implementadas

## APÊNDICE A

### 1 MANUAL DE UTILIZAÇÃO DA FERRAMENTA

Serão descritos aqui os passos para utilização da ferramenta implementada para o cálculo das rotas do Transporte Escolar Rural.

Este manual parte do princípio de que o usuário já tem alguma familiaridade com o TransCAD ou que pelo menos saiba gerar o mapa com as camadas e os atributos necessários ao sistema.

#### 1.1 Configurações Iniciais

Antes de iniciar a utilização da ferramenta é necessário que algumas configurações sejam realizadas, como a criação do arquivo com a demanda de alunos, o mapa com as camadas e atributos necessários ao perfeito funcionamento da ferramenta e a instalação da *Add-in* criada para o cálculo das rotas no TransCAD.

##### 1.1.1 Arquivo de demanda

O arquivo de demanda fornece à ferramenta a demanda de alunos que utiliza o transporte escolar rural em cada turno de aula. Este arquivo traz para cada aluno um par fazenda-escola, indicando o ponto de embarque (fazenda) do aluno e seu ponto de desembarque (escola).

Como podem existir muitas fazendas com nomes iguais, cada fazenda e escola serão representadas por um código (número inteiro) que identifica de forma única cada uma delas.

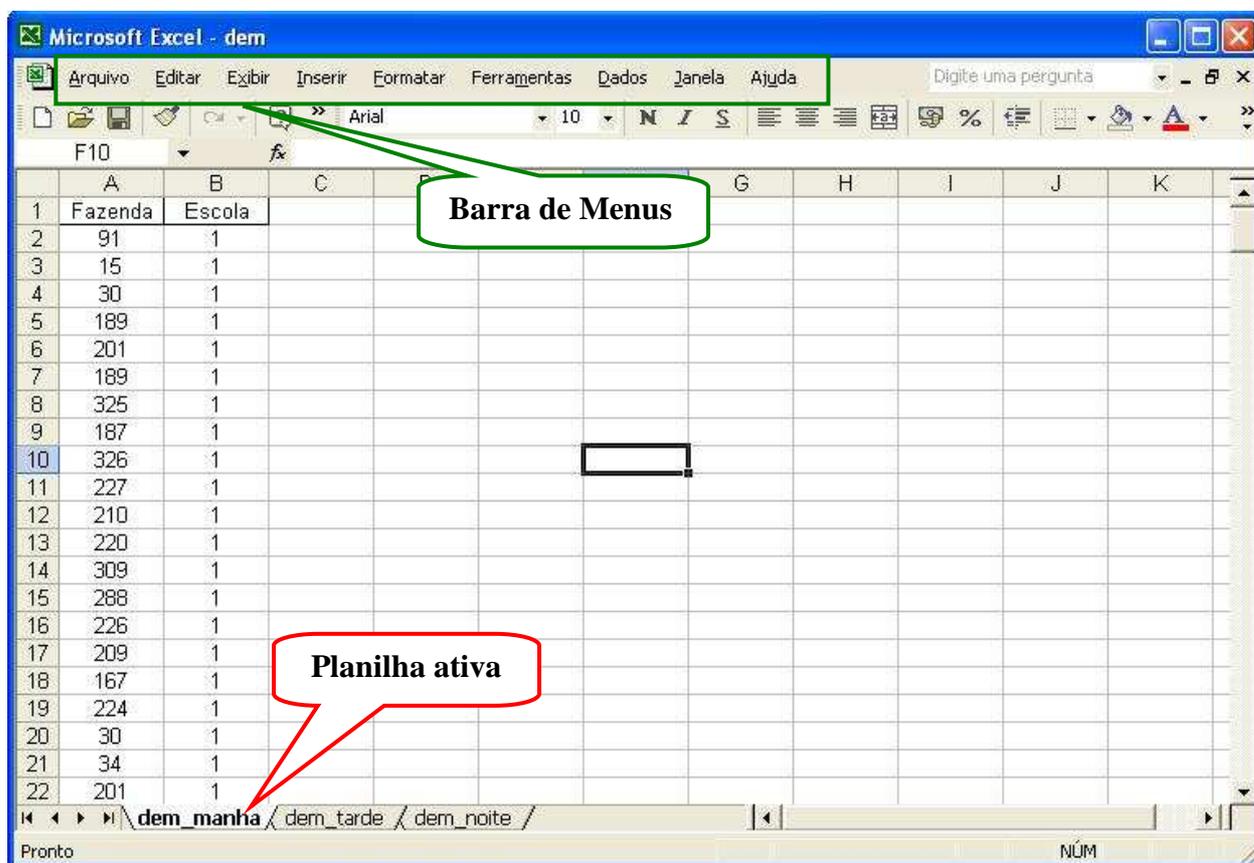
Estes arquivos deverão ser montados no *Microsoft Excel* que permite salvar arquivos com extensão “CSV” que é um formato de dados que pode ser lido pelo TransCAD.

O arquivo com extensão “CSV” (separado por vírgula) é um arquivo texto que guarda as informações diferentes na mesma linha separando-as por vírgula. A seguir serão descritos os passos para gerar este arquivo.

Primeiramente cria-se um arquivo comum no *Excel* com o código da fazenda e o código da escola de cada aluno: a primeira coluna irá representar o código da fazenda e a segunda coluna o código da escola a que o aluno se destina. O cabeçalho da coluna de

fazendas deverá conter o nome “Fazenda” maiúsculo ou minúsculo e no singular e o das escolas o nome “Escola”, da mesma forma que para as fazendas como mostra a Figura 1.

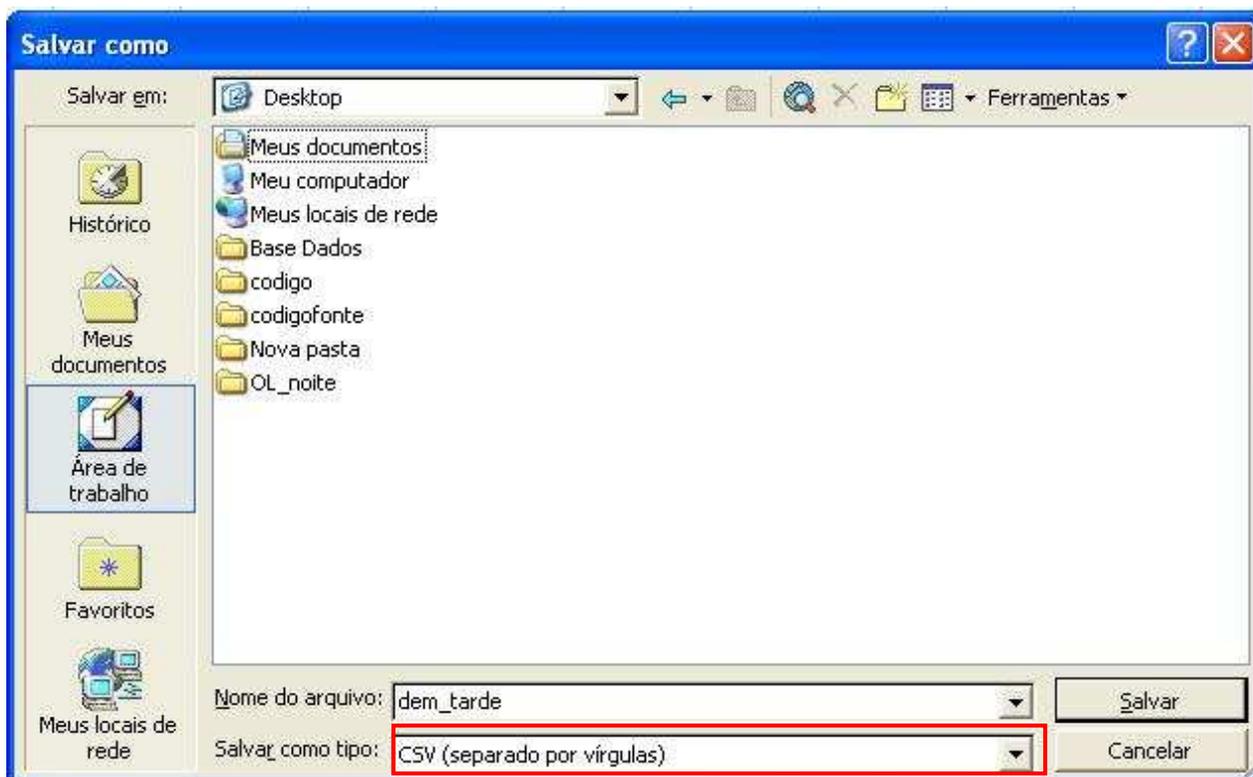
Para cada turno deve ser gerada uma planilha diferente e um arquivo com a extensão “CSV”.



**Figura 1** – Arquivo do Excel com a demanda separada por turno.

Se o arquivo do *Microsoft Excel* tiver mais de uma planilha, a que se deseja gerar o arquivo no formato “CSV” deve estar ativa (ver destaque Figura 1), pois, só é possível gerar o arquivo para este formato com uma planilha de cada vez.

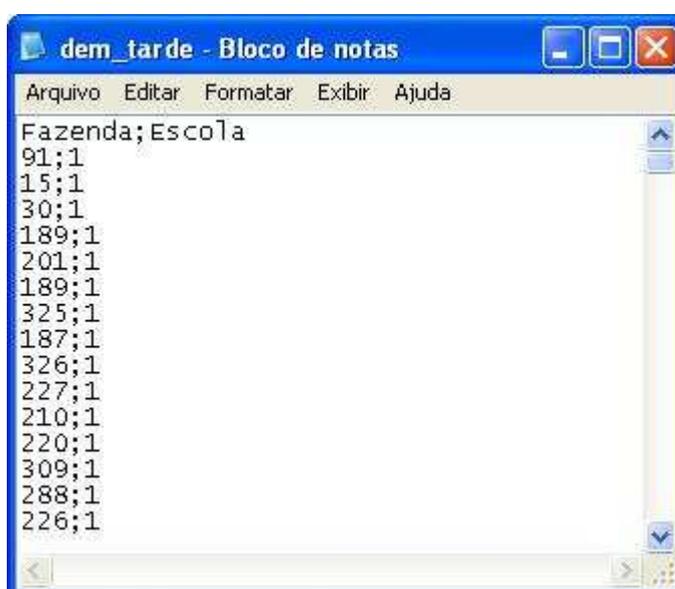
Após selecionar a planilha no *Microsoft Excel*, o usuário poderá criar o arquivo com o formato que a ferramenta necessita, para isso, na barra de menus do *Microsoft Excel* escolha no menu “Arquivo” a opção “Salvar como”. Será mostrada uma janela para que sejam escolhidos o nome do arquivo, o formato e o local onde se deseja salvá-lo (Figura 2).



**Figura 2** – Caixa de diálogo mostrando o tipo de arquivo que se deseja salvar

Em “Salvar como tipo” escolha a opção “CSV (separado por vírgulas)”, como mostrado na Figura 2, dê um nome para o arquivo, escolha o local onde deseja salvá-lo e clique em “Salvar”.

Se o arquivo for aberto no *notepad* (bloco de notas do *Windows*) ele será visualizado da forma mostrada na Figura 3.



**Figura 3** – Arquivo texto no formato CSV

É possível notar na Figura 3 as características do arquivo com formato CSV, cada coluna da planilha ficou separada uma vírgula, cada linha nesse arquivo representa o código da fazenda e a escola de um aluno.

Para abrir este arquivo no *Microsoft Excel* basta ir em: Arquivo→Abrir, na opção “Arquivos do tipo” escolher a opção “Arquivos de texto” buscar o arquivo no formato “CSV” que se deseja abrir. Este será mostrado normalmente como uma planilha comum do *Microsoft Excel* do mesmo modo que na Figura 1.

### 1.1.2 Arquivos Geográficos

O TransCAD trabalha com arquivos geográficos em camadas (pontos, linhas, áreas) e cada uma dessas camadas possui atributos, composto por informações espaciais e comuns.

Por exemplo, uma camada de pontos possui um atributo que identifica cada ponto que compõe a camada de forma única (chamado de *ID*) que é gerado automaticamente quando o arquivo de pontos é criado. Além deste, também são criados os atributos Latitude e Longitude que juntos formam a coordenada geográfica do ponto.

Da mesma forma uma camada de linhas também possui um código identificador *ID*, um atributo indicando o comprimento dessa linha chamado *Length* e um chamado *Dir* que indica em qual direção essa linha pode ser percorrida (no sentido que a linha foi desenhada, no sentido contrário em que a linha foi desenhada ou nos dois sentidos). Ao criar uma camada de linha, uma outra camada é criada automaticamente. Esta é uma camada de pontos e guarda as informações dos pontos onde uma linha começa e termina, esta é mais conhecida como “camada intermediária”.

Além dos atributos que são gerados automaticamente na criação de um arquivo geográfico, outros atributos podem ser adicionados às camadas e podem ser utilizados na análise dos diversos problemas que o software resolve, ou para os programas escritos em GISDK.

Para a ferramenta implementada serão necessárias quatro camadas e alguns atributos extras em cada uma delas. A seguir são detalhadas as camadas a serem utilizadas e os atributos que cada uma delas deve possuir para que o sistema seja executado.

## 1. Fazendas

Esta é uma camada de pontos que contem a localização das fazendas ou pontos de parada dos estudantes. Esta camada deverá conter um atributo que represente o nome da fazenda, outro que represente o código da fazenda (que pode ser o *ID* da fazenda, que é gerado automaticamente na criação), um atributo para representar o horário de início da janela de tempo e outro para o horário de fechamento da janela de tempo.

Para exemplificar como devem ser escritos os atributos de horário de início e de fechamento da janela de tempo, tomemos como exemplo uma fazenda que tem como horário de início de abertura de janela de tempo 11:00 da manhã e horário de fechamento 12:00.

O horário de abertura será representado com o valor: 1100 e o horário de fechamento com o valor: 1200. Ou seja, é o valor da hora sem os “dois pontos” (:).

## 2. Escolas

Esta também é uma camada de pontos e terá um atributo que representa o nome da escola e outro que representa o código da escola, que também poderá ser o *ID* da camada de escola como na camada fazendas.

## 3. Garagem

Esta é uma camada de pontos e nela só existe um ponto contendo a localização da garagem. Não é necessário nenhum atributo extra.

## 4. Sistema Viário

A última camada necessária para que o sistema possa ser utilizado é a camada que representa os trechos de ruas, rodovias e estradas por onde os veículos circulam para pegar os alunos e levá-los às suas respectivas escolas. Além dos atributos que são gerados pelo TransCAD, serão necessários um que represente a velocidade permitida no trecho da via (em km/h) e um que represente o tempo médio gasto para percorrer o trecho de via (em minutos). Este último atributo pode ser calculado através do atributo de velocidade e do atributo que representa o comprimento do trecho de via (*Length*) através da fórmula:

$$t_{\text{medio}} = \text{Length} / \text{velocidade} \times 60 \quad (1)$$

Onde:

- $t_{\text{medio}}$  = tempo médio de viagem no trecho da via;
- *Length* = comprimento do trecho de via em quilômetros;

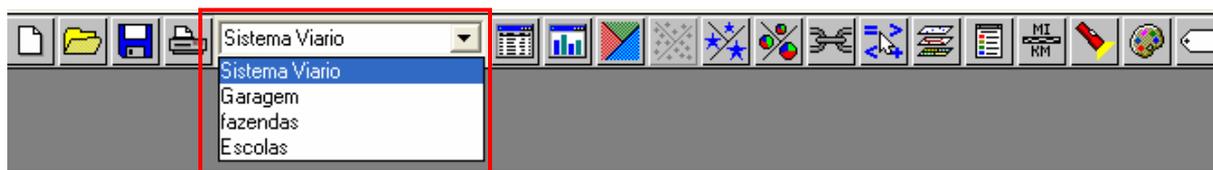
- velocidade = velocidade média no trecho de via em km/h.

Esta fórmula fornece o tempo médio em minutos. O campo tempo pode ser preenchido automaticamente através de um comando disponível no TransCAD que será descrito a seguir.

#### 1.1.2.1 Preenchendo o atributo tempo na camada de linha

Com o mapa a ser utilizado já aberto, no item em destaque na Figura 5 é possível ver todas as camadas presentes no mapa. Neste local é possível selecionar uma camada para torná-la ativa e poder manipulá-la.

Selecione a camada que representa as linhas (neste mapa é “Sistema Viario”). Após selecionar clique no ícone mostrado na Figura 6. Este irá abrir uma tabela com todos os atributos da camada selecionada (ver Figura 7).



**Figura 5** – Barra de Ferramentas do TransCAD



**Figura 6** – Ferramenta para acessar a tabela de atributos de uma camada

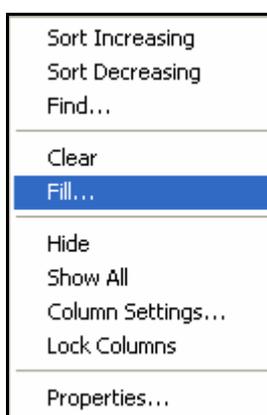
Com a tabela de atributos aberta é possível visualizar e alterar as informações contidas nesta camada como mostrado na Figura 7. No destaque em vermelho nessa figura é possível visualizar todos os atributos presentes nesta camada, os atributos *ID*, *Length* e *Dir* que são gerados automaticamente na criação da camada e os atributos “NOME”, “TempoMin” e “Velocidade”. Toda vez que é adicionada uma linha nesta camada, os atributos internos são preenchidos automaticamente e os outros devem ser preenchidos manualmente.

| ID   | Length | Dir | NOME                 | TempoMin | Velocidade |
|------|--------|-----|----------------------|----------|------------|
| 20   | 5.41   | 0   |                      | 10.82    | 30.00      |
| 1402 | 2.08   | 0   |                      | 4.15     | 30.00      |
| 36   | 0.51   | 0   |                      | 1.01     | 30.00      |
| 16   | 0.24   | -1  | RUA EPISCOPAL        | 0.48     | 30.00      |
| 3456 | 0.24   | -1  | RUA DONA ALEXANDRINA | 0.47     | 30.00      |
| 3458 | 0.22   | 1   | RUA SAO JOAQUIM      | 0.44     | 30.00      |
| 14   | 0.23   | -1  | RUA SAO PAULO        | 0.46     | 30.00      |
| 2210 | 0.61   | 0   |                      | 1.22     | 30.00      |
| 874  | 1.69   | 0   |                      | 3.38     | 30.00      |
| 1152 | 3.64   | 0   |                      | 7.28     | 30.00      |
| 48   | 0.58   | 0   |                      | 1.17     | 30.00      |
| 46   | 1.05   | 0   | SP 215               | 1.05     | 60.00      |

**Figura 7** – Tabela de atributos da camada de linha

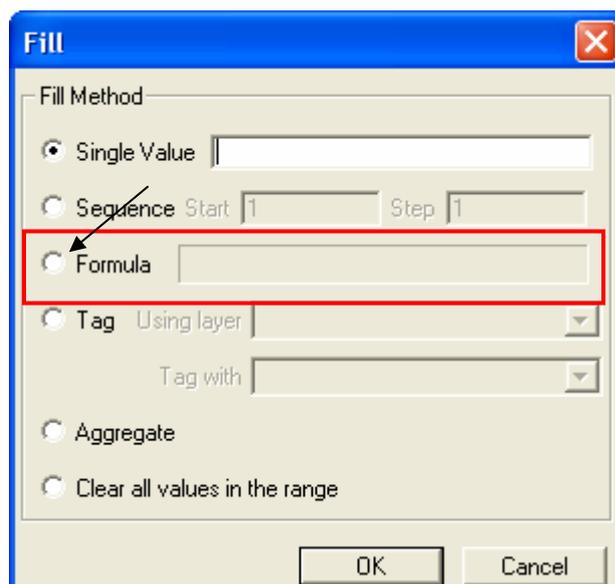
Para preencher o campo tempo, sem precisar calculá-lo individualmente para cada segmento de linha, clique com o botão direito do *mouse* em cima da área em destaque clique onde está escrito o nome do atributo que representa o tempo (no caso da Figura 7, basta clicar em cima do nome “TempoMin”).

Isso fará com que apareça uma lista de opções como mostrado na Figura 8. Escolha a opção “Fill...” e será mostrada uma caixa de diálogo com o cabeçalho “Fill” (ver Figura 9).



**Figura 8** – Lista de opções para uma coluna de uma tabela de atributos

Nesta caixa escolha a opção “Formula” e aparecerá uma nova caixa de diálogo como mostrado na Figura 10 para que seja editada a fórmula para preencher o campo tempo.



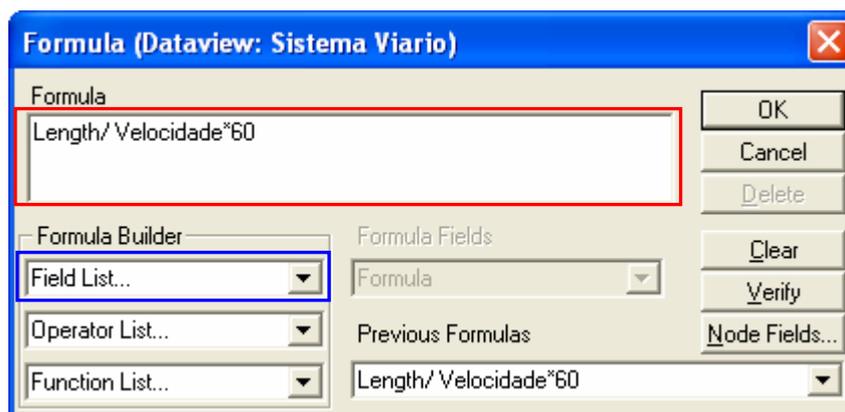
**Figura 9** – Caixa de diálogo para preenchimento automático de atributos de tabelas

Como citado anteriormente a fórmula que será utilizada para preencher o campo é o comprimento do trecho de via dividido pela velocidade média do trecho, multiplicado por 60 para obtermos o valor do tempo em minutos. O comprimento está representado pelo atributo “*Length*” gerado automaticamente quando uma linha é criada na camada, já o atributo de velocidade deverá ser preenchido pelo usuário com a respectiva velocidade em cada trecho de linha. Com esses atributos preenchidos pode-se preencher a coluna tempo utilizando uma fórmula.

A área destacada em vermelho na Figura 10 indica onde deverá ser escrita a fórmula que será utilizada. Tudo que for digitado nesta área fará parte da fórmula gerada.

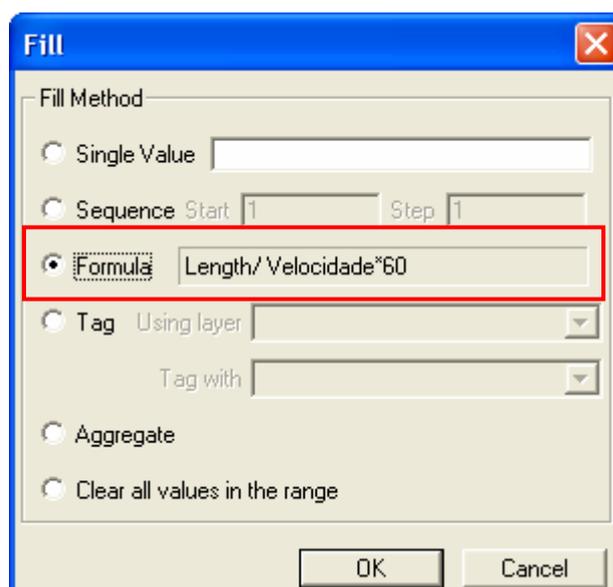
No campo “*Field List*” (área destacada em azul) escolha o atributo “*Length*”; digite “/”; escolha no campo “*Field List*” o atributo que representa a velocidade (no nosso exemplo este se chama “Velocidade”); digite “\*” e logo depois digite o valor 60.

A fórmula deverá ficar como mostrada no campo “Formula” da Figura 10 (área destacada em vermelho), clique no botão “OK” nesta caixa de diálogo, com isso a caixa de diálogo da Figura 9 será exibida novamente agora mostrando a opção “Formula” preenchida da forma especificada anteriormente (ver Figura 11).



**Figura 10** – Caixa de diálogo de formula para preenchimento de atributos de tabela

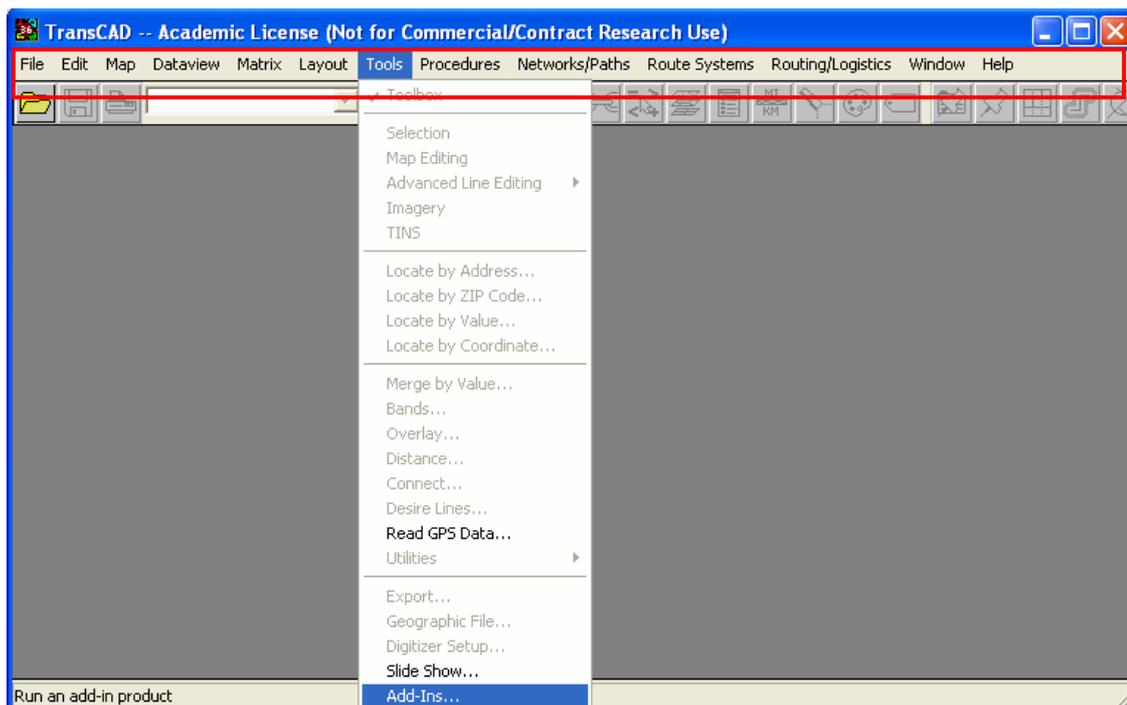
Na caixa de diálogo da Figura 11 clique também no botão “OK”, dessa forma a coluna tempo será preenchida automaticamente de acordo com esta fórmula. Os valores serão mostrados como na Figura 7.



**Figura 11** – Caixa de diálogo “Fill” com a opção fórmula preenchida

### 1.1.3 Instalando a *Add-In*

O acesso à ferramenta se dá através da instalação de uma *Add-in*. Para isto foi disponibilizado um diretório chamado “Interface TER” com os arquivos necessários para este processo. Este diretório é composto de um arquivo chamado “interface.dbd” e outros arquivos que dão suporte à este e permitem a execução da ferramenta implementada em GISDK. Salve este diretório em C:\Arquivos de Programas\TransCAD.



**Figura 12** – Janela do TransCAD mostrando a barra de menus

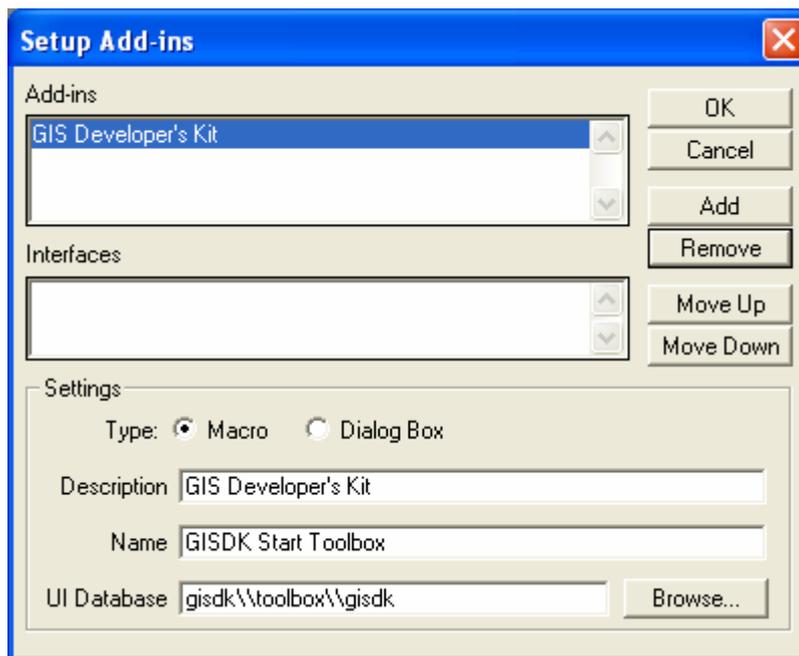
Na barra de menus do TransCAD (Figura 12) selecione o menu “Tools” e logo depois o submenu “Add-Ins...” isto abrirá a caixa de diálogo mostrada na Figura 13. Esta caixa de diálogos é a responsável pelo acesso a todas as *Add-ins* já instaladas e também pela instalação de novas *Add-ins*.

A *Add-in* chamada “GIS Developer’s Kit” mostrada na Figura 13 já vem instalada no TransCAD e é a responsável pela exibição da caixa de ferramentas que compila os arquivos escritos em GISDK.



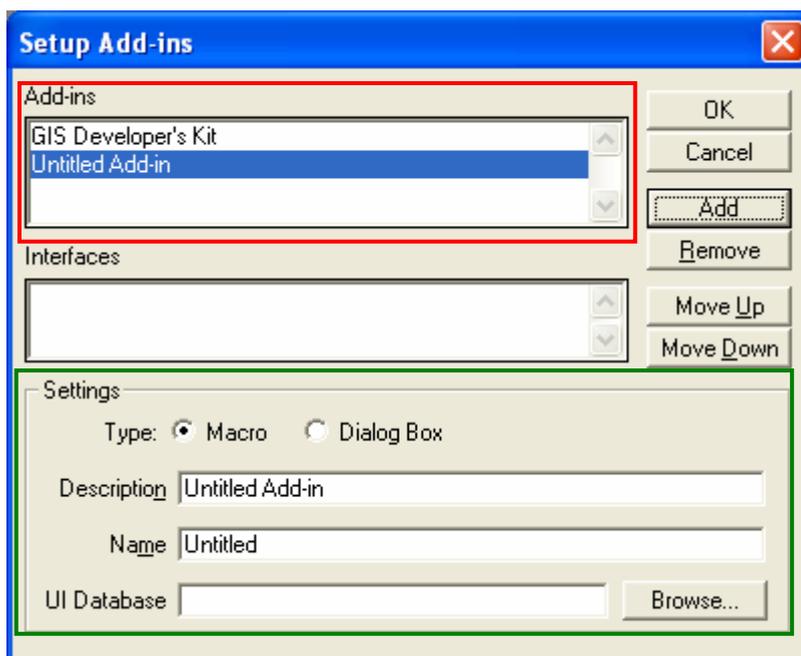
**Figura 13** – Caixa de diálogo com as Add-Ins instaladas

Na Figura 13 clique no botão “Setup...” isso abrirá a caixa de diálogo da Figura 14 que permite instalar outras *Add-Ins* ao TransCAD. Clique no botão “Add”, este irá adicionar ao campo *Add-ins* (ver destaque em vermelho da Figura 15) uma nova *Add-in* chamada “Untitled Add-in”. Esta deverá estar selecionada como mostrado na Figura 15.

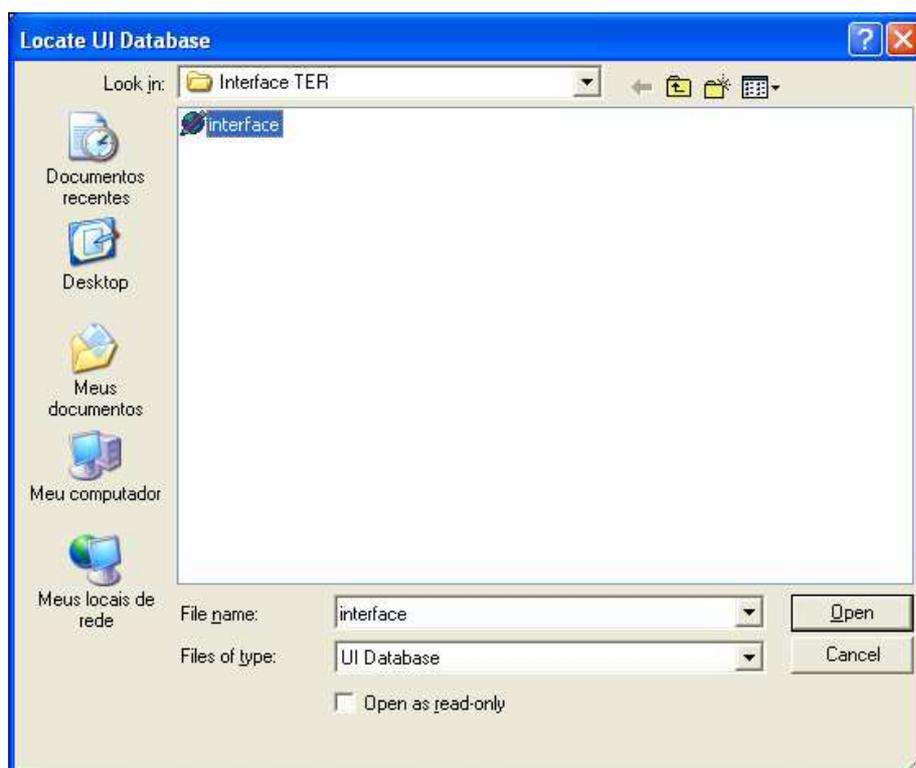


**Figura 14** – Caixa de diálogo que instala as Add-Ins criadas

O item “*Settings*” (destacado em verde na Figura 15) é o responsável por adicionar os dados da nova *Add-in* a ser instalada. No campo “*Type*” certifique-se que a opção “Macro” está selecionada. Os campos “*Description*” e “*Name*” devem ser preenchidos respectivamente com os valores: “TER” e “Adicionar Menu”. O campo “*UI Database*” deverá conter o caminho e o nome do arquivo “interface.dbd” disponibilizado. Clique no botão “*Browse...*” e será aberta a janela mostrada na Figura 16. Busque o diretório “C:\Arquivos de Programas\TransCAD\Interface TER” e neste selecione o arquivo “interface.dbd” como mostrado na Figura 16.



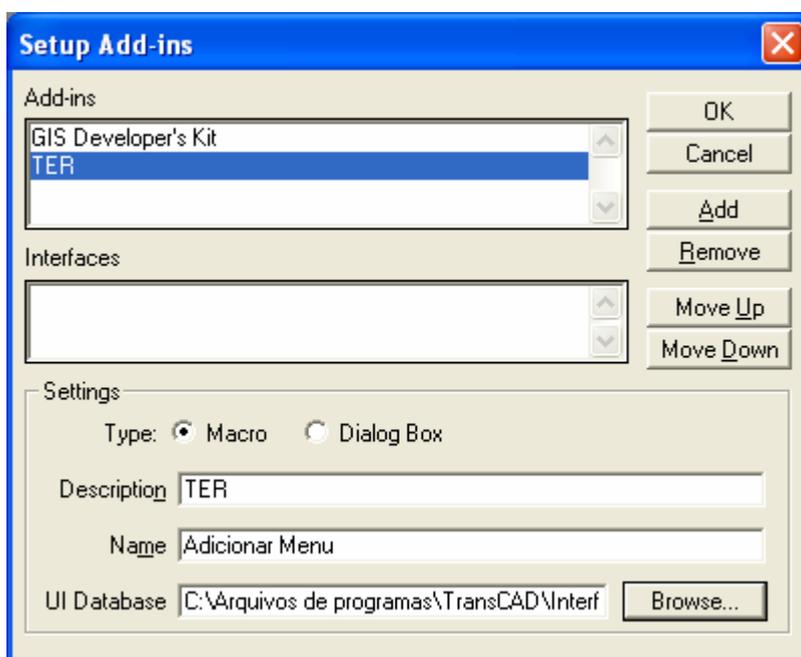
**Figura 15** – Instalando uma nova *Add-in*



**Figura 16** – Selecionando a *UI Database* a ser instalada

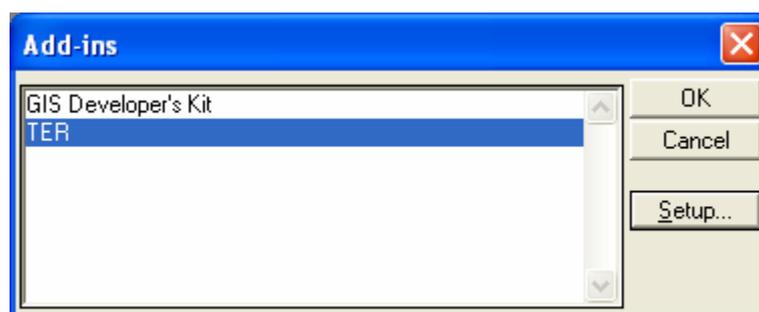
Clique no botão “*Open*” e será exibida novamente a caixa de diálogo da Figura 15, agora mostrando o campo “*UI Database*” preenchido com o caminho do arquivo

selecionado como na Figura 17. Os dados devem estar preenchidos exatamente como na Figura 17.



**Figura 17** – Caixa de diálogo com os valores corretos a serem preenchidos

Na caixa de diálogo da Figura 17 clique no botão “OK” e esta será fechada e mostrará novamente a caixa de diálogo da Figura 13. Agora com a *Add-In* chamada “TER” instalada e pronta para ser utilizada como exibido na Figura 18.



**Figura 18** – Caixa de diálogo com as *Add-ins* instaladas

Este processo de instalação é feito somente uma vez. Assim, sempre que for necessário utilizar a ferramenta para o cálculo das rotas basta acessar esta caixa de diálogo selecionar a *Add-in* a ser executada e clicar no botão “OK”.

Para fechar essa caixa sem executar nenhuma ação basta acionar o botão “Cancel”.

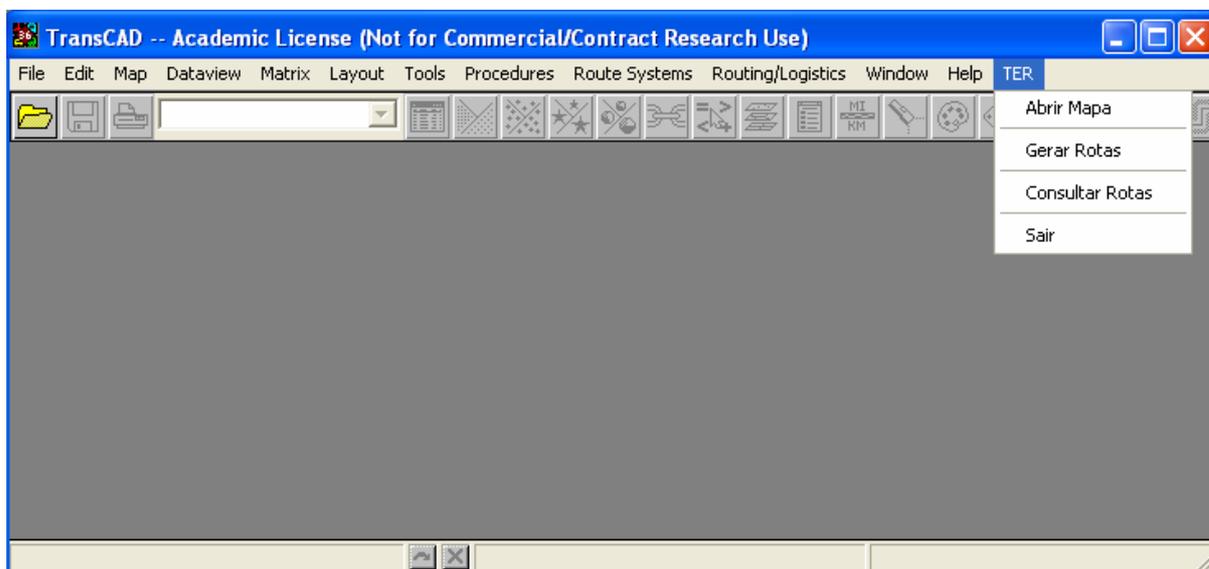
## 1.2 Utilizando a Ferramenta

Como descrito na seção 1.1.3 o acesso á ferramenta é feito através do submenu “Add-ins...” no menu *Tools* no TransCAD. Este abrirá a caixa de diálogo mostrada na Figura 19. Nela, escolha a opção “TER” e clique no botão “OK”. Com isso será adicionado um novo menu chamado “TER” à barra de menu do TransCAD (ver Figura 20), através deste menu é possível ter acesso a todas as funcionalidades da ferramenta criada.



**Figura 19** – Caixa de diálogo com as *Add-ins* existentes

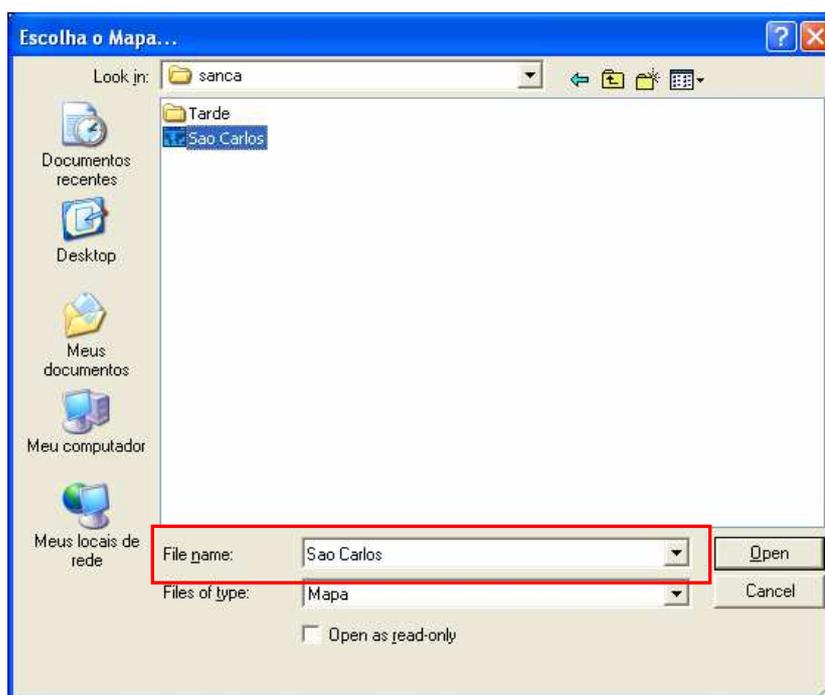
Como mostrado na Figura 20 este menu é composto por quatro submenus. Com eles é possível abrir o mapa, gerar as rotas e consultar as rotas geradas de forma individual e excluir o menu adicionado. A seguir cada um destes submenus será detalhado.



**Figura 20** - Janela do TransCAD mostrando o menu “TER” responsável pelo acesso à ferramenta criada

### 1.2.1 Abrir Mapa

Este submenu é responsável por abrir o mapa que será utilizado para a definição das rotas. Escolhendo esta opção será exibido o item da Figura 21. Neste item o usuário deverá buscar o local onde está o mapa que deseja abrir e selecioná-lo. Ao selecionar o mapa, seu nome aparecerá na opção “*File name*” (ver destaque na Figura 21), clique em “*Open*” e o mapa selecionado será aberto.



**Figura 21** – Abrindo o mapa

### 1.2.2 Gerar as rotas

O submenu “Gerar Rotas” exibe a caixa de diálogo que será responsável por coletar as informações necessárias para o cálculo das rotas do Transporte Escolar Rural (Figura 22).

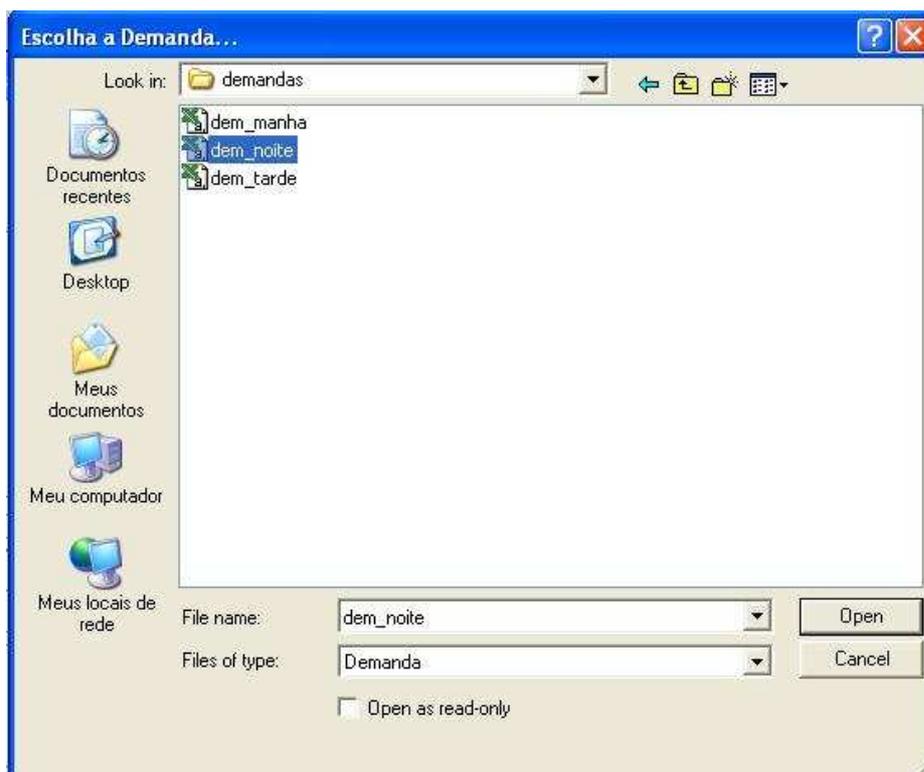
**Figura 22** – Caixa de Diálogo para gerar as rotas do TER

A seguir cada um dos itens dessa caixa de diálogo será descrito.

Na guia “Arquivos” o usuário deverá informar o arquivo de demanda (com a extensão “CSV”) que será utilizado para a definição das rotas.

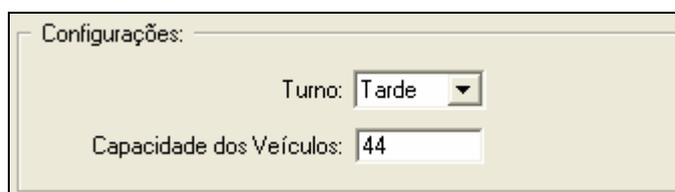
**Figura 23** – Guia “Arquivos”

Clicando no botão “Demanda” na Figura 23, a ferramenta irá exibir uma caixa de diálogo (ver Figura 24) para que o usuário localize o arquivo “CSV” com a demanda a ser utilizada. Basta selecionar o arquivo e clicar em “Open”.



**Figura 24** – Caixa Selecionando o arquivo de demanda

Na guia “Configurações” (ver Figura 25) as seguintes informações devem ser fornecidas pelo usuário:



**Figura 25** – Guia “Configurações”

- Turno: o usuário deve escolher para qual turno as rotas serão geradas, selecionando-o na lista;
- Capacidade dos Veículos: o usuário deverá informar a capacidade dos veículos utilizados no cálculo das rotas.

A guia “Escolha Camadas” contém um conjunto de abas (ver destaque Figura 26), sendo que cada uma delas representa uma das camadas citadas anteriormente. Ao clicar em cada uma delas é possível preencher os dados por elas solicitados para a definição das rotas. A seguir serão detalhadas cada uma dessas abas e as informações que o usuário deverá fornecer.

Escolha Camadas:

Fazendas | Escolas | Garagem | Estradas

Camada:

Campo Nome:

Código Fazenda:

Hora Abertura:

Hora Fechamento:

**Figura 26** – Guia “Escolha Camadas”

A aba “Fazendas” (ver Figura 27) representa a camada de fazendas. Nesta o usuário deve indicar:

- Camada: qual das camadas existentes no mapa representa as fazendas;
- Campo Nome: o usuário deve indicar qual atributo da tabela de dados desta camada selecionada representa o atributo que guarda o nome de cada fazenda;
- Código Fazenda: aqui o usuário deve informar qual atributo da tabela representa o código da fazenda, o mesmo que foi utilizado para preencher o arquivo de demanda;
- Hora de Abertura: qual atributo representa o horário de abertura das janelas de tempo;
- Hora Fechamento: o atributo que representa o horário de fechamento da janela de tempo.

Na Figura 27 há um exemplo de preenchimento destes dados.

Fazendas | Escolas | Garagem | Estradas

Camada: fazendas

Campo Nome: Nome

Código Fazenda: Codigo

Hora Abertura: OPEN\_TIME

Hora Fechamento: CLOSE\_TIME

**Figura 27** – Escolhendo dados da camada Fazendas

Na aba “Escolas” o usuário deverá indicar:

- Camada: o nome da camada que representa as escolas;
- Campo Nome: qual atributo representa o nome das escolas;
- Código Escola: o atributo que representa o código da escola como mostrado na Figura 28.

**Figura 28** – Escolhendo dados da camada Escolas

Já na aba “Garagem” o usuário deve indicar somente qual camada das presentes no mapa representa a garagem (“Camada”), como na Figura 29.

**Figura 29** – Escolhendo dados da camada Garagem

Na aba “Estradas” o usuário deve escolher:

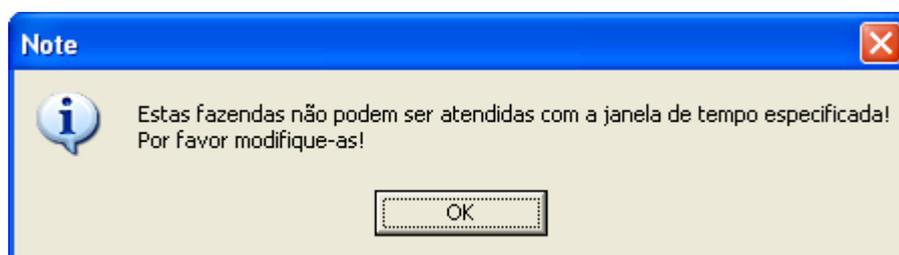
- Estradas: qual camada representa as estradas;
- Campo Tempo: informar qual atributo dentre os existentes nesta camada representa o que armazena o tempo médio de viagem em cada trecho da via. Na Figura 30 é mostrado um exemplo de preenchimento. Neste caso, o atributo que representa o tempo médio de viagem é o atributo “TempoMin”.



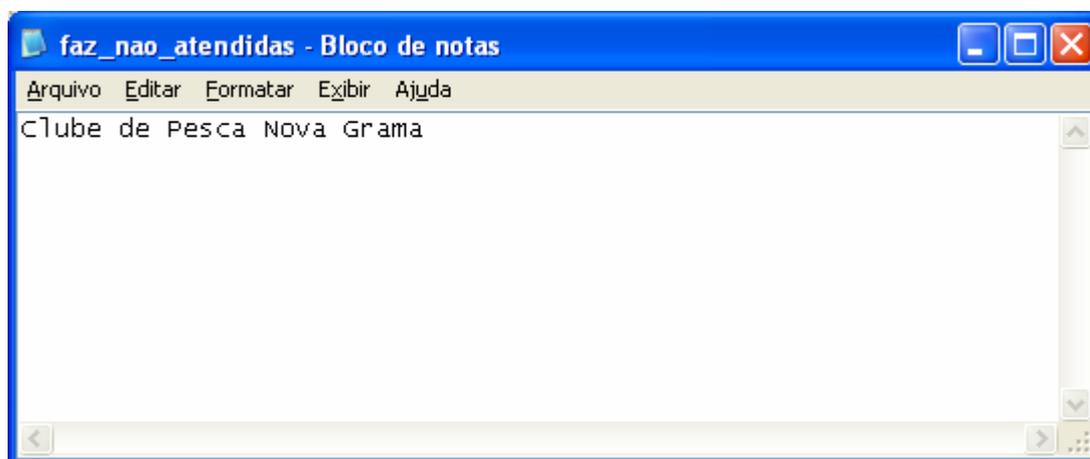
**Figura 30** – Escolhendo dados da camada Estradas

Clicando no botão “Gerar Rotas” após todos os campos preenchidos corretamente o programa irá executar o algoritmo implementado para gerar as rotas com a demanda informada.

Caso algumas fazendas não tenham janelas de tempo suficientemente grandes para que seja possível buscar os alunos e levá-los até suas respectivas escolas no tempo estipulado, a ferramenta interrompe a execução do algoritmo e mostra a mensagem da Figura 31. Clique no botão “OK” e um arquivo texto com as fazendas que precisam ter suas janelas de tempo modificadas será exibido, como pode ser observado na Figura 32.



**Figura 31** – Mensagem informativa



**Figura 32** – Arquivo texto com as fazendas não atendidas

Se todas as fazendas puderem ser atendidas a ferramenta gera como saída o desenho das rotas no mapa. Isto é feito com a adição de uma camada (chamada “Rotas TER”) que contém as rotas criadas para atender a demanda informada. Também um arquivo texto com o itinerário de cada rota será exibido. A seguir são fornecidos mais detalhes sobre a saída do programa.

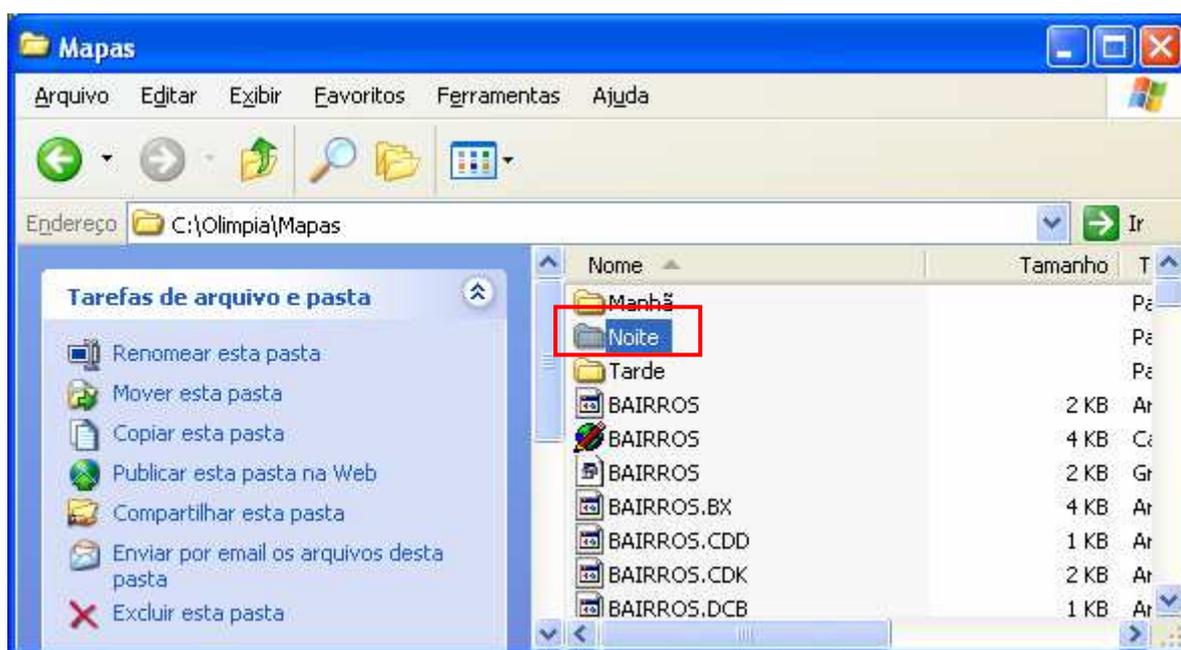
### 1.2.2.1 Saída do Programa

Para visualizar e analisar as rotas geradas, a ferramenta exhibe o desenho das rotas no mapa como pode ser visto na Figura 33 e um arquivo texto com os itinerários (ver Figura 34).

É importante destacar que ao utilizar a ferramenta para definição das rotas, vários arquivos são gerados e estes ficam armazenados num diretório criado junto ao diretório onde está o mapa utilizado pela ferramenta.

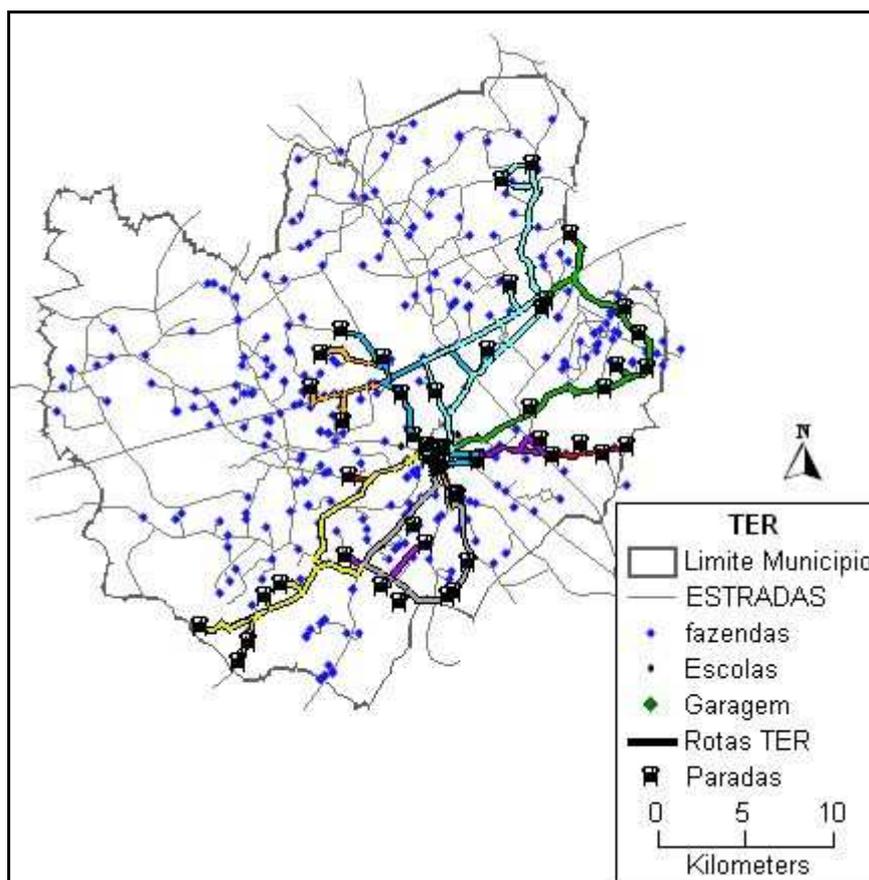
Por exemplo, se o mapa estiver salvo no diretório “C:\Olimpia\Mapas” (como mostra a Figura 32), dentro deste será criado um diretório com o nome do turno para o qual as rotas estão sendo criadas e todos os arquivos gerados pela ferramenta serão armazenados dentro dele.

Para as rotas da noite será criado um diretório chamado “Noite” e assim para os outros turnos. Na Figura 32 (ver área destacada em vermelho) é mostrado o diretório criado com o nome “Noite” para salvar os arquivos gerados com o cálculo das rotas da noite.



**Figura 32** – Diretório com o mapa utilizado no estudo de caso

Na legenda do mapa da Figura 33 é possível visualizar além das camadas já citadas anteriormente, que são utilizadas na definição das rotas, a camada chamada “Rotas TER” (que é vista no mapa através das linhas coloridas que representam as rotas geradas pela ferramenta) e a camada “Paradas” (que no mapa é representado pela figura de um ônibus) e representa os pontos de parada que são atendidos pelas rotas.



**Figura 33** – Mapa com as rotas geradas pela ferramenta

O arquivo texto possui informações sobre cada rota, tais como quilometragem percorrida transportando alunos, quilometragem ociosa, quilometragem total, tempo médio de viagem de na rota, horário que o veículo deve sair da garagem para começar a percorrer os pontos de parada da rota e taxa de ocupação do veículo na rota.

Também é exibida para cada rota a ordem que os pontos de parada (embarque e desembarque) devem ser visitados, quantos alunos sobem ou descem em cada um destes pontos, o horário de chegada em cada ponto e a distância percorrida até chegar a cada ponto da rota. A Figura 34 traz um exemplo de um arquivo texto onde é possível visualizar como essas informações são dispostas.

Rota: 2

Quilometragem com alunos: 33.5km  
 Quilometragem ociosa: 14km  
 Quilometragem Total: 47.5km  
 Tempo Médio de viagem na rota: 14 Minutos  
 Hora Saída da Garagem: 17:42  
 Taxa de ocupação por Rota: 0.7

| ID: | Nome                            | Sobe | Desce | Horário | Distância |
|-----|---------------------------------|------|-------|---------|-----------|
| 0   | Garagem                         | 0    | 0     | 00:00   | 0         |
| 1   | Sítio São João                  | 2    | 0     | 18:00   | 13.2      |
| 2   | Sítio Adriana                   | 2    | 0     | 18:11   | 19.3      |
| 3   | O&C Produtos de Borrachas       | 2    | 0     | 18:36   | 35.8      |
| 4   | Fazenda Miraflores              | 1    | 0     | 18:39   | 37.8      |
| 5   | Profa. Dalva Vieira Itavo       | 0    | 1     | 18:47   | 42.8      |
| 6   | Profa. Maria Ubaldina B Furquim | 0    | 3     | 18:51   | 45.6      |
| 7   | Capitão Narciso Bertolino       | 0    | 3     | 18:52   | 46.7      |
| 0   | Garagem                         | 0    | 0     | 00:00   | 47.5      |

**Figura 34** – Arquivo texto gerado pela ferramenta mostrando um relatório com as rotas

Ao final do relatório (ver Figura 35) tem-se um resumo com o número total de rotas geradas, a quilometragem total percorrida transportando alunos em todas as rotas, a quilometragem total ociosa, a quilometragem total (quilometragem transportando alunos mais a quilometragem ociosa) e a taxa média de ocupação dos veículos no sistema.

.....

Informações Gerais

Número Total de Rotas: 8  
 Quilometragem Total carregando alunos: 243.3km  
 Quilometragem Total ociosa: 124.9km  
 Quilometragem Total: 368.2km  
 Taxa Média de ocupação dos veículos no sistema: 0.9

**Figura 35** – Arquivo texto gerado pela ferramenta mostrando as informações gerais das rotas

O botão “Cancelar” fecha a caixa de diálogos responsável por gerar as rotas.

### 1.2.3 Consultar Rotas

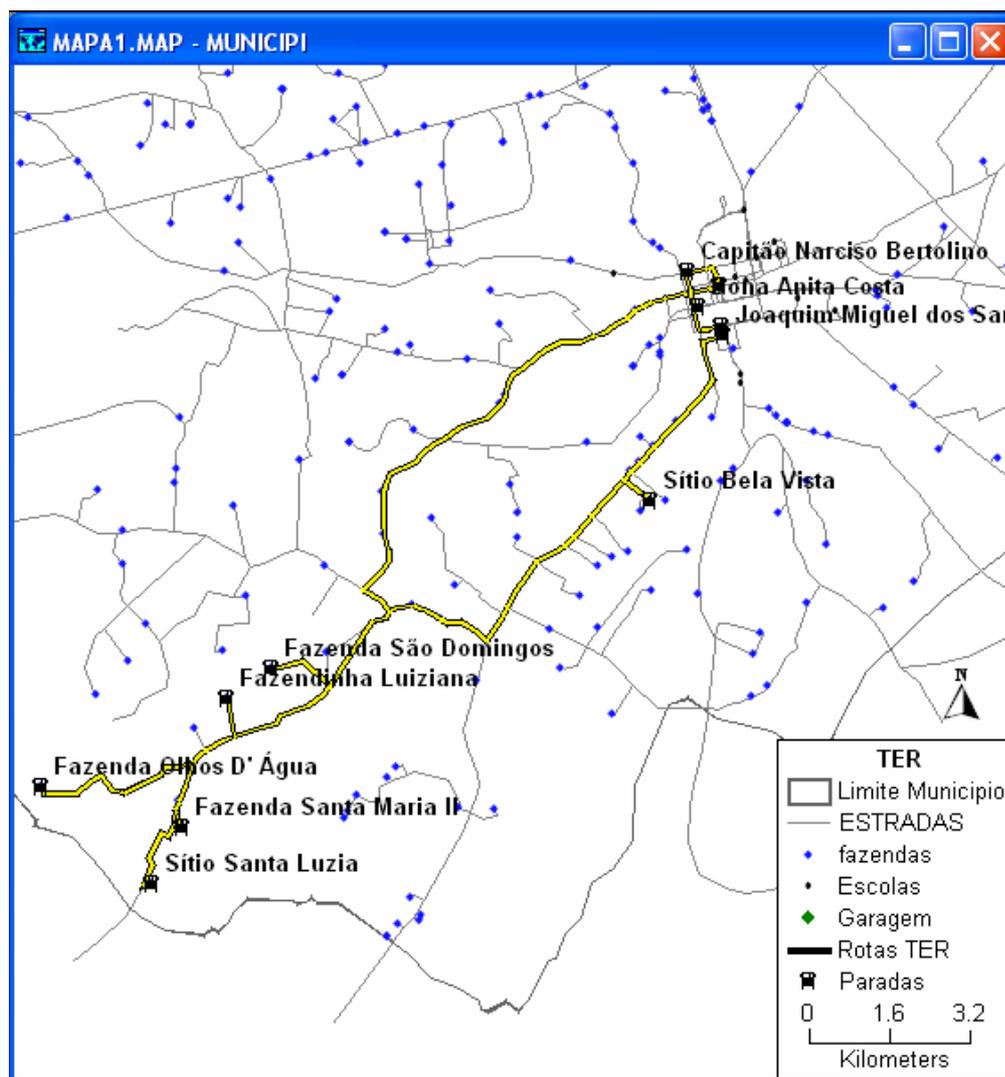
Para o usuário analisar cada rota individualmente basta selecionar o submenu “Consultar Rotas” no menu “TER”. A Figura 36 exibe a caixa de ferramentas responsável por esta consulta.



**Figura 36** – Caixa de Ferramentas “Consultar Rotas”

O item “Rotas” destacado em vermelho na Figura 36 possui uma lista com todas as rotas geradas para o mapa aberto. Selecionando uma rota nesta lista é possível vê-la de forma individual no mapa como mostra a Figura 37. O desenho da rota é mostrado com a localização dos pontos de parada e com o nome que identifica cada um destes pontos.

Também será exibida uma tabela contendo os dados da rota selecionada. Esta tabela mostra os pontos de parada na ordem que deverão ser visitados pelo veículo responsável por fazer o itinerário. Cada um destes pontos apresenta um nome, a quantidade de alunos que sobem ou descem nestes pontos, o horário que o veículo irá passar por este ponto e a distância percorrida até chegar neste ponto. A Figura 38 mostra um exemplo desta tabela.



**Figura 37** – Mapa mostrando somente a rota selecionada pela ferramenta “Consultar Rotas”

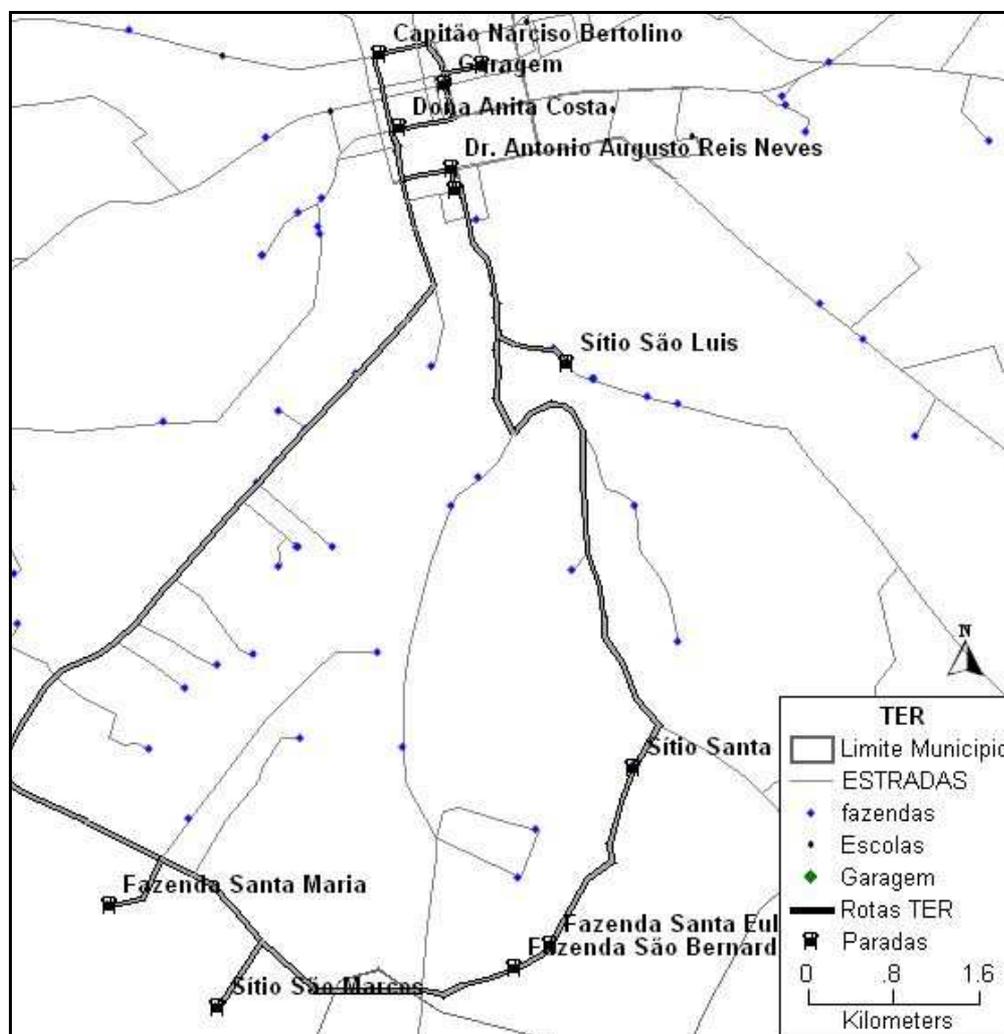
| STOP_ID | Nome                           | Sobe | Desce | [H. Chegada] | Distancia |
|---------|--------------------------------|------|-------|--------------|-----------|
| 57      | Garagem                        | 0    | 0     | 00:00        | 0         |
| 58      | Fazenda Olhos D' Água          | 3    | 0     | 18:00        | 20        |
| 59      | Fazenda Santa Maria II         | 2    | 0     | 18:10        | 25.1      |
| 60      | Sítio Santa Luzia              | 1    | 0     | 18:15        | 27.6      |
| 61      | Fazendinha Luiziana            | 1    | 0     | 18:25        | 32.5      |
| 62      | Fazenda São Domingos           | 2    | 0     | 18:34        | 36.9      |
| 63      | Sítio Bela Vista               | 1    | 0     | 18:50        | 47.4      |
| 64      | Joaquim Miguel dos Santos      | 0    | 2     | 18:56        | 52.1      |
| 65      | Dr. Antonio Augusto Reis Neves | 0    | 3     | 18:56        | 52.3      |
| 66      | Dona Anita Costa               | 0    | 3     | 18:57        | 53.3      |
| 67      | Capitão Narciso Bertolino      | 0    | 2     | 18:58        | 54.2      |
| 68      |                                | 0    | 0     | 00:00        | 55        |

**Figura 38** – Tabela com os dados da rota selecionada

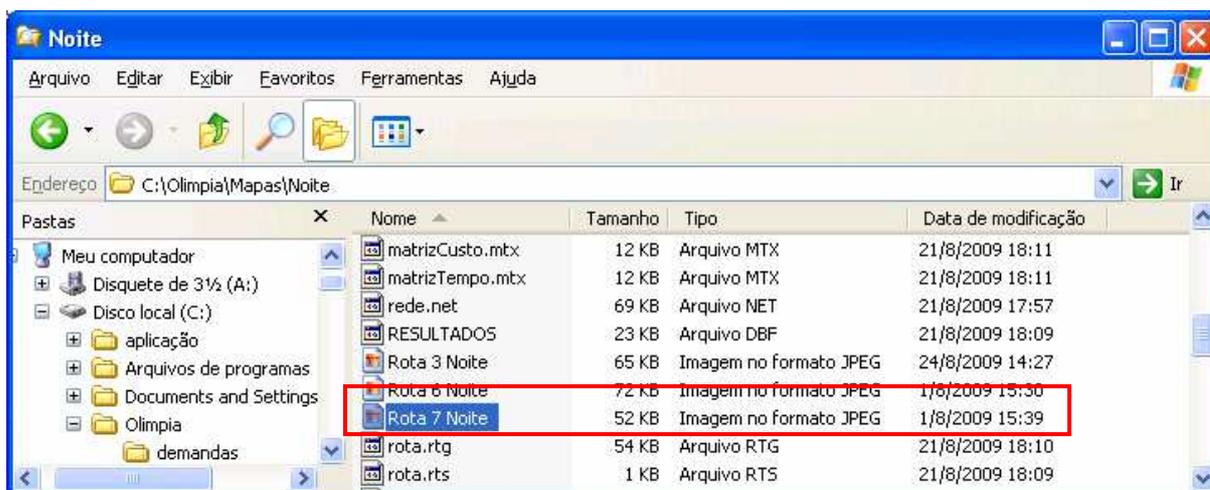
É possível também gerar uma figura da rota selecionada. Para isso basta clicar no botão “Gerar Figura” na caixa de ferramentas da Figura 36. As figuras são salvas

juntamente com os outros arquivos gerados pela ferramenta, ou seja, num diretório que possui o nome do período que foi escolhido para gerar as rotas no submenu “Gerar Rotas”. Elas receberão o nome da rota como aparece na lista da ferramenta. Por exemplo, se for escolhida a “Rota 7 Noite” na lista de rotas da Figura 36, então no diretório especificado anteriormente terá uma figura no formato “JPEG” com este nome.

A Figura 39 mostra como uma figura gerada pela ferramenta é exibida e a Figura 40 mostra o diretório onde esta foi salva e o nome da figura com dito anteriormente. Na Figura 40 é possível observar que as rotas são geradas para o turno da noite por isso foi criado um diretório com o nome “Noite” para salvar os dados.



**Figura 39** – Figura da rota gerada pelo botão “Gerar Figura” do submenu “Consultar Rotas”



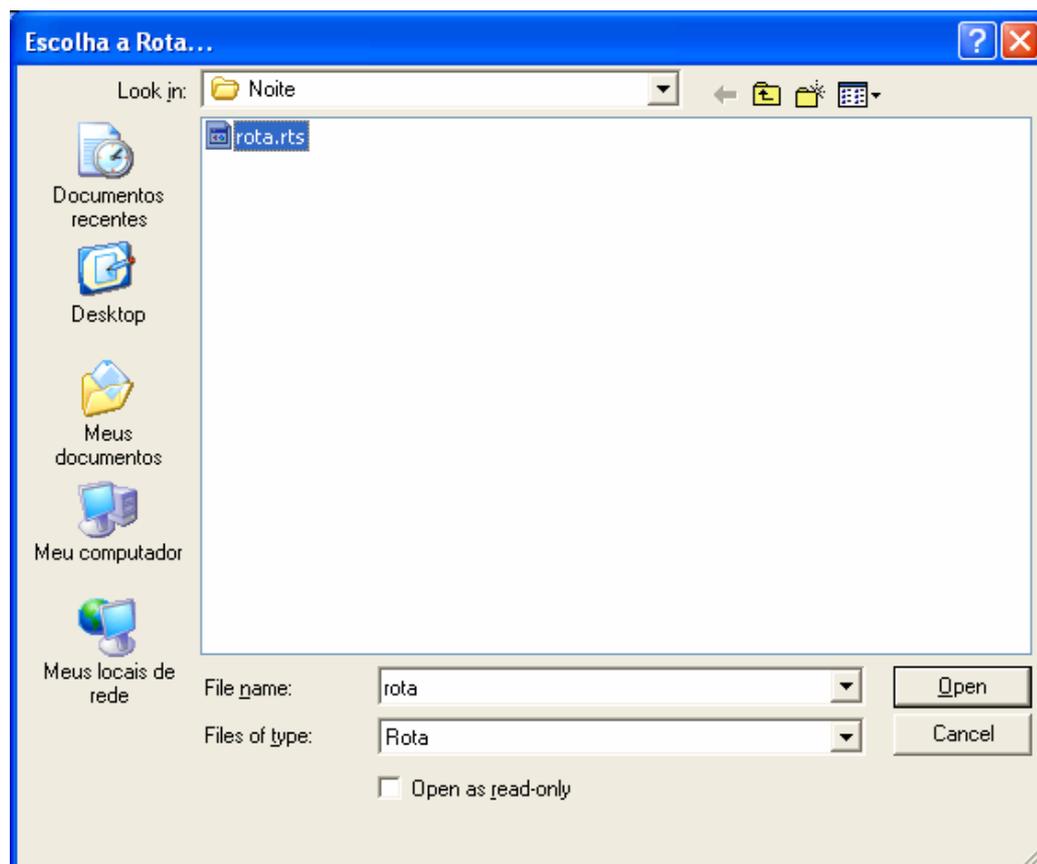
**Figura 40** – Diretório mostrando figura gerada pela ferramenta

Se ao selecionar o submenu “Consultar Rotas” o mapa aberto não possuir um arquivo de rotas, mas as rotas para este mapa já foram geradas em outra oportunidade, a ferramenta será mostrada como na Figura 41, onde a lista de rotas e o botão “Gerar Figura” aparecerá desabilitado. Para consultar essas rotas basta clicar no botão “Adicionar Rota”, este botão irá exibir a caixa mostrada na Figura 42. Nela, o usuário deve escolher o diretório onde o mapa está salvo e escolher o diretório que tem o nome do turno que deseja consultar. Dentro deste diretório deverá existir um arquivo com o nome “rota.rts”, selecione este arquivo como mostrado na Figura 42 e clique no botão “Open”.

Isto fará com que as rotas sejam exibidas como na Figura 33 e a ferramenta habilitará os itens que estavam desabilitados e aparecerá como mostrado na Figura 36. A partir daí o processo de consulta é o mesmo já descrito anteriormente.



**Figura 41** – Ferramenta “Consultar Rotas” com os botões desabilitados



**Figura 42**– Escolhendo um arquivo de rotas já salvo

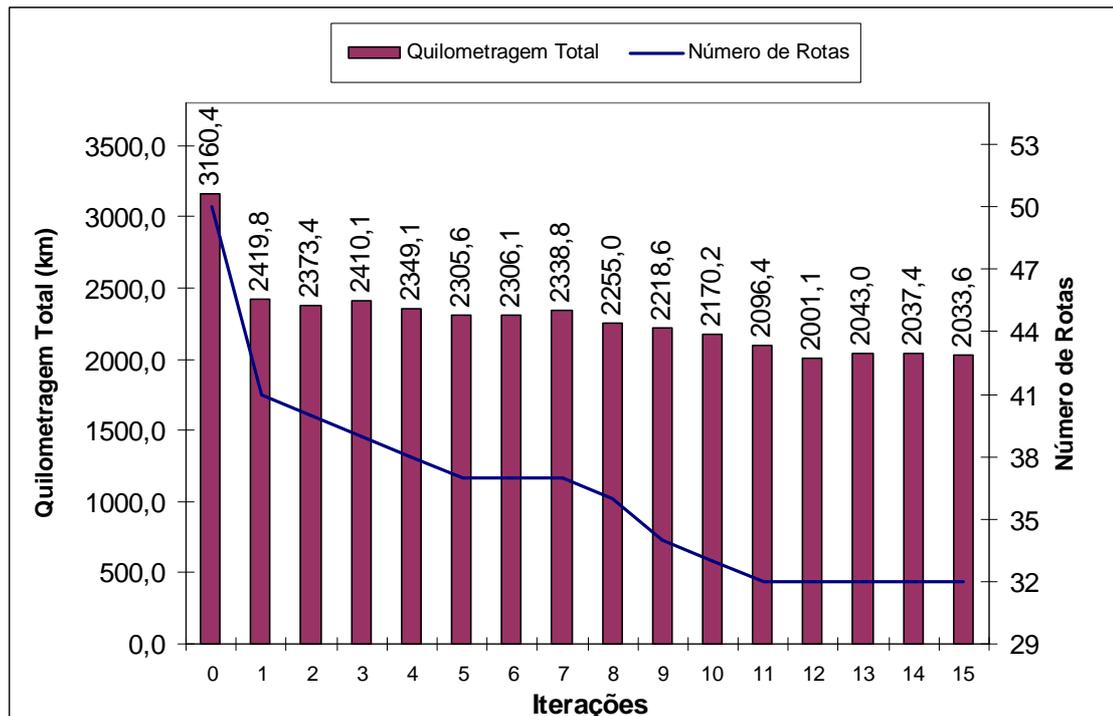
#### 1.2.4 Sair

O submenu “Sair” é responsável por excluir o menu TER da barra de menu do TransCAD.

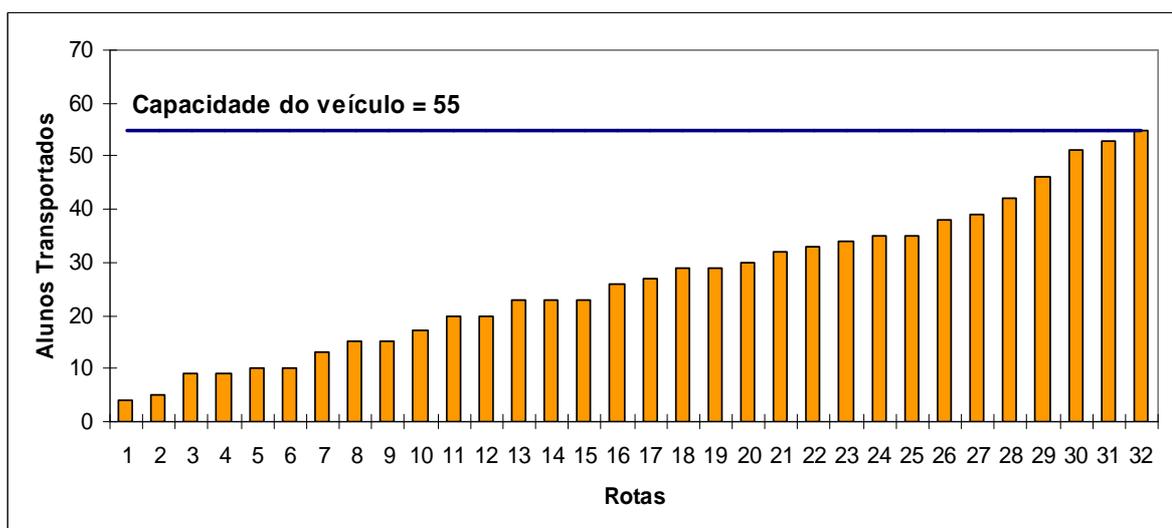
## APÊNDICE B

Resultados encontrados para simulações executadas para o estudo de caso de São Carlos.

As Figuras 1 e 2 referem-se à simulação 2 (Tempo máximo de viagem = 60 minutos e Capacidade do veículo = 55 alunos).

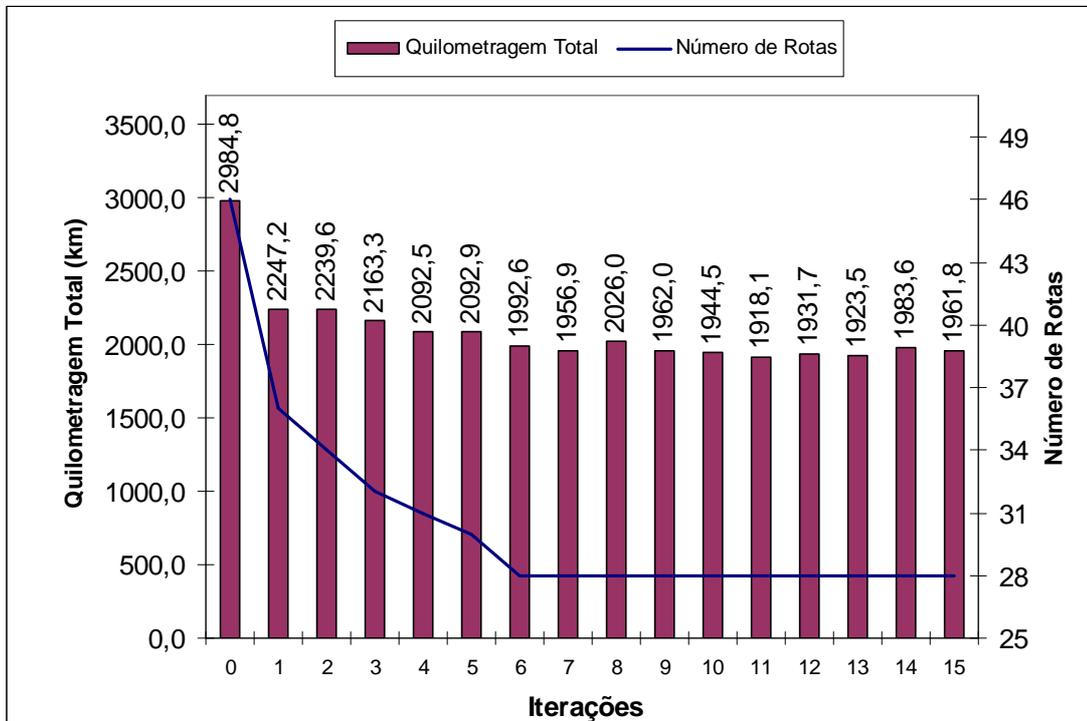


**Figura 1** - Simulação 2 – Quilometragem e número de rotas

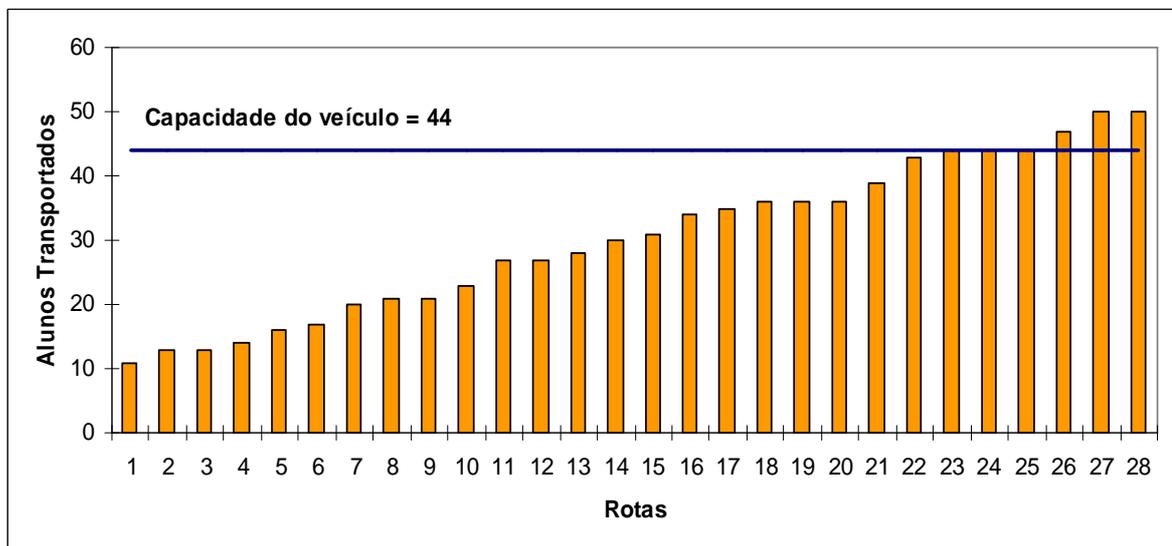


**Figura 2**- Simulação 2 – Alunos transportados por rota – melhor solução

As Figuras 3 e 4 referem-se à simulação 3 (Tempo máximo de viagem = 70 minutos e Capacidade do veículo = 44 alunos).

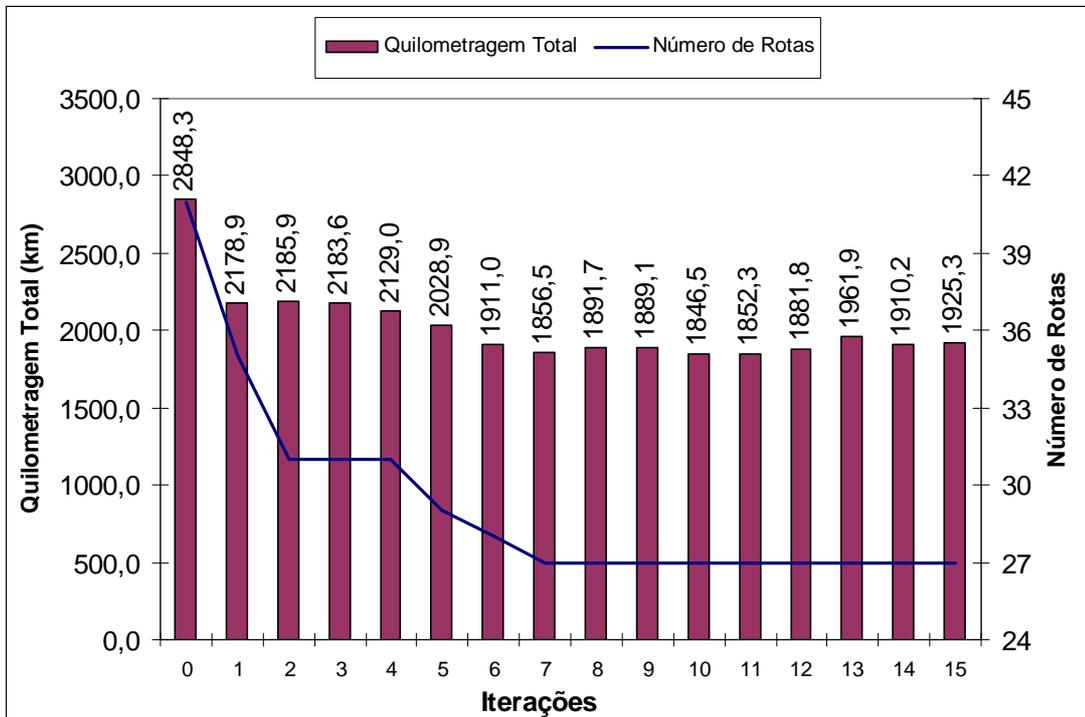


**Figura 3** - Simulação 3 – Quilometragem e número de rotas

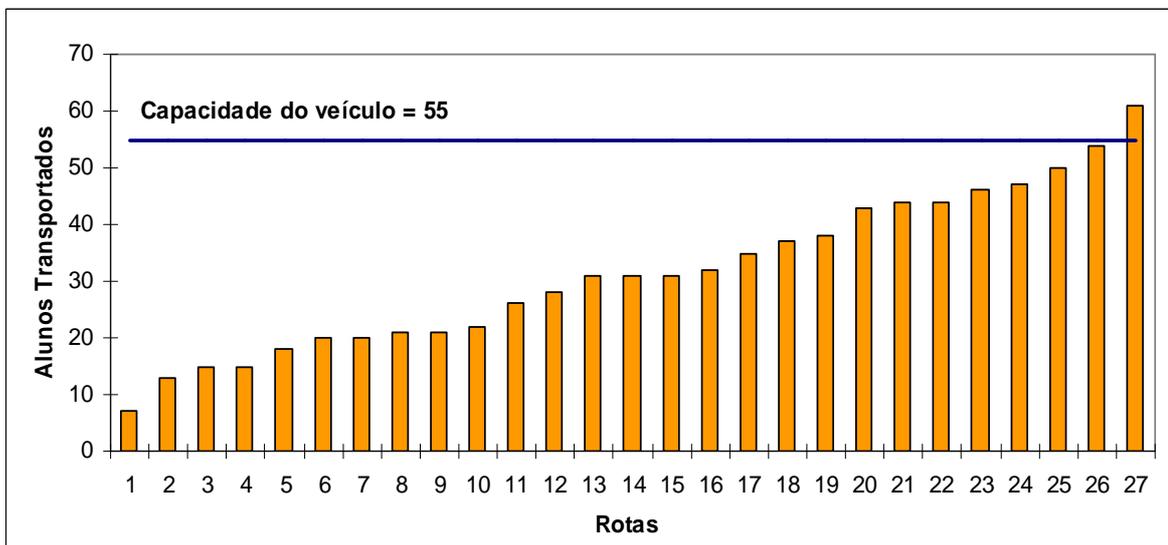


**Figura 4**- Simulação 3 – Alunos transportados por rota – melhor solução

As Figuras 5 e 6 referem-se à simulação 4 (Tempo máximo de viagem = 70 minutos e Capacidade do veículo = 55 alunos).

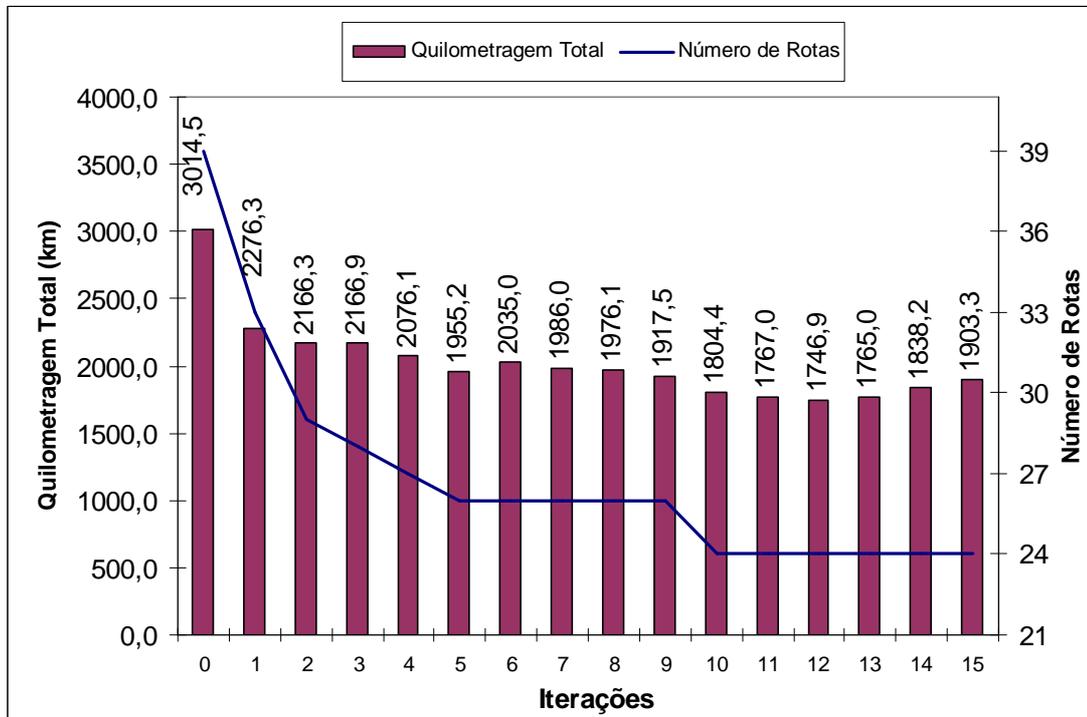


**Figura 5** - Simulação 4 – Quilometragem e número de rotas

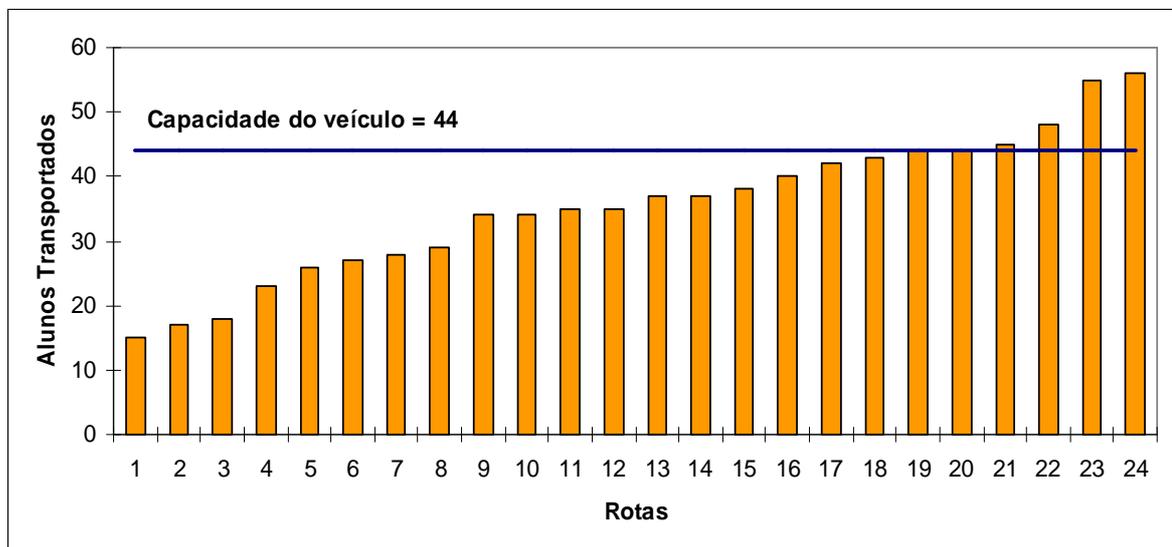


**Figura 6** – Simulação 4 - Alunos transportados por rota – melhor solução

As Figuras 7 e 8 referem-se à simulação 5 (Tempo máximo de viagem = 80 minutos e Capacidade do veículo = 44 alunos).

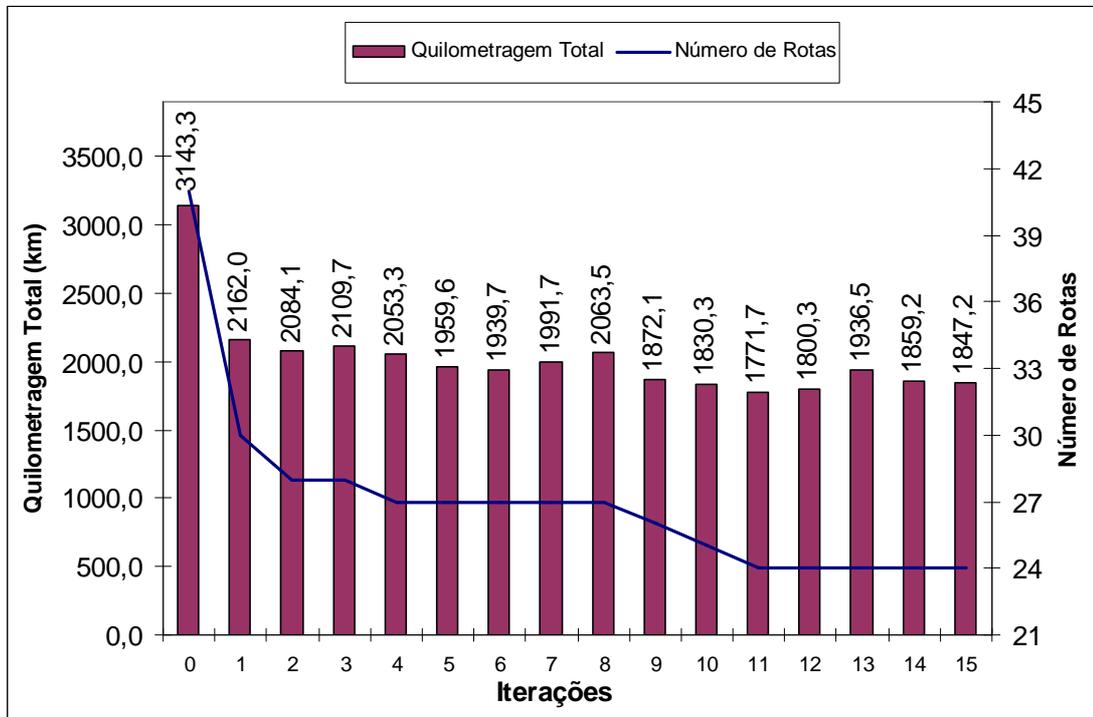


**Figura 7** - Simulação 5 – Quilometragem e número de rotas

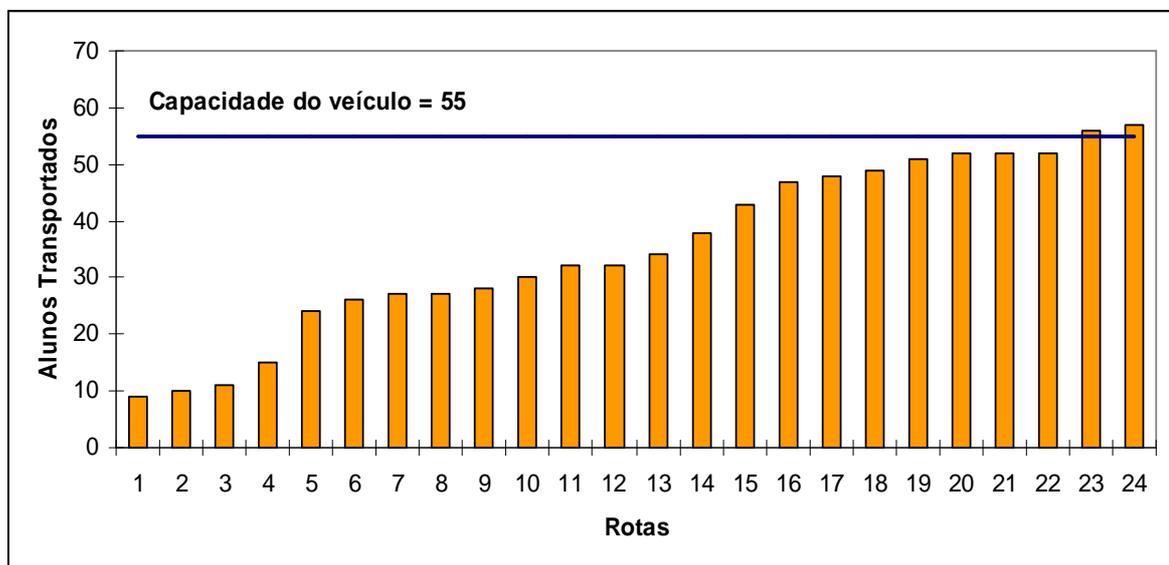


**Figura 8** - Simulação 5 - Alunos transportados por rota – melhor solução

As Figuras 9 e 10 referem-se à simulação 6 (Tempo máximo de viagem = 80 minutos e Capacidade do veículo = 55 alunos).



**Figura 9** – Simulação 6 - Quilometragem e número de rotas



**Figura 10** – Simulação 6 - Alunos transportados por rota – melhor solução

As Figuras 11 e 12 referem-se à simulação 7 (Tempo máximo de viagem = 90 minutos e Capacidade do veículo = 44 alunos).

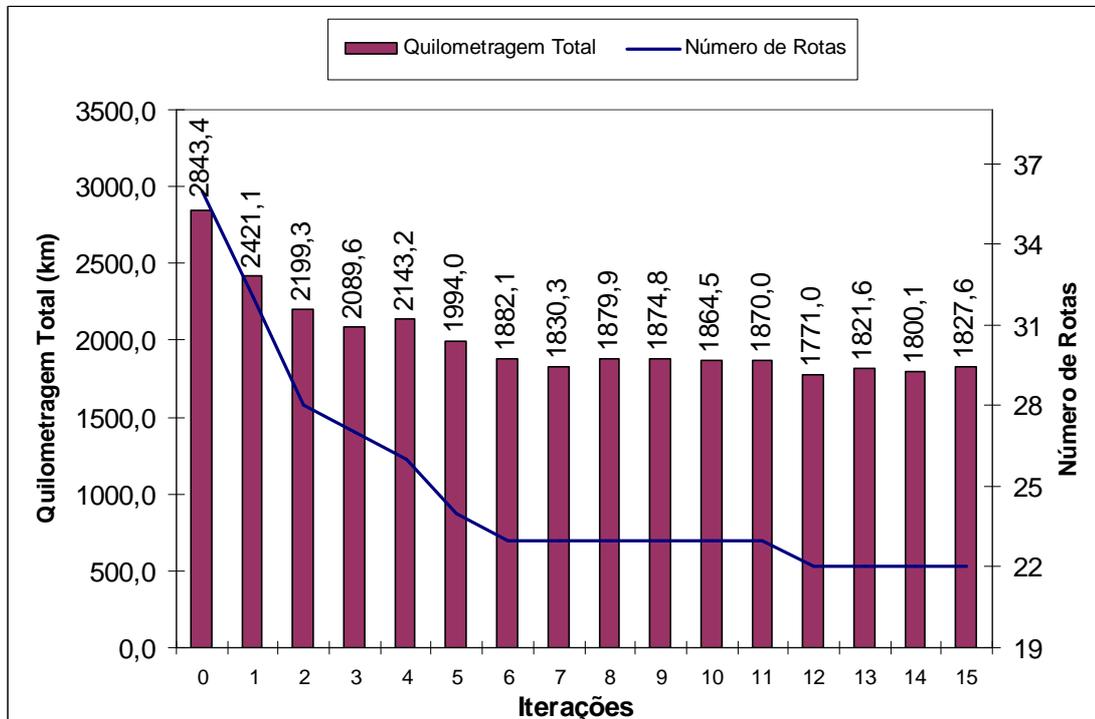


Figura 11 – Simulação 7 - Quilometragem e número de rotas

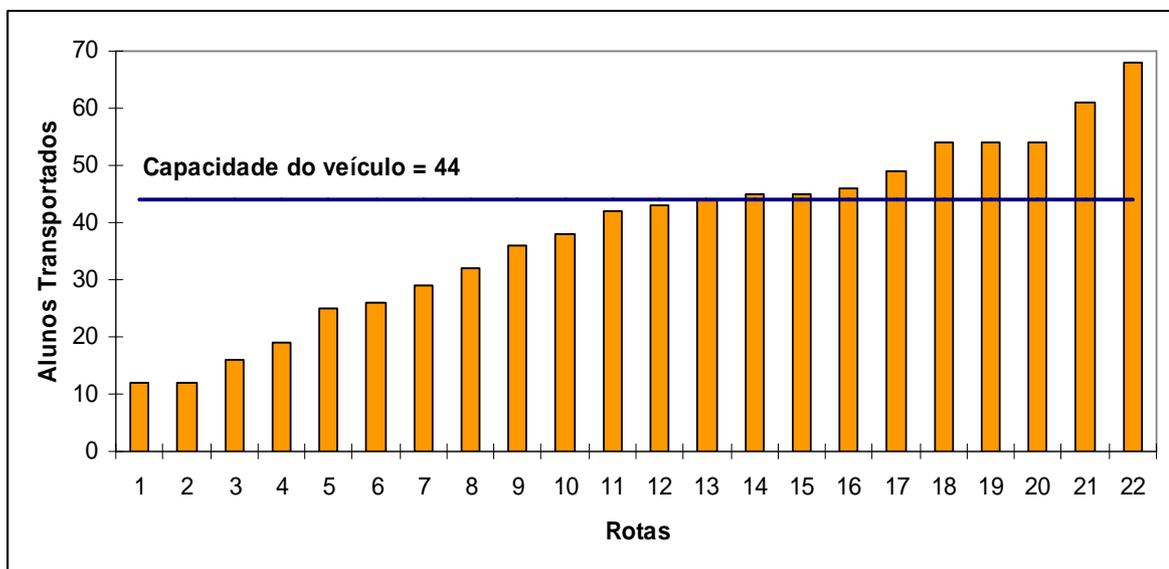
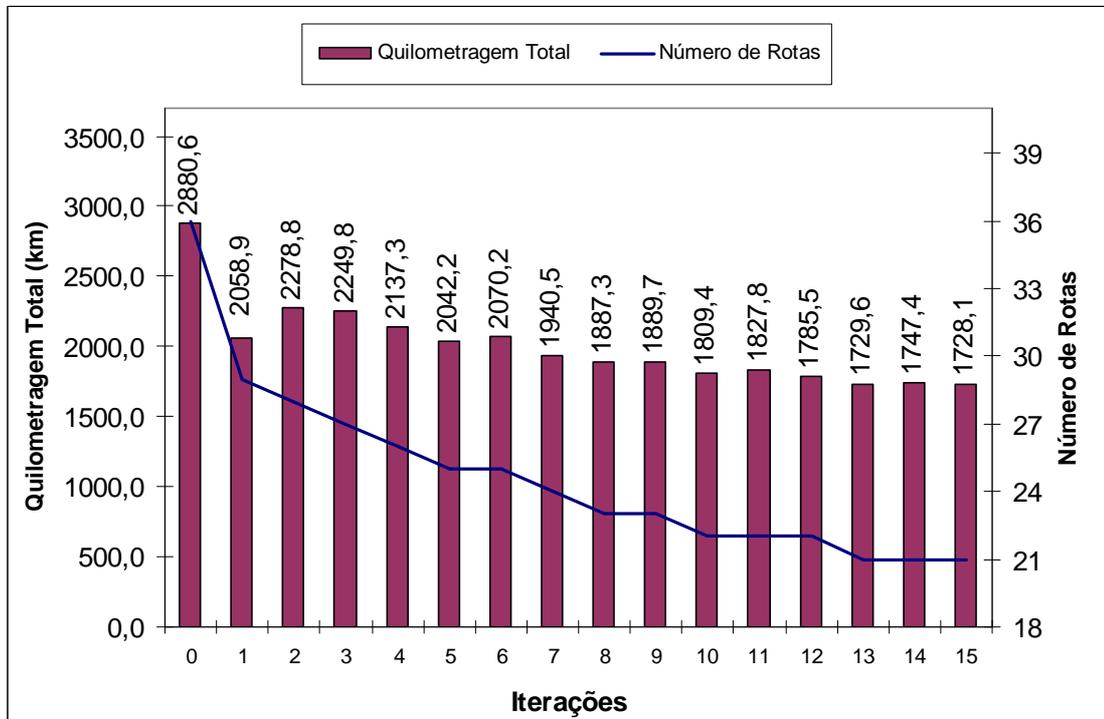
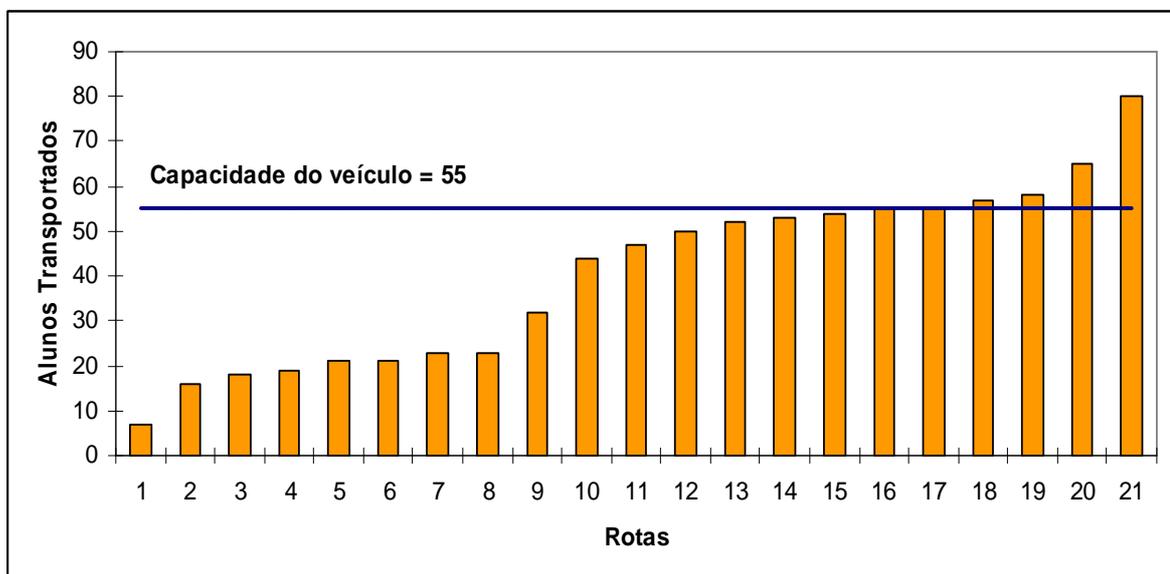


Figura 12 – Simulação 7 - Alunos transportados por rota – melhor solução

As Figuras 13 e 14 referem-se à simulação 8 (Tempo máximo de viagem = 90 minutos e Capacidade do veículo = 55 alunos).



**Figura 13** – Simulação 8 - Quilometragem e número de rotas



**Figura 14** – Simulação 8 - Alunos transportados por rota – melhor solução

## APÊNDICE C

A seguir o pseudocódigo dos procedimentos implementados para roteirização do TER.

### Solução Inicial

```

solicitacoes ← demanda ordenada
Enquanto houver solicitações a serem atendidas faça
  MelhorRota ← null
  Vmin ← 0
  Cmin ← ∞
  Se a solicitação tiver mais de um ponto de entrega então faça
    Para V =1 até V =número de veículos disponíveis faça
      Para x = 1 até x= quantidade de pontos de entrega faça
        Se (ponto de entrega já existe) então faça
          Insere o ponto de entrega no fim da lista
        Fim Se
        Senão faça
          Melhor ← null
          custo ← ∞
          Insere o ponto de entrega na melhor posição viável
          Se o ponto de entrega foi inserido na rota então faça
            custoRotMod ← custo da rota com inserção do ponto
            Se custoRotMod < custo então faça
              Melhor ← rota com a inserção do ponto de entrega
              custo ← custoRotMod
            Fim Se
          Senão faça //encerra loop
            x ← quantidade de pontos de entrega
          Fim Senão
        Fim Senão
      Fim Para
    Se Melhor <> null então faça
      Insere ponto de coleta na melhor posição viável
      Se ponto de coleta foi inserido na rota então faça
        custo ← custo rota com a inserção da solicitação
        Se (custo < Cmin) então faça
          MelhorRota ← rota com a inserção de toda solicitação
          Vmin ← V
          Cmin ← custo
        Fim Se
      Fim Se
    Fim Se
  Fim Para
  Fim Se
  Senão faça
    Para V =1 até V =número de veículos faça
      Se ponto de entrega dessa solicitação já existe na rota então faça
        Insere o ponto de entrega no fim da lista
        Insere o ponto de coleta na melhor posição viável
        Se ponto coleta foi inserido faça
          custo ← custo da rota com inserção da solicitação
          Se (custo < Cmin) então faça
            MelhorRota ← rota com inserção da solicitação
            Vmin ← V
            Cmin ← custo
          Fim Se
        Fim Se
      Fim Se
    Fim Se
  Senão faça
    Aplica Inserção Paralela como descrito por Znamensky (2000)

```

```

Se a rota foi aceita então faça
  custo ← custo de inserção da solicitação
  Se (custo < Cmin) então faça
    MelhorRota ← rota com inserção da solicitação
    Vmin ← V
    Cmin ← custo
  Fim Se
Fim Se
Fim Senão
Fim Para
Fim Senão
Se Vmin <> 0 então faça
  rota[Vmin] ← MelhorRota
Fim Se
Senão faça
  SemRota ← solicitação não atendida
Fim Senão
Fim Enquanto

```

Onde:

- `solicitacoes` - Variável que recebe a demanda ordenada por dificuldade;
- `Vmin` - É a posição no vetor de rotas onde a inserção da solicitação é mais viável;
- `Cmin` - Melhor custo de inserção conseguido até então;
- `Melhor` - Variável que armazena a melhor rota com a inserção dos pontos de entrega;
- `custo` - Melhor custo com a inserção dos pontos de entrega da solicitação atual;
- `custoRotMod` - custo com a inserção do ponto de entrega atual;
- `MelhorRota` - Melhor rota conseguida até então com a inserção de toda solicitação na rota;
- `rota` - Vetor que armazena em cada posição uma rota pertencente à solução.

### Reinserir Solicitação

```

Para z =1 até z = número de rotas faça
  Para y =1 até y = número de solicitações da rota z faça
    Cmin ← ∞
    MelhorRota ← null
    Para x =1 até x =número de rotas faça
      Se ((x<>z) e (rota[x]<>null)) então faça
        Insere a solicitação y da rota z na rota x
        Se a inserção for possível então faça
          custo ← custo de inserção solicitação
          Se (custo < Cmin) então faça
            Cmin ← custo da inserção
            MelhorRota ← rota x com a inserção da solicitação y
            Pos ← x
          Fim Se
        Fim Se
      Fim Para
    Fim Para
  Se MelhorRota <> null então faça
    rota[Pos] ← MelhorRota
  Fim Se
Fim Para

```

Onde:

- rota - É um vetor onde cada posição representa uma rota;
- Cmin - Variável utilizada para guardar o menor custo de inserção da solicitação conseguido até aquela iteração;
- custo - Custo de inserção da solicitação;
- MelhorRota - Guarda a rota que resultou o menor custo de inserção até aquela iteração;
- Pos - Guarda a posição no vetor de rotas onde ocorreu o menor custo de inserção.

### Troca Solicitações

```

Para x =1 ate x= número de rotas faça
  custoRotaX ← custo inicial da rota x
  Para i =1 até i= número de solicitações da rota x faça
    Cmin ← ∞
    MelhorRotaX ← null
    MelhorRotaY ← null
    custoRotaY ← custo inicial da rota y
    Para y =1 até y= número de rotas faça
      Se (x<>y) então faça
        j ← solicitação da rota y gerada aleatoriamente
        custoI ← Insere a solicitação i na rota y
        custoJ ← Insere a solicitação i na rota x
        Se ((custoI+custoJ)<(custoRotaX+custoRotaY)) então faça
          Se ((custoI+custoJ)< Cmin) então faça
            MelhorRotaX ← rota x com inserção da solicitação j
            MelhorRotaY ← rota y com a inserção da solicitação i
            Cmin ← custoI+custoJ
            pos ← y
          Fim Se
        Fim Se
      Fim Se
    Fim Para
  Fim Para
  Se ((MelhorRotaX<>null) e (MelhorRotaY<>null)) então faça
    rota[x] ← MelhorRotaX
    rota[pos] ← MelhorRotaY
  Fim Se
Fim Para
Fim Para

```

Onde:

- Cmin - variável utilizada para guardar a menor soma do custo de inserção da solicitação conseguido até aquela iteração;
- custoRotaX - custo da rota original x;
- custoRotaY - melhor rota y com a inserção da solicitação j;
- MelhorRotaX - melhor rota x com a inserção da solicitação j;
- MelhorRotaY - melhor rota y com a inserção da solicitação i;
- custoI - custo da rota y após inserção da solicitação i;
- custoJ - custo da rota x após inserção da solicitação j;
- pos - posição do vetor de rotas onde foi inserida a solicitação i;
- rota - vetor onde cada posição representa uma rota.

**Reordena rota**

```

Cmin ← 0
MelhorRota ← null
Para x =1 ate x= número de elementos da rota faça
  Se tiver somente um elemento na posição x da rota então faça
    Se rota[x] é um ponto de coleta então faça
      posE ← Procuro a localização da primeira ocorrência de seu
      respectivo ponto de entrega
      Para y =1 até y =posição do 1º ponto de entrega-1 faça
        Insere ponto
        Verifica restrições
        Se (restrições foram respeitadas) então faça
          CustoRotOriginal ← custo rota original
          CustoRotModif ← custo da rota modificada
          Se (CustoRotModif < CustoRotOriginal) então faça
            Cmin ← CustoRotModif
            MelhorRota ← rota modificada
          Fim Se
        Fim Se
      Fim Para
    Fim Se
  Senão faça //É um ponto de entrega
    posC ← Procura a localização do ponto de coleta
    Para y =posC+1 até y =número de elementos da rota faça
      Insere o ponto na posição y
      Verifica restrições
      Se (restrições foram respeitadas) então faça
        CustoRotOriginal ← custo rota original
        CustoRotModif ← custo da rota modificada
        Se (CustoRotModif < CustoRotOriginal) então faça
          Cmin ← CustoRotModif
          MelhorRota ← rota modificada
        Fim Se
      Fim Se
    Fim Para
  Fim Senão
Fim Se
Senão faça// é um ponto de entrega e tem várias referências
posC ← Procura a localização do ponto de coleta mais extremo
pertencente a essa ponto de entrega
Para y =posC+1 ate y =número de elementos da rota faça
  Insere o ponto na posição y
  Verifica restrições
  Se (restrições foram respeitadas) então faça
    CustoRotOriginal ← custo rota original
    CustoRotModif ← custo da rota modificada
    Se (CustoRotModif < CustoRotOriginal) então faça
      Cmin ← CustoRotModif
      MelhorRota ← rota modificada
    Fim Se
  Fim Se
Fim Para
Fim Senão
Fim Para
Se MelhorRota <> null então faça
  rota ← MelhorRota
Fim Se
Onde:

```

- Cmin - armazena o melhor custo até o momento;
- MelhorRota - é a melhor rota conseguida com a modificação de um ponto;

- $posE$  - posição do ponto de entrega correspondente ao ponto de coleta que está sendo analisado;
- $rota$  - é um vetor onde cada elemento é um ponto de coleta ou de entrega;
- $CustoRotOriginal$  - é o custo da rota antes da modificação;
- $CustoRotModif$  - é o custo da rota após a modificação do ponto (entrega ou coleta);
- $posC$  - posição do ponto de coleta correspondente ao ponto de entrega que está sendo analisado.

### Aplicação dos procedimentos implementados:

```

SolucaoAtual ← Solução Inicial
MelhorSolucao ← SolucaoInicial
SolucaoAtual ← Reordena rota
Para x=1 até x =número de iterações faça
    SolucaoAtual ← Reinserir Solicitação
    SolucaoAtual ← Reordena rota
    SolucaoAtual ← Troca Solicitações
    SolucaoAtual ← Reordena rota
    custoSolucaoAtual ← custo da solucao atual
    custoMelhorSolucao ← custo da melhor solucao
    Se o custoSolucaoAtual < custoMelhorSolucao então faça
        MelhorSolucao ← SolucaoAtual
    Fim Se
Fim Para

```

### Onde:

- $SolucaoAtual$  - corresponde às rotas da solução atual do problema;
- $MelhorSolução$  - melhor solução conseguida até então pelo algoritmo;
- $custoSolucaoAtual$  - custo conseguido na solução atual do problema;
- $custoMelhorSolucao$  - custo da melhor solução conseguida até então.