



FUNDAÇÃO EDSON QUEIROZ
UNIVERSIDADE DE FORTALEZA - UNIFOR

Arturo Bezerra Acioli Toscano Filho

**Um Ambiente na *Web* para Otimização do Transporte de
Passageiros sob Regime de Fretamento**

Fortaleza

2006

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



FUNDAÇÃO EDSON QUEIROZ
UNIVERSIDADE DE FORTALEZA - UNIFOR

Arturo Bezerra Acioli Toscano Filho

**Um Ambiente na *Web* para Otimização do Transporte de
Passageiros sob Regime de Fretamento**

Dissertação apresentada ao Curso de
Mestrado em Informática Aplicada da
Universidade de Fortaleza como requisito
parcial para obtenção do Título de Mestre
em Informática.

Orientador: Prof. Dr. Plácido Rogério Pinheiro

Fortaleza

2006

Arturo Bezerra Acioli Toscano Filho

**Um Ambiente na *Web* para Otimização do Transporte de
Passageiros sob Regime de Fretamento**

Data de Aprovação: _____

Banca Examinadora:

Prof. Plácido Rogério Pinheiro, D. Sc. (orientador - Unifor)

Prof. Júlio Francisco Barros Neto, D. Sc. (membro - UFC)

Prof. Antônio Clécio Fontelles Thomaz, D. Sc. (membro - UECE)

Prof. Carlos Augusto Uchoa da Silva, D. Sc. (membro - UFC)

"A grandeza não consiste em receber honras, mas em merecê-las."

Aristóteles

Aos meus pais, Arturo e Adelúsia e aos meus irmãos, Nila e Carbônio.

Agradecimentos

Aos meus pais, pelo apoio, dedicação e preocupação que sempre tiveram em todos os momentos de minha vida.

Ao professor Plácido Rogério Pinheiro, pela valiosa orientação, dedicação e atenção que recebi durante todo o curso, tornando possível a realização deste trabalho.

Aos colegas, Fernando Siqueira, Ricardo Chaves, Napoleão Nepomuceno, Adriana Rigolon, Maxlene Batista, André, Gabriel Pontes, Manoel Mendonça e Aélcio Júnior pelas horas de estudo, grande ajuda e amizade formada e fortalecida. Bem como ao Paulo Neto, pela presteza e incentivo.

À Ana Raquel Catunda, pelo apoio nos momentos mais difíceis que antecederam a defesa. Com sua atenção, incentivo e companhia pude superar mais essa etapa em minha vida.

À Tânia, secretária do Mestrado em Informática Aplicada, que sempre me prestou atenção e presteza no esclarecimento de dúvidas correntes, além de ter tornado uma grande amiga e incentivadora.

Aos professores, por todos os conhecimentos transmitidos com dedicação.

À Autarquia Municipal de Trânsito, Serviços Públicos e de Cidadania de Fortaleza (AMC) e à Esmaltec S. A, que com atenção e presteza forneceram os dados para a realização do trabalho.

À Fundação Cearense de Amparo a Pesquisa (FUNCAP), pelo apoio financeiro por meio de uma bolsa de estudos.

Resumo

Esta dissertação tem por objetivo desenvolver e comparar propostas de solução para o problema de transporte de passageiros, que utilizam o regime de fretamento contínuo, o qual é categorizado como um problema de localização e roteamento. Explorando as potencialidades atualmente oferecidas pela *World Wide Web* (WWW), construiu-se um mapa interativo na plataforma SIG (Sistema de Informação Geográfica) e em ambiente *web*, composto pelas vias urbanas de tráfego de veículos de uma cidade utilizando as seguintes tecnologias de fontes abertas e padronizadas pela W3C: *eXtensible Markup Language* (XML), *Scalable Vector Graphics* (SVG), *Document Object Model* (DOM) e linguagens de *script* ECMAScript/JavaScript. Os passos dos métodos propostos são implementados de forma seqüencial e interativa. Assim sendo, foram desenvolvidas técnicas para resolução de cada etapa de forma que o sistema computacional fosse integrado em suas partes. Uma aplicação desse serviço de otimização do transporte de passageiros teve como estudo de caso, uma fábrica situada no distrito industrial de Maracanaú (CE), na região metropolitana de Fortaleza, sendo que a maioria de seus funcionários reside na capital cearense.

Abstract

The main objective of this research is to improve and compare methods that have been used to optimize the day-to-day transport of passengers that have the same final destination, which is characterized as both location and routing problem. Taking advantage of the great features currently offered by the World Wide Web (WWW), an interactive GIS-based map of urban roadways of a city was created using the following commonly used open Web W3C standards: eXtensible Markup Language (XML), Scalable Vector Graphics (SVG), Document Object Model (DOM), and ECMAScript/JavaScript language scripts. The steps of the proposed approach are implemented in a sequentially and interactively way. Therefore, proper techniques were developed for each step of the process in a way that the whole computational system works in an integrated way. In order to better evaluate the presented solution, a case study involving a factory and the transport of their employees was conducted. Whereas most of the employees live in the city of Fortaleza (Brazil), the factory itself is located in the industrial district of Maracanaú, which is part of the Fortaleza Metropolitan Region.

Sumário

INTRODUÇÃO	15
CAPÍTULO 1 – GRAFOS E ALGORITMOS DE MENOR CAMINHO	19
1.1 GRAFOS.....	19
1.1.1 Grafo Simples e Grafo Completo	21
1.1.2 Grafo Direcionado e Grafo Não-Direcionado	22
1.1.3 Grafo Esparsos e Grafo Denso	22
1.1.4 Grafo Ponderado e Grafo Rotulado	23
1.1.5 Grafo Conexo e Grafo Desconexo.....	23
1.1.6 Rede.....	23
1.2 REPRESENTAÇÃO COMPUTACIONAL DE GRAFOS.....	24
1.2.1 Matriz de adjacência	24
1.2.2 Lista de adjacência.....	25
1.2.3 Comparação das representações de grafos.....	26
1.3 PROBLEMAS DE MENOR CAMINHO (PMC)	27
1.3.1 Algoritmo de Dijkstra	29
CAPÍTULO 2 - SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS	33
2.1 SCALABLE VECTOR GRAPHICS (SVG)	34
2.1.1 Características do SVG	35
2.1.2 Aplicações e suporte ao SVG.....	36
2.1.3 Compactar arquivos SVG.....	37
2.2 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS	37
2.2.1 Histórico e evolução do SIG.....	38
2.2.2 Conceitos básicos, componentes e funções do SIG	39
2.2.3 Aplicações de SIG em transportes	41
2.2.4 SIG na Internet	42
2.3 ARQUITETURA CLIENTE/SERVIDOR.....	45
2.3.1 Sistema cliente/servidor em 2-camadas.....	46
2.3.2 Sistema cliente/servidor em 3-camadas.....	47
2.3.3 2-camadas versus 3-camadas	47
2.3.4 Sistema cliente/servidor e a Internet	48
CAPÍTULO 3 – PROBLEMA DE TRANSPORTE SOB REGIME DE FRETAMENTO	50
3.1 FRETAMENTO DE PASSAGEIROS	51
3.2 HEURÍSTICAS IMPLEMENTADAS.....	53
3.2.1 Formação dos agrupamentos (clusters) de passageiros.....	54
3.2.1.1 Algoritmos de Teitz e Bart e de Gillett e Johnson.....	55
3.2.1.2 Algoritmo de Gillett e Miller(1974)	57
3.2.2 Problema de localização dos pontos de parada e alocação dos passageiros aos pontos	58
3.2.2.1 Algoritmo baseado na heurística de Kolesar e Walker	58
3.2.3 Problema de roteamento de veículos (PRV).....	60
3.2.3.1 Algoritmo do vizinho mais próximo	60
3.2.3.2 Algoritmo de Clarke e Wright paralelo	61
3.2.3.3 Algoritmo de inserção mais distante	64
3.2.4 Problema de melhoria da rota.....	66
3.2.4.1 Algoritmo 3-opt.....	67
3.3 ESTRATÉGIAS HEURÍSTICAS DE SOLUÇÃO.....	67
3.3.1 Estratégia LAR	70
3.3.2 Estratégia ARL	73
3.3.3 Variação da estratégia ARL	76

CAPÍTULO 4 – ESTUDO DE CASO	77
4.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	77
4.1.1 <i>Solução do problema atualmente</i>	79
4.2 CARACTERÍSTICAS DA APLICAÇÃO	81
4.2.1 <i>Representação computacional</i>	82
4.2.2 <i>Modelo cliente/servidor e configurações</i>	83
4.2.3 <i>Considerações em relação ao problema</i>	85
4.3 RESULTADOS NUMÉRICOS OBTIDOS	87
4.3.1 <i>Segundo turno (horário comercial)</i>	87
4.3.1.1 <i>Estratégia LAR</i>	89
4.3.1.2 <i>Estratégia ARL</i>	97
4.3.1.3 <i>Variação da estratégia ARL</i>	105
4.3.2 <i>Demais turnos</i>	112
4.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	114
4.4.1 <i>Entre as estratégias</i>	114
4.4.2 <i>Entre a solução vigente na empresa e as estratégias</i>	116
CONCLUSÃO	120
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONTRIBUIÇÕES	120
5.2 TRABALHOS FUTUROS	121
BIBLIOGRAFIA	123
APÊNDICE I	133

Lista de Ilustrações

Quadros

QUADRO 1 - CARACTERÍSTICAS DOS FORMATOS VETORIAL E POR RASTREIO.....	34
QUADRO 2 - EVOLUÇÃO DA TECNOLOGIA SIG	39
QUADRO 3 - 2-CAMADAS VERSUS 3-CAMADAS	48
EQUAÇÃO 2 - CÁLCULO DO CUSTO DE INSERÇÃO	65
QUADRO 4 - CONFIGURAÇÕES DESEJÁVEIS NO SERVIDOR E NO CLIENTE	84
QUADRO 5 - CONFIGURAÇÕES DE <i>HARDWARE</i> E <i>SOFTWARE</i> DA APLICAÇÃO	85
QUADRO 6 - COMPARAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS QUANTO À DISTÂNCIA TOTAL REAL PERCORRIDA E O NÚMERO DE ROTAS EM CADA TURNO.....	115

Figuras

FIGURA 1 - REPRESENTAÇÃO DE UM CIRCUITO ELÉTRICO COMO UM GRAFO.....	20
FIGURA 2 - REPRESENTAÇÃO DE UM CIRCUITO LÓGICO COMO UM GRAFO	21
FIGURA 3 - GRAFO SIMPLES E COMPLETO	21
FIGURA 4 - GRAFO DIRECIONADO E NÃO-DIRECIONADO.....	22
FIGURA 5 - GRAFO ESPARSO E DENSO.....	22
FIGURA 6 - GRAFO ROTULADO E PONDERADO	23
FIGURA 7 - GRAFO CONEXO E DESCONEXO.....	23
FIGURA 8 - REDE OU GRAFO COM PESO	24
FIGURA 9 - MATRIZ DE ADJACÊNCIA MODIFICADA (MATRIZ DE CUSTOS).....	25
FIGURA 10 - LISTAS DE ADJACÊNCIA.....	26
FIGURA 11 - ALGORITMO DE MENOR CAMINHO DE DIJKSTRA.....	31
FIGURA 12 - CÓDIGO E IMAGEM SVG	35
FIGURA 13 - COMPONENTES DE UM SIG EMPRESARIAL.....	41
FIGURA 14 - MALHA VIÁRIA DE FORTALEZA CONSTRUÍDA UTILIZANDO SVG.....	44
FIGURA 15 - ARQUITETURA CLIENTE/SERVIDOR 2-CAMADAS.....	47
FIGURA 16 - ARQUITETURA CLIENTE-SERVIDOR 3-CAMADAS.....	49
FIGURA 17 - CÁLCULO DAS ECONOMIAS (E)	62
FIGURA 18 - FLUXOGRAMA DAS ETAPAS E ALGORITMOS ENVOLVIDOS NA ESTRATÉGIA LAR	72
FIGURA 19 - FLUXOGRAMA DAS ETAPAS E ALGORITMOS ENVOLVIDOS NA ESTRATÉGIA ARL E EM SUA VARIAÇÃO	75
FIGURA 20 - ARQUITETURA CLIENTE-SERVIDOR EM 3-CAMADAS	84
FIGURA 21 - DISTRIBUIÇÃO RESIDENCIAL DOS FUNCIONÁRIOS DO SEGUNDO TURNO.....	88
FIGURA 22 - VISUALIZAÇÃO NO MAPA DOS RESULTADOS OBTIDOS NA ETAPA 1 DA ESTRATÉGIA LAR.....	92
FIGURA 23 - VISUALIZAÇÃO NO MAPA DOS RESULTADOS OBTIDOS NA ETAPA 2 DA ESTRATÉGIA LAR	94
FIGURA 24 - VISUALIZAÇÃO NO MAPA DOS RESULTADOS OBTIDOS NA ETAPA 3 DA ESTRATÉGIA LAR	96
FIGURA 25 - VISUALIZAÇÃO NO MAPA DOS RESULTADOS OBTIDOS NA ETAPA 1 DA ESTRATÉGIA ARL	99
FIGURA 26 - VISUALIZAÇÃO NO MAPA DOS RESULTADOS OBTIDOS NA ETAPA 2 DA ESTRATÉGIA ARL	101
FIGURA 27 - VISUALIZAÇÃO NO MAPA DOS RESULTADOS OBTIDOS NA ETAPA 4 DA ESTRATÉGIA ARL	104
FIGURA 28 - VISUALIZAÇÃO NO MAPA DOS RESULTADOS OBTIDOS NA ETAPA 1 DA VARIAÇÃO DA ESTRATÉGIA ARL	106
FIGURA 29 - MAPA DOS RESULTADOS ORIUNDOS DA ETAPA 2 DA VARIAÇÃO DA ESTRATÉGIA ARL.....	108
FIGURA 30 - VISUALIZAÇÃO NO MAPA DOS RESULTADOS OBTIDOS NA ETAPA 4 DA VARIAÇÃO DA ESTRATÉGIA ARL	111
FIGURA 31 - GRÁFICO DA COMPARAÇÃO DOS MELHORES VALORES OBTIDOS POR CADA ESTRATÉGIA.....	115

FIGURA 32 - GRÁFICO DA COMPARAÇÃO DOS CUSTOS DIÁRIOS DE ACORDO COM AS SOLUÇÕES POR TURNO	117
FIGURA 33 - MAPA NÃO VISUALIZADO	133
FIGURA 34 - MAPA DA CIDADE DE FORTALEZA-CE E OS COMANDOS FUNCIONAIS DA APLICAÇÃO	134
FIGURA 35 - SELEÇÃO DE LOCALIDADE NO MAPA	135
FIGURA 36 - MAPA COM ZOOM AUMENTADO, EXIBINDO PONTOS RECUPERADOS DO BD	136
FIGURA 37 - RESTRIÇÕES DA ETAPA ESCOLHIDA DA ESTRATÉGIA	137
FIGURA 38 - RESULTADOS APRESENTADOS NO MAPA E NOS RELATÓRIOS	138

Tabelas

TABELA 1 - COMPARAÇÃO, QUANTO A COMPLEXIDADE DE TEMPO, DAS REPRESENTAÇÕES DE GRAFOS	27
TABELA 2 – HORÁRIOS DA JORNADA DE TRABALHO E DISTRIBUIÇÃO DOS TRABALHADORES QUE UTILIZAM O SERVIÇO DE TRANSPORTE POR TURNO.....	79
TABELA 3 - DISTRIBUIÇÃO DETALHADA POR LOCALIDADE DO QUANTITATIVO DE FUNCIONÁRIOS E ÔNIBUS UTILIZADOS EM CADA TURNO	81
TABELA 4 - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DO NÚMERO DE FUNCIONÁRIOS POR PONTO DE PARADA.....	90
TABELA 5 - RELATÓRIO DO PONTO DE PARADA 89	91
TABELA 6 - RESULTADOS DAS HEURÍSTICAS DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS NA ESTRATÉGIA LAR.....	93
TABELA 7 - RESULTADOS DA HEURÍSTICA DE MELHORIA DE ROTA NA ESTRATÉGIA LAR	95
TABELA 8 - DISTÂNCIAS FICTÍCIAS E REAIS DE CADA ROTA NA ESTRATÉGIA LAR	97
TABELA 9 - DISTRIBUIÇÃO DO QUANTITATIVO DE FUNCIONÁRIOS ALOCADOS EM CADA CLUSTER NA ESTRATÉGIA ARL	98
TABELA 10 - DISTRIBUIÇÃO DO NÚMERO DE PONTOS DE PARADA DE ACORDO COM OS GRUPOS DETERMINADOS PELA ESTRATÉGIA ARL	100
TABELA 11 - RESULTADOS DAS HEURÍSTICAS DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS NA ESTRATÉGIA ARL.....	102
TABELA 12 - RESULTADOS DA HEURÍSTICA DE MELHORIA DE ROTA 3-OPT NA ESTRATÉGIA ARL	102
TABELA 13 - DISTÂNCIAS FICTÍCIAS E REAIS DE CADA ROTA NA ESTRATÉGIA ARL	103
TABELA 14 - DISTRIBUIÇÃO DO QUANTITATIVO DE FUNCIONÁRIOS ALOCADOS EM CADA CLUSTER NA VARIAÇÃO DA ESTRATÉGIA ARL.....	105
TABELA 15 - DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE PARADA DE ACORDO COM OS GRUPOS DETERMINADOS PELA VARIAÇÃO DA ESTRATÉGIA ARL	107
TABELA 16 - RESULTADOS DAS HEURÍSTICAS DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS NA VARIAÇÃO DA ESTRATÉGIA ARL	109
TABELA 17 - RESULTADOS DA HEURÍSTICA DE MELHORIA DE ROTA 3-OPT NA VARIAÇÃO DA ESTRATÉGIA ARL .	109
TABELA 18 - DISTÂNCIAS FICTÍCIAS E REAIS DE CADA ROTA NA VARIAÇÃO DA ESTRATÉGIA ARL	110
TABELA 19 - RESULTADOS ALCANÇADOS NO PRIMEIRO, TERCEIRO E QUARTO TURNOS DE TRABALHO.	114
TABELA 20 - COMPARAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS E DA SOLUÇÃO ATUAL DA ESMALTEC QUANTO AOS CUSTOS DIÁRIOS EM CADA TURNO.	117
TABELA 21 – REDUÇÃO PERCENTUAL DOS CUSTOS DIÁRIOS PROMOVIDA POR CADA ESTRATÉGIA EM RELAÇÃO À SOLUÇÃO ATUAL DA ESMALTEC.	118

Equações

EQUAÇÃO 1 - CÁLCULO DAS ECONOMIAS.....	63
EQUAÇÃO 2 - CÁLCULO DO CUSTO DE INSERÇÃO	65

Lista de Abreviaturas e Siglas

ARL – *Allocation-Routing-Location*

ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres

API – *Application Program Interface*

ASP – *Active Server Pages*

BD – Banco de Dados

CAD – *Computer Assisted Drafting*

CGIS – *Canadian Geographic Information Systems*

DOM – *Document Object Model*

ESRI – *Environmental Systems Research Institute*

GIF – *Graphics Interchange Format*

GLP – Gás Liquefeito de Petróleo

GNU - *GNU's Not UNIX*

HTML – *Hypertext Markup Language*

HTTP – *HyperText Transfer Protocol*

IIS – *Internet Information Service*

IMS – *Internet Map Server*

INPE / DPI – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais / Divisão de Processamento de Imagens

JPEG – *Joint Photographic Experts Group*

JSP – *Java Server Pages*

LAR – *Location-Allocation-Routing*

MNT – Modelo Numérico de Terreno

NA – Número de agrupamentos

NT – Número de transmissão

PDA – *Personal Digital Assistant*

PLR – Problema de Localização e Roteamento

PMC – Problema de Menor Caminho

PNG – *Portable Network Graphics*

PRV – Problema de Roteamento de Veículos

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SMIL – *Synchronized Multimedia Integration Language*

SVG – *Scalable Vector Graphics*

SYMAP – *Synagraphic Mapping System*

UTM – Universal Transverse Mercator

XML – *eXtensible Markup Language*

WWW – *World Wide Web*

W3C – *World Wide Web Consortium*

Introdução

Com o crescimento das cidades e, conseqüentemente, da população, o problema cotidiano relacionado à dificuldade de acesso aos diferentes pontos de interesse (locais de trabalho, escolas e áreas de lazer como praias, parques e praças esportivas) começou a envolver um número cada vez maior de pessoas que passaram a ficar na dependência de meios de locomoção, especialmente em cidades de médio e grande porte. Juntando-se a isso, a desigualdade social provocada pela má distribuição de renda no Brasil restringiu a possibilidade de aquisição de veículos próprios à maioria das pessoas. Dentro desse panorama, empresas prestadoras de serviço no setor de transporte surgiram e passaram a vislumbrar esse mercado buscando alternativas para suprir suas necessidades.

Os setores público e privado procurando fornecer o transporte aos seus servidores e funcionários, que não utilizam condução própria, ao local de trabalho adotaram um dos seguintes subterfúgios: distribuição de vales-transporte ou contratação de empresas prestadoras desse serviço, sob regime de fretamento contínuo (serviço prestado a pessoas jurídicas para o transporte de seus empregados - Resolução ANTT nº. 16/02).

Na visão do empregador, o transporte oferecido aos seus funcionários por fretamento contínuo até o local de trabalho e no retorno às suas residências representa, dentre outras vantagens, o aumento da produtividade, da pontualidade e diminuição nas ausências dos empregados provocadas sobretudo, pelo surgimento inesperado de greve no transporte público urbano. Já no ponto de vista do empregado, o conforto, a possibilidade de desfrutar mais tempo com a família, a segurança e a integração com outros colegas de trabalho são quesitos enaltecidos como importantes.

Como uma forma de mensurar os gastos envolvidos nessa atividade, pode-se citar as despesas, que giram em torno de R\$ 20,5 milhões por ano com 31 mil funcionários (R\$ 55,11 por funcionário/mês), da maior empregadora privada do

Brasil, a Volkswagen (MICHAEL, 1997). Já no setor público, os valores pagos pelo Banco do Nordeste do Brasil com a contratação desse serviço, junto a empresas terceirizadas, perfazem em torno de R\$90.000,00 por trimestre, para o transporte de 440 passageiros (R\$ 68,18 por funcionário/mês) (BNB, 2006).

Os objetivos, de certo modo, conflitantes de reduzir custos e de melhorar a qualidade do serviço de transporte prestado exigem uma capacitação crescente dos técnicos em transporte e de melhores ferramentas para auxiliar o processo de planejamento. Esta necessidade de se utilizar ferramentas que auxiliem os tomadores de decisão atuantes na área de transporte tem levado a uma procura cada vez maior pelos Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) são poderosas ferramentas de análise e planejamento espacial cujo potencial em aplicações tem atraído, nos últimos anos, várias pesquisas em diversos campos do conhecimento humano. Dentre os campos, os problemas de otimização combinatória em ambiente SIG aparecem combinados à análise de redes de fluxo (estradas, ruas, canais de comunicação, dentre outros) e podem tratar problemas de localização de facilidades e roteamento de veículos levando-se em conta várias informações espaciais.

Como a internet é um importante meio disseminador de informações, aplicações voltadas para o uso de mapas *web* interativos acessando bases de dados geográficas passaram a ser alvo de empresas que desenvolvem *softwares* na área de SIGs. Essa conjuntura inspirou a formulação desse trabalho com o desenvolvimento de um ambiente na *web* para a solução, mais econômica, do problema de transporte de pessoas (funcionários, alunos etc.) sob o regime de fretamento contínuo.

A racionalização desse sistema de transporte de entidades tanto no sentido origem-destino quanto no percurso de volta compreende uma seqüência de etapas, que incluem: o cadastro das residências das pessoas a serem transportadas, o cálculo da localização dos pontos de parada de ônibus e a geração de itinerários (roteamento). As características que envolvem esse problema recaem na classe dos problemas de localização e roteamento (PLR).

Como os PLRs fazem parte da categoria dos problemas NP-*hard*, meios exatos de solução não são considerados para problemas de médio e grande porte. Em

virtude da aplicação desenvolvida para o problema de transporte executar sobre uma malha viária extensa, heurísticas são sugeridas a fim de gerar soluções em uma quantidade razoável de tempo. Outro fator a reforçar a escolha por algoritmos aproximativos trata-se do meio utilizado na aplicação, a Internet, pois há uma restrição relativa ao tempo de espera pelo *browser* do cliente por uma resposta do servidor *web*.

Esta dissertação tem como objetivo principal, a concepção e o desenvolvimento de um ambiente na Internet que propicie a otimização do sistema de transporte de pessoas, de forma a reduzir a quantidade de veículos utilizados no processo, bem como otimizar a rota total desenvolvida. Tem-se também, a preocupação em minimizar o número de pontos de parada dos ônibus levando em consideração o percurso máximo de uma pessoa até o ponto aonde foi alocada.

A realização desse objetivo permitirá que gastos, outrora em excesso, no setor de transporte sejam redistribuídos entre as demais áreas que compõem a atividade fim das empresas ou dos órgãos governamentais, gerando mais empregos e, uma melhora na qualidade de vida dos cidadãos que, permanecendo um menor período de tempo no interior dos veículos terão seu desgaste físico diminuído, proporcionando uma maior satisfação pessoal, que certamente refletirá no processo e no ambiente produtivo a qual está dedicado.

Visando alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram almejados:

- Implementar em Asp.Net por meio da linguagem de programação C# (C *sharp*), algoritmos e heurísticas em teoria dos grafos para a solução de problemas de menor caminho, formação de *clusters*, localização dos pontos de parada e roteamento de veículos;
- Implementar em Asp.Net utilizando C# (C *sharp*) e SVG (*Scalable Vector Graphics*) uma interface intuitiva para a entrada e análise dos dados, armazenando as informações no banco de dados Microsoft *Access*;
- Gerar mapas que possibilitem a visualização e a impressão de relatórios das soluções provenientes dos problemas de alocação das pessoas aos pontos de parada e do roteamento dos ônibus, para posterior distribuição entre os motoristas;

- Aplicar as implementações computacionais em meio *web*, numa indústria que utiliza 28 rotas de ônibus para o transporte de pouco mais de 860 funcionários distribuídos entre quatro turnos.

O sistema proposto é dividido em módulos contendo rotinas e algoritmos estruturados em heurísticas, com as saídas provenientes de uma etapa sendo determinantes na produção de respostas otimizadas na seguinte.

Este trabalho encontra-se dividido em quatro capítulos, sendo que o primeiro abordará os conceitos fundamentais sobre teoria dos grafos e sobre algumas formas de melhor representá-lo computacionalmente de acordo com as características dos problemas. Este capítulo dissertará também sobre algoritmos de menor caminho, mais especificamente, do algoritmo de Dijkstra, pois são componentes necessários ao suporte das heurísticas implementadas e citadas nos capítulos seguintes.

O segundo capítulo versará sobre a aplicação de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para a representação de dados de transporte além de destacar a aplicação de SIG na Internet utilizando uma arquitetura cliente-servidor. Utilizou-se a tecnologia *Scalable Vector Graphics* para a construção de informações gráficas vetorizadas e para a interação com o usuário na *web*.

No terceiro capítulo, buscar-se-á dissertar sobre o problema de transporte de pessoas sob o regime de fretamento contínuo, categorizando-o como problema de localização e roteamento; além de realizar uma abordagem das características que o envolvem, das estratégias de resolução e das heurísticas implementadas adaptadas às peculiaridades do estudo de caso.

Será apresentado no último capítulo um estudo de caso envolvendo o transporte de funcionários de uma empresa situada na região metropolitana de Fortaleza-Ceará e a técnica utilizada atualmente para solucioná-lo. Os resultados numéricos obtidos com a resolução do problema empregando as heurísticas e algoritmos citados nos capítulos anteriores serão apresentados e confrontados com a solução aplicada no presente momento.

Capítulo 1 – Grafos e Algoritmos de Menor Caminho

Este capítulo procura expor conceitos e definições básicas essenciais a uma melhor compreensão acerca dos capítulos subseqüentes; objetivando abordar aspectos computacionais relacionados às estruturas fundamentais necessárias ao desenvolvimento do trabalho.

Com esta finalidade, procurou-se abordar:

- Alguns conceitos relacionados aos grafos e algumas de suas representações computacionais;
- Os algoritmos de menor caminho que proporcionam o alicerce às implementações dos algoritmos de localização dos pontos de parada de ônibus e dos algoritmos de roteamento de veículos presentes nesse trabalho;

Buscou-se versar a respeito da complexidade computacional envolvida na implementação das estruturas de dados utilizadas nas variações dos algoritmos de menor caminho.

Os conceitos de teoria dos grafos e sua representação computacional foram retirados de várias fontes, destacando-se Syslo (1983), Wilson (1985), Evans e Minieka (1992) e Preiss (2001).

1.1 Grafos

O primeiro artigo sobre grafos foi escrito por um matemático suíço chamado Leonhard Euler e foi publicado em 1736 pela Academia de Ciências em St. Petersburg. Segundo Mayeda (1972), grafo é como uma estrutura de abstração que consiste de pontos denominados "vértices" ou "nós", e segmentos de linhas chamadas "arestas" ou "arcos", os quais conectam estes vértices de uma forma que os vértices e arestas indicam, respectivamente, componentes e relacionamentos entre estes componentes.

Um grafo pode ser representado por $G = (V, A)$, onde V consiste de um conjunto finito de vértices (nós) $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ e A , de um conjunto finito de arestas (arcos) $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$. O número de nós e o número de arcos são representados por n e m , respectivamente.

Cada aresta é delimitada por um par de vértices distintos (u, v) . Na representação visual do grafo, os vértices são apresentados por pontos e as arestas por segmentos de linha.

A capacidade que os grafos possuem de representar graficamente muitos problemas reais possibilitam às pessoas um meio a mais para a confecção de projetos, a análise de problemas e a tomada de decisão. Podemos utilizar grafos em: redes de transporte aéreo, redes de telefonia e de computadores, circuitos elétricos (Figura 1) e circuitos lógicos (Figura 2), entre outros.

Certas classes de problemas em rede de transporte podem ser modeladas usando teoria dos grafos. Onde podemos destacar como exemplo:

- Problema de menor caminho;
- Problema da árvore geradora mínima;
- Problema do caixeiro viajante;
- Problema de escalonamento de veículos.

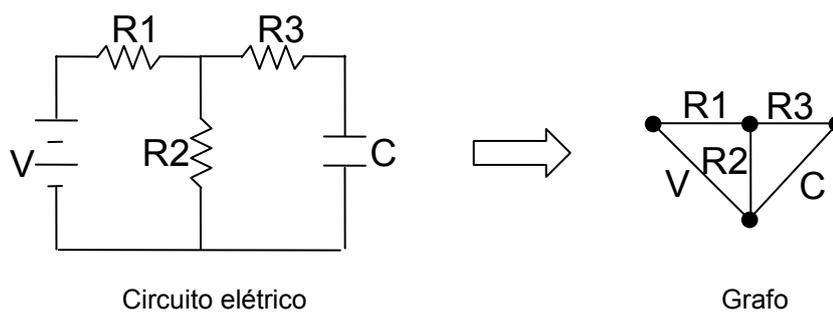


Figura 1 - Representação de um circuito elétrico como um grafo

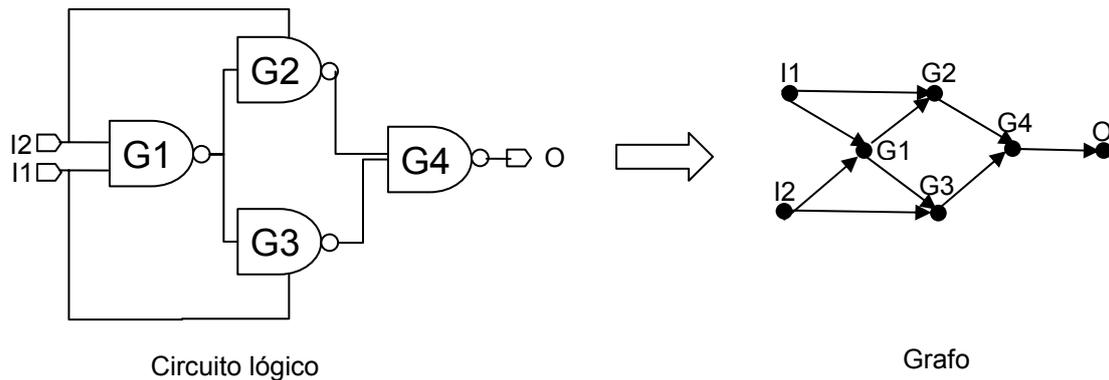


Figura 2 - Representação de um circuito lógico como um grafo

No grafo da Figura 1, os pontos representam onde os componentes estão conectados (isto é, os fios) e as linhas, os componentes (resistores e capacitores). Já no grafo da Figura 2, os nós indicam as portas lógicas e os arcos, os fluxos de sinais entre as portas.

A taxonomia dos grafos, tomando como base as peculiaridades em suas estruturas, é apresentada a seguir:

1.1.1 Grafo Simples e Grafo Completo

Um grafo é denominado simples (Figura 3) se não possui laços (uma aresta que possui como extremos um mesmo vértice) nem arestas paralelas ou múltiplas (duas arestas que possuem os mesmos extremos). À existência de uma ligação entre todo par de vértices diz-se que o grafo é completo (Figura 3). Um grafo completo é um grafo simples.



Figura 3 - Grafo simples e completo

1.1.2 Grafo Direcionado e Grafo Não-Direcionado

Na literatura, normalmente, aplica-se os termos vértice e aresta quando se trabalha com grafos não-direcionados e os termos nó e arco quando se refere aos grafos direcionados.

Um grafo é dito ser direcionado ou orientado (Figura 4) quando cada par de vértices (x, y) associado a cada arco é um par ordenado, onde x é a origem e y o destino. A direção é mostrada por uma seta sob o arco. E um grafo é dito não-direcionado ou não-orientado (Figura 4), se as arestas não possuem direção, ou seja, (x, y) e (y, x) são indistinguíveis. Um grafo completo não-orientado é chamado de clique.

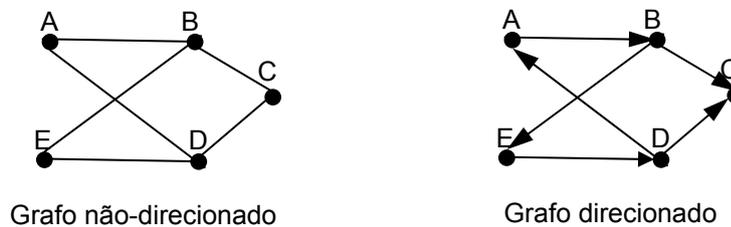


Figura 4 - Grafo direcionado e não-direcionado

1.1.3 Grafo Esparso e Grafo Denso

Um grafo é considerado esparso (Figura 5), quando o número de arestas (m) é muito menor que o quadrado do número de vértices (n), ou seja, $(m < n^2)$. Isto ocorre para grafos direcionados, para aqueles não direcionados, o número de arestas é muito inferior à metade do quadrado do número de vértices $(m < n^2/2)$.

Já o grafo é dito denso (Figura 5), se o número de arestas está próximo ao quadrado do número de vértices $(m \approx n^2)$, para os direcionados, ou à metade do quadrado do número de vértices $(m \approx n^2/2)$ no caso dos não direcionados.

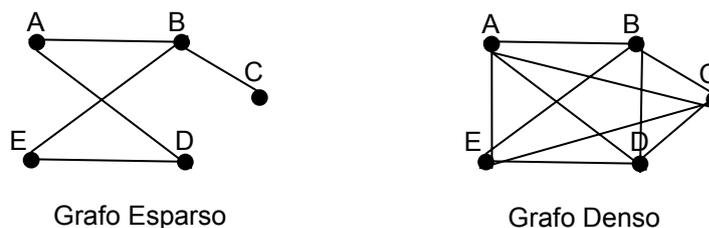


Figura 5 - Grafo esparso e denso

1.1.4 Grafo Ponderado e Grafo Rotulado

Aos vértices ou às arestas podem ser associadas informações, denominadas como rótulos ou pesos, que podem representar: distância, tempo no trânsito, custo de construção, ou qualquer outro parâmetro.

Diz-se que um grafo é ponderado ou valorado (Figura 6) quando existem valores numéricos associados a suas arestas ou vértices. Caso existam atribuições numéricas ou alfabéticas aos vértices, o grafo é dito rotulado (Figura 6).

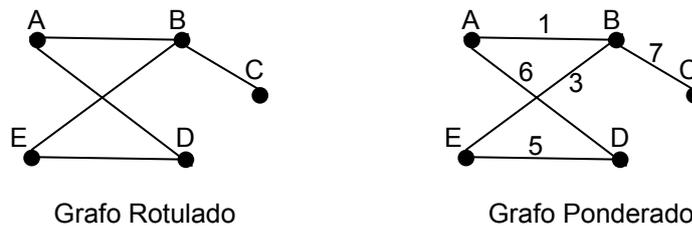


Figura 6 - Grafo rotulado e ponderado

1.1.5 Grafo Conexo e Grafo Desconexo

Um grafo é dito conexo (Figura 7) se para todo par de vértices existe uma aresta ou uma seqüência de arestas ligando-os. Caso contrário, classifica-o como desconexo (Figura 7).

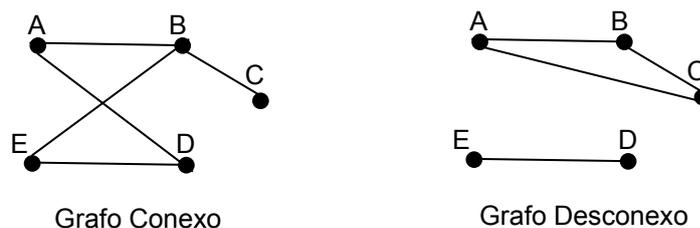


Figura 7 - Grafo conexo e desconexo

1.1.6 Rede

Uma rede R ou grafo direcionado valorado (Figura 8) pode ser representada por $R = (V, A, C)$, onde C corresponde aos números reais positivos associados a cada arco e/ou nós, denominados capacidade do arco.

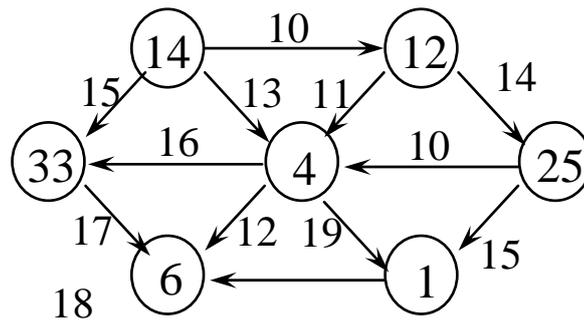


Figura 8 - Rede ou grafo com peso

1.2 Representação computacional de grafos

Quando o escopo da utilização de grafos passa a focar as aplicações práticas, o número de vértices e arestas tende a crescer substancialmente dificultando a análise e a tomada de decisão através de uma interpretação manual, sem o uso do artifício computacional.

Objetivando usufruir o benefício dos computadores no processamento das informações e sabendo que estes não conseguem manipular a estrutura geométrica dos grafos, diversos esquemas de representação foram surgindo como forma de melhor representar as características e a maneira como vai ser manipulado os grafos.

A escolha da estrutura é um fator muito importante na performance dos algoritmos que serão implementados, tanto sob o aspecto da armazenagem quanto do processamento dos dados. Não há uma única estrutura de dados que sobreponha a todas as outras. A opção por uma estrutura em detrimento a outra dependerá do tamanho e da densidade do problema, da natureza do processamento e da linguagem de programação a ser escolhida na implementação.

1.2.1 Matriz de adjacência

A forma mais simples de representar computacionalmente um grafo $G = (V, A)$ com n vértices é através de uma matriz $M_{n \times n}$ composta por 0s (zeros) e 1s (uns), onde suas linhas e colunas estão associadas aos nós do grafo de acordo com a seguinte atribuição:

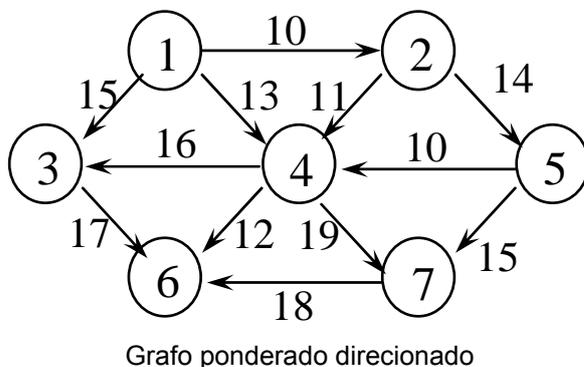
$$M_{ij} = \begin{cases} 1 & (v_i, v_j) \in A \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

A matriz definida acima é denominada matriz de adjacência.

Com uma variação na matriz de adjacência $M_{ij} = [p_{ij}]$ pode-se representar um grafo valorado. O atributo p_{ij} representa o peso do arco (i, j) . Caso não haja uma ligação entre o par de nós (i, j) de um grafo, ao elemento p_{ij} é atribuído um valor muito grande ($\text{inf} = 100.000.000$), já que é pouco provável que exista uma rota de comprimento tão grande. A Figura 9 procura ilustrar a matriz de adjacência assimétrica (para um grafo direcionado) sobre um grafo valorado.

A vantagem na utilização da matriz de adjacência consiste na facilidade em determinar todos os arcos com origem em um determinado nó. Além de um acesso direto ao valor de um arco sem a necessidade de percorrer laços.

Porém, a principal desvantagem se refere ao espaço de memória para armazenamento que é $O(n^2)$, independente do número de arcos. Em uma situação onde o grafo é esparso, há uma grande quantidade de elementos não acessados, mas armazenados.



	1	2	3	4	5	6	7
1	0	10	15	13	inf	inf	inf
2	inf	0	inf	11	14	inf	inf
3	inf	inf	0	inf	inf	17	inf
4	inf	inf	16	0	inf	12	19
5	inf	inf	inf	10	0	inf	15
6	inf	inf	inf	inf	inf	0	inf
7	inf	inf	inf	inf	inf	18	0

Matriz de Adjacência

Figura 9 - Matriz de adjacência modificada (matriz de custos)

1.2.2 Lista de adjacência

Visando minimizar o desperdício de espaço de memória decorrente do uso de matrizes em grafos esparsos e mantendo certa facilidade no acesso e atualização dos dados, a estrutura de dados listas de adjacência foi desenvolvida.

Essa representação computacional de grafos ilustrada pela Figura 10 é composta por n listas encadeadas, uma para cada nó. Todos os arcos adjacentes (provenientes de um nó-origem) são ligados. Desse modo, cada arco de um determinado nó requer três campos: um para o nó destino da aresta, outro para o peso do arco e um para o ponteiro para o próximo arco na lista (proveniente do mesmo nó-origem). Compondo o restante da estrutura, há ainda um vetor com n ponteiros que apontam para o início da lista encadeada (chamada lista de adjacência) com o objetivo de garantir o acesso aleatório a um nó e, conseqüentemente, a todos os seus sucessores imediatos.

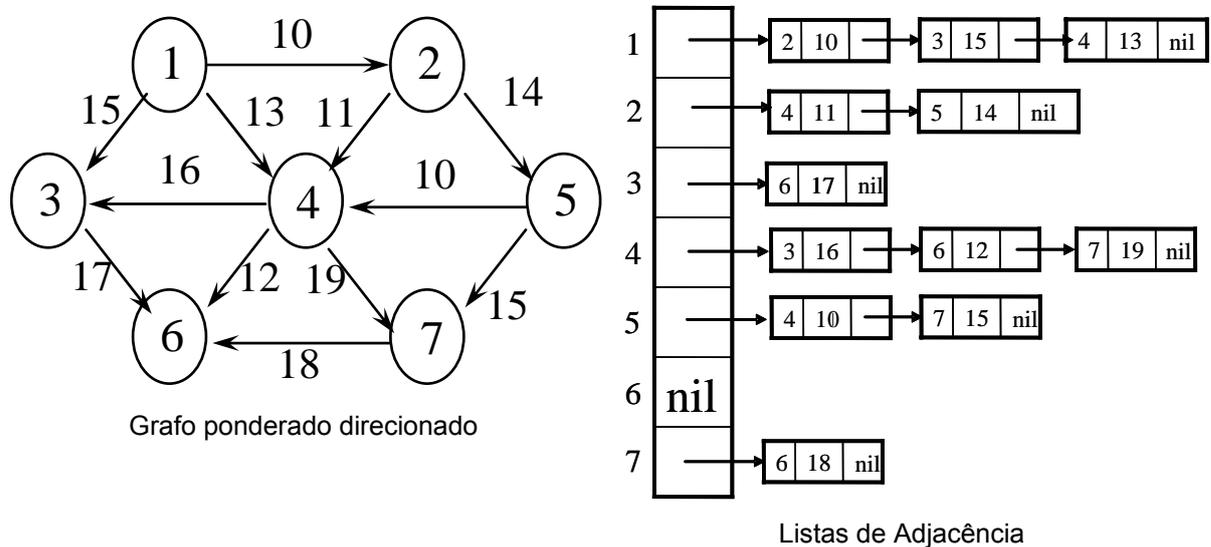


Figura 10 - Listas de adjacência

1.2.3 Comparação das representações de grafos

Para uma melhor escolha da estrutura de representação, um entendimento sobre a relação tempo/espaço utilizada nas operações básicas em grafos é muito importante.

- Comparação do espaço:

Em situações onde se trabalha com grafos esparsos, o espaço de memória para armazenamento utilizando listas de adjacência é $O(n)$. Já com o uso de matriz de adjacência o espaço requerido é $O(n^2)$.

Preiss (2001) concluiu que, as listas de adjacência consomem menos espaço que as matrizes quando:

$$m < \frac{n^2 - 2n}{2}$$

Exemplificando, caso se tenha um grafo com 20 pontos, é consumido menos espaço usando listas de adjacência até existirem no grafo menos de 180 arestas.

- Comparação do tempo:

Em Preiss (2001), a Tabela 1 procura fazer um comparativo entre dois esquemas de representação, matriz e lista de adjacência, sob a ótica do tempo de processamento para execução de quatro operações que são muito utilizadas em implementações de vários algoritmos para grafos. Dados os vértices v e w , e $T(v)$ como o tamanho da lista de adjacência do vértice v , temos:

Operação	Matriz de Adjacência	Lista de Adjacência
Encontrar aresta (v, w)	$O(1)$	$O(T(v))$
Enumerar todas as arestas	$O(n^2)$	$O(n + m)$
Enumerar arestas que saem de v	$O(n)$	$O(T(v))$
Enumerar arestas que chegam a w	$O(n)$	$O(n + m)$

Tabela 1 - Comparação, quanto a complexidade de tempo, das representações de grafos

1.3 Problemas de menor caminho (PMC)

São os problemas mais comumente encontrados no estudo das redes de comunicação e transporte. Por ser uma rotina sempre presente em trabalhos na área de engenharia de transporte, a solução desse problema é um componente essencial para o desenvolvimento desse trabalho.

A expressão “menor caminho” pode ser interpretada, dentre outras maneiras, como: caminho mais rápido, ou caminho mais econômico, ou caminho com menor consumo de combustível.

Existem muitos tipos de problemas de menor caminho que buscam, algumas vezes, não apenas o menor, mas o segundo e terceiro menores caminhos. O objetivo do problema varia de acordo com o interesse do tomador de decisão:

- Encontrar o menor caminho de um determinado nó (origem) na rede para um outro nó específico (destino), tendo como opção passar por determinados nós intermediários ou não;
- Determinar o menor caminho entre dois pontos que passa pela menor quantidade de arestas ou arcos;
- Determinar os menores caminhos de um nó-origem para todos os outros nós;
- Calcular os menores caminhos entre todos os pares de nós no grafo.

Devido a essa variedade de tipos de PMC, não se pode afirmar que há um único melhor algoritmo para todas as categorias do problema, ou seja, não existe aquele algoritmo que apresente o mesmo comportamento prático independentemente da estrutura do grafo, de seu tamanho e da medida de custo usada para avaliar o caminho (CHERKASSKY, GOLDBERG e RADZIK, 1996). Pesquisas têm guiado no sentido da implementação de procedimentos “*ad hoc*” de menor caminho, que busquem tirar eficiência das peculiaridades do tipo de problema a ser considerado.

Dentre os algoritmos de menor caminho existem muitas variações que buscam atingir uma melhor performance computacional. Uma visão geral desses algoritmos pode ser encontrada em Deo e Pang (1984), Gallo e Pallotino (1986, 1988), Evans e Minieka (1992), Cherkassky et al. (1996) e Pallotino e Scutellà (1998).

Os algoritmos que solucionam os problemas de menor caminho a partir de uma única origem diferem de acordo com as regras escolhidas para selecionar os nós rotulados para exploração e nas estruturas de dados adotadas para controlar o conjunto de nós rotulados (PALLOTTINO e SCUTELLÀ, 1998). Os algoritmos de definição de rótulos (*label setting method*) sempre selecionam o nó temporário com a menor distância.

1.3.1 Algoritmo de Dijkstra

O primeiro algoritmo utilizando como regra de seleção do nó temporário aquele com menor distância foi apresentado por Dijkstra (1959) e proveu a base para a maioria dos algoritmos de menor caminho eficientes conhecidos. Ele busca o menor caminho de um nó-origem s até o nó-destino t (ou até todos os outros nós) em um grafo conexo com todas suas arestas com pesos positivos. É utilizado o método de definição de rótulos (*label setting method*), onde um nó v é rotulado com sua distância de s . Uma vez que se conheça a menor distância possível de s (para v), o rótulo do nó v é dito permanente, caso contrário, é dito como temporário.

Os passos que compõem o algoritmo de Dijkstra podem ser declarados a seguir e visualizados em pseudocódigo (SYSLO, 1983) na Figura 11:

Entrada: Grafo $G = (V, A)$ na forma de uma matriz de pesos M ; nó-origem s ; nó-destino t .

Saída: Distância entre os nós s e t .

Passo1: Inicialmente, todos os nós são rotulados com seu *status* temporário, e sua distância igual a ∞ (pois os nós ainda não foram alcançados).

$\text{distNo}(v) = \infty;$ $\text{statusNo}(v) = \text{temporário};$
--

Com exceção do nó s :

$\text{distNo}(s) = 0;$ $\text{statusNo}(s) = \text{permanente};$

É utilizada uma variável auxiliar *atualNo* para armazenar o último nó rotulado como permanente.

Passo2: Como pode ser mostrado no cálculo a seguir, para todo sucessor imediato v de *atualNo* e que tenha rótulo temporário, $\text{statusNo}(v) = \text{temporario}$, é

recalculado o valor $distNo(v)$ de cada nó, pois pode haver um caminho menor, passando por $atualNo$, do que aquele que havia antes do $atualNo$ ser rotulado como permanente:

$$distNo(v) = \min\{distNo(v), distNo(atualNo) + M(atualNo, v)\}$$

Passo3: Dentre todos os nós com rótulo temporário, será escolhido aquele com menor distância, nó y , e será rotulado como permanente. À variável $atualNo$ é atribuído esse novo nó permanente.

Passo 4: Se o nó-destino ainda é temporário, repita o passo 2, caso contrário, o menor caminho de s a t foi encontrado.

INICIALIZAÇÃO:	
Para todo $v \in V$ faça Início $\text{distNo}(v) = \infty;$ $\text{statusNo}(v) = \text{temporário};$ fim $\text{distNo}(s) = 0;$ $\text{statusNo}(s) = \text{permanente};$ $\text{atualNo} = s;$	PASSO 1
ITERAÇÃO:	
Enquanto $\text{statusNo}(t) = \text{temporario}$ faça	PASSO 4
Início Para todo sucessor imediato v de atualNo com $\text{statusNo}(v) = \text{temporario}$ faça Início //atualiza rótulos temporários $\text{novoRotulo} = \text{distNo}(\text{atualNo}) + M(\text{atualNo}, v)$ Se $\text{novoRotulo} < \text{distNo}(v)$ então $\text{distNo}(v) = \text{novoRotulo};$ fim	PASSO 2
Encontrar y , sendo este, o nó com o menor rótulo temporário, $\text{distNo}(y) \neq \infty$. $\text{statusNo}(y) = \text{permanente};$ $\text{atualNo} = y;$ fim	PASSO 3

Figura 11 - Algoritmo de menor caminho de Dijkstra

Uma questão importante na implementação do algoritmo de Dijkstra está em como minimizar o “gargalo” do algoritmo (passo 3 da Figura 11) que é obter o menor rótulo temporário. A maioria dos melhoramentos computacionais origina de melhorias nas estruturas de dados utilizadas nesse passo.

Acerca dessa questão, a versão mais simples implementada adota uma lista encadeada desordenada e é executada em $O(n^2)$. Outras versões do algoritmo de Dijkstra são consideradas como: o algoritmo *S-heap* (JOHNSON, 1972), que utiliza a

estrutura de dados *heap* binária com tempo de execução no pior caso de $O(m \log n)$, e o algoritmo S-bucket (DIAL, 1969; DENARDO e FOX, 1979), que utiliza *buckets* e possui tempo $O(m + nc_{max})$, onde c_{max} representa o peso (distância) do maior arco. Ahuja et al. (1990) utilizaram uma combinação das estruturas *Fibonacci heap* e *radix heap* conseguindo tempo de $O(m + n(\log c_{max})^{1/2})$ e Fredman e Tarjan (1987) com o uso de *Fibonacci heap* atingiram a complexidade de tempo $O(m + n \log n)$ no pior caso.

Cherkassky et al. (1996) desenvolveram outras implementações utilizando *buckets* e obtiveram a complexidade $O(m + n(\beta + c_{max}/\beta))$ com o uso de *double buckets*, e $O(m\beta + n(\beta + c_{max}/\beta))$, uma variação de S-bucket, através de *buckets* aproximados, onde β é um parâmetro de entrada fixado.

A maioria dos testes computacionais relacionados aos algoritmos de menor caminho tem sido baseada em redes viárias geradas aleatoriamente (GLOVER et al., 1985; DIVOKY e HUNG, 1990; CHERKASSKY et al., 1996; MISHRA, 2005), ou seja, podem não possuir características de redes reais. Algumas diferenças, como grau de conectividade (razão arco/nó) e tamanho dos arcos, podem existir entre essas duas redes favorecendo certos algoritmos em detrimento a outros.

Zhan e Noon (1998) procuraram prover uma direção mais clara nesse sentido identificando um conjunto de algoritmos que executam mais rápido o cálculo de PMC sob várias configurações de grafos representando redes viárias reais. Eles utilizaram para os testes computacionais o código fonte em linguagem C provido por Cherkassky et al. (1996) e recomendaram implementações de acordo com algumas situações.

A discussão sobre algoritmos de correção de rótulos (*label correcting method*) não será tratada nesse trabalho por serem mais indicadas quando existirem tanto pesos negativos como positivos e na resolução de problemas de menor caminho a partir de uma única origem para todos os nós do grafo. No entanto, vale ressaltar o algoritmo L-queue creditado a Ford (1956), Bellman (1958) e Moore (1959) com complexidade de tempo $O(mn)$. Como Evans e Minieka (1992) e Pallottino e Scutellà (1998) comentam, outros algoritmos também foram propostos, como o de partição de Glover et al. (1985) e o de ordenamento topológico de Goldberg e Radzik (1993). Algoritmos para determinar o menor caminho entre todos os pares de nós foram apresentados por Floyd (1962) e Dantzig (1967).

Capítulo 2 - Sistemas de Informações Geográficas

A disponibilidade de mapas *on-line* é caracterizada basicamente por permitir a visualização de informações geográficas, via *browser*, utilizando a Internet como meio de comunicação. Além disto, pode permitir dentre outras ações, a realização de pesquisas, seleções diretas ou por parâmetros predefinidos, cálculo de distâncias euclidianas ou reais e impressão de mapas.

Nessa linha, as pessoas que necessitam manipular informações georeferenciadas e que não estão fisicamente em seu local de trabalho podem usufruir da veiculação de dados geográficos na *web* e minimizar os esforços em busca desta informação através do acesso por meio de *desktops* ou dispositivos móveis (tais como celulares e PDAs - *Personal Digital Assistant*).

Para isso, utilizou-se *Scalable Vector Graphics* (SVG) como forma de representar informações gráficas em um *browser web*, no caso, a construção do mapa viário de uma cidade, e como possibilidade de estabelecer uma interação com o usuário. Essa tecnologia é recomendada pelo *World Wide Web Consortium* (W3C) e é um formato aberto, não sendo propriedade de qualquer empresa.

No decorrer desse capítulo, procurar-se-á justificar a utilização do Sistema de Informações Geográficas (SIG) para a representação de dados de transporte. Será dissertada sua evolução e suas aplicações na área de transporte, abordando também, sua utilização na Internet, alicerçada em uma arquitetura cliente/servidor em 3-camadas.

Por conseguinte, buscar-se-á descrever a evolução do modelo de processamento cliente/servidor, além de comparar as características das aplicações em duas e três camadas. Por fim, contextualizar-se-á a arquitetura cliente/servidor sob a ótica dos sistemas *web*.

2.1 Scalable Vector Graphics (SVG)

Existem dois sistemas principais para representar informações gráficas em computadores: gráficos vetoriais (por exemplo, SVG, Flash) e gráficos por rastreio (por exemplo, PNG, GIF). O Quadro 1 resume algumas características que podem representar vantagens ou desvantagens de acordo com o fim almejado das informações (COWEN, 1988; ARONOFF, 1989; EISENBERG, 2002).

Formato Vetorial	Formato por Rastreio
São usados em programas CAD (<i>Computer Assisted Drafting</i>)	Mais apropriado para o uso em fotografias
Suporte dos <i>browsers web</i> por meio da instalação de <i>plug-ins</i>	Suporte nativo dos <i>browsers web</i>
Pode ser escalonado (<i>zoom in-out</i>) sem perda de qualidade da imagem	Pode ser escalonado com o uso de técnicas como detecção de arestas, mas essa técnica consome tempo e não garante a qualidade
Operação de sobreposição (<i>overlay</i>) é mais difícil de ser implementada	Operação de <i>overlay</i> é implementada mais eficientemente
Eficiência na representação e análise das relações topológicas	Tratamento mais adequado de imagens produzidas por satélites
Armazenamento por coordenadas	Armazenamento por matrizes
Facilita associar atributos no banco de dados aos elementos gráficos	Ferramentas para criação de imagens são, geralmente, mais fáceis de usar

Quadro 1 - Características dos formatos vetorial e por rastreio

Dentre as duas representações, os gráficos vetoriais são os mais adequados ao propósito do trabalho, sendo escolhido o SVG (*Scalable Vector Graphics*, gráficos vetoriais escaláveis), em detrimento aos demais formatos vetoriais, devido ao fato de ser um formato aberto, sendo propriedade de nenhuma empresa.

SVG é o modelo padrão recomendado pelo *World Wide Web Consortium* (W3C) para representar informações gráficas bidimensionais na *web* em uma forma compacta e portátil. Ele é baseado na linguagem XML (*eXtensible Markup Language*) e objetiva permitir aos desenvolvedores, *designers* e usuários da *web* irem além das limitações de HTML e criarem interatividade e conteúdo visual robusto por meio de um modelo de programação declarativa simples e de fácil manutenção e alteração. Um acompanhamento detalhado da história do SVG pode ser visto em SVG (2005).

Na Figura 12, tem-se o exemplo de uma estrutura básica de um documento SVG e sua respectiva imagem resultante:

<pre><?xml version="1.0" standalone="no"?> <!DOCTYPE svg PUBLIC "-//W3C//DTD SVG 1.0//EN" "http://www.w3.org/TR/2001/REC-SVG-20010904/DTD/svg10.dtd"> <svg width="100.0" height="100.0"> <text x="16.0" y="31.0"><tspan x="16.0" font-size="22" fill="#0033cc" font-family="Arial', 'Helvetica', sans-serif" dy="12.0" xml:space="preserve"> </tspan><tspan fill="#0000ff" xml:space="preserve" font-size="28" font-family="Arial', 'Helvetica', sans- serif">MIA</tspan></text> <text x="23.0" y="59.0"><tspan fill="#0099ff" xml:space="preserve">Mestrado </tspan><tspan fill="#0099ff" dy="12.0" x="23.0" xml:space="preserve">Informatica</tspan><tspan fill="#0099ff" dy="12.0" x="23.0" xml:space="preserve">Aplicada </tspan></text> </svg></pre>	
	Imagem SVG

Código SVG

Figura 12 - Código e imagem SVG

2.1.1 Características do SVG

Uma característica muito poderosa herdada pelo SVG, por ser baseado em XML, trata-se da possibilidade de utilizar o XML DOM (*Document Object Model*), API (*Application Program Interface*) padrão para acessar e modificar elementos em um documento XML, para alterar dinamicamente e interativamente uma imagem SVG por meio de uma linguagem *script* (tal como *JavaScript*). Por exemplo, considere uma imagem SVG que está embutida em uma página *web*. Um desenvolvedor pode então controlar tanto um objeto da página *web* quanto um elemento gráfico presente

na imagem SVG de dentro de um mesmo código *script*. Mas além dessa característica, o SVG também proporciona (EISENBERG, 2002; MARISCO et al., 2004):

- Diferentes tipos de transformações (translação, rotação e escala) em diversas plataformas e dispositivos sem perda de qualidade;
- Independência de plataforma e dispositivo;
- Definição dos elementos geométricos: linhas retas (*polyline*), curvas, polígonos, linhas, círculos e elipses;
- Possibilidade dos objetos serem recortados (*clipping*), mascarados (*masking*) e compostos;
- Possibilidade dos objetos serem coloridos, preenchidos, transparentes, marcados, e que vários tipos de traços possam ser definidos (*stroke-types*);
- Que diferentes símbolos e textos possam ser construídos e utilizados;
- Possibilidade de animação;
- O uso de folhas de estilos que podem ser definidas tanto internamente quanto externamente ao SVG;
- Possibilidade de integração às tecnologias da *web* atuais, como HTML, GIF, JPEG, PNG, SMIL (*Synchronized Multimedia Integration Language*), ASP.Net, JSP e *JavaScript*;
- Associação de manipuladores de eventos, tais como “*onclick*” e “*onmouseover*” aos elementos de uma imagem SVG. Com a interatividade proporcionada por esses manipuladores pode-se, dentre outras ações, destacar uma característica selecionada ou mostrar informações de um atributo.

Esses recursos disponibilizados pelo SVG para a formação dos mapas na *web* são de fundamental importância para o processo de comunicação e exploração dos dados geoespaciais armazenados em bancos de dados.

2.1.2 Aplicações e suporte ao SVG

SVG tem sido aplicado em muitas áreas de negócios incluindo: gráficos *web*, aplicações móveis, interfaces com o usuário, animações, SIGs, impressões e trocas

de informações entre aplicações gráficas com a importação e exportação de documentos SVG.

Grandes empresas atuantes em muitas dessas áreas têm oferecido suporte e participado do processo de especificação do SVG, dentre elas, pode-se destacar: Adobe, Apple, Canon, Corel, Ericsson, HP, IBM, Kodak, Macromedia, Microsoft, Nokia, Sharp e Sun Microsystems.

Atualmente, a instalação de um *plug-in* é necessária para a visualização de uma imagem SVG em qualquer *browser web*. Existem vários *plug-ins* disponíveis gratuitamente na rede, para diversos sistemas operacionais (Windows, Mac, Linux e Solaris), sendo o fornecido pela Adobe o mais popular. O *plug-in* SVG Viewer da Adobe, implantado com o *software* Adobe Reader ou separadamente, habilita o processamento de arquivos SVG, juntamente com a possibilidade de implementar interatividade através do *JavaScript* no navegador.

2.1.3 Compactar arquivos SVG

O tamanho dos arquivos SVG utilizados para a representação gráfica de informações geográficas, geralmente, é grande o bastante para tornar necessário sua compactação com o objetivo de reduzir a carga sobre a largura de banda disponível na transmissão para o *browser* do cliente.

Esforços têm sido realizados para tornar o tamanho do arquivo tão pequeno quanto possível de uma maneira que mantenha os recursos presentes do documento SVG original, usando o processamento das plataformas dos clientes para a execução do processamento gráfico. Os arquivos SVG comprimidos são entre 50 a 80 por cento menores que a sua versão não comprimida.

Os dados transferidos do servidor para o cliente podem ser comprimidos usando a compressão gzip (GNU zip). A extensão de um arquivo SVG não comprimido, que era “.svg”, passa para “.svgz”. O Adobe SVG Viewer descomprime os arquivos “.svgz” automaticamente com nenhuma diferença significativa na performance.

2.2 Sistemas de Informações Geográficas

O crescimento populacional e o conseqüente aumento da demanda por transportes têm exigido, tanto do setor público quanto do privado, decisões mais

eficazes no aspecto operacional e, principalmente, financeiro, nessa área. Os objetivos, de certa forma, conflitantes, de reduzir custos e de melhorar a qualidade do serviço de transporte prestado exigem uma capacitação crescente dos técnicos e de melhores ferramentas para auxiliar o processo de planejamento. Esta necessidade de se utilizar ferramentas que auxiliem os tomadores de decisão atuantes nas áreas de planejamento urbano e de transportes tem levado a uma procura cada vez maior pelos Sistemas de Informação Geográfica (SIGs).

2.2.1 Histórico e evolução do SIG

O primeiro sistema a ter as características básicas de um SIG foi implementado no Canadá em 1963, denominado *Canadian Geographic Information Systems* (CGIS), e foi conduzido por Roger Tomlinson como parte de um plano estratégico governamental de longo prazo com o objetivo de criar um inventário automatizado de recursos naturais em âmbito nacional, envolvendo diferentes aspectos sócio-econômicos e ambientais.

Em 1965, Howard Fisher do *Northwestern Technology Institute* desenvolveu a primeira aplicação de cartografia computadorizada, concluída no *Harvard Lab*, o SYMAP (*Synagraphic Mapping System*).

Câmara et al. (1996), por meio do Quadro 2, formaliza a evolução tecnológica do SIG que foi possível devido ao aumento da capacidade de processamento e de memória dos computadores. E Câmara (2000) destaca tecnologias complementares que proporcionam uma diversificação na oferta de sistemas de informações geográficas atualmente.

	1ª Geração (1980-1990)	2ª Geração (1990-1997)	3ª Geração (1997-?)
Tecnologia	CAD, cartografia	Banco de dados, imagens	Sistemas distribuídos
Uso principal	Desenho de mapas	Análise espacial	Centro de dados
Ambiente	Projetos isolados	Cliente-servidor	Multi-servidores, www
Sistemas	Pacotes separados	<i>Software</i> integrado	Interoperabilidade

Quadro 2 - Evolução da tecnologia SIG

Um aprofundamento sobre a revisão histórica do desenvolvimento do SIG pode ser consultado em Dodge et al. (2005).

2.2.2 Conceitos básicos, componentes e funções do SIG

A definição precisa da tecnologia SIG é difícil de ser enunciada, tendo em vista que este sistema abrange conhecimentos multidisciplinares (cartografia, geografia, computação etc.), gerando uma multiplicidade de usos e visões possíveis. Além de ser usado em múltiplas áreas como: agricultura, saneamento, meio-ambiente e transportes. Devido a isso, existem muitas definições para SIG, onde podemos destacar:

- “Um conjunto manual ou computacional de procedimentos utilizados para armazenar e manipular dados georeferenciados” (ARONOFF, 1989);

- “Um SIG é uma coleção de *hardware* de computador, *software*, dado geográfico e pessoal projetado para eficientemente capturar, armazenar, atualizar, manipular, analisar e visualizar eficientemente todas as formas de informação geograficamente referenciada” (ESRI, 1990);

- “Conjunto de programas, equipamentos, metodologias, dados e pessoas (usuários), perfeitamente integrados, de forma a tornar possível a coleta, o armazenamento, o processamento e a análise de dados georeferenciados, bem como a produção de informação derivada de sua aplicação” (TEIXEIRA et al., 1995);

- “Sistemas automatizados usados para armazenar, analisar e manipular dados geográficos, ou seja, dados que representam objetos e fenômenos em que a localização geográfica é uma característica inerente à informação e indispensável para analisá-la” (CÂMARA et al., 1996);

- “Conjunto poderoso de ferramentas para coletar, armazenar, recuperar, transformar e visualizar dados sobre o mundo real” (BURROUGH, 1998).

A partir destes conceitos, é possível indicar as principais características dos SIGs (CÂMARA, 1994):

- Inserir e integrar, numa única base de dados, informações espaciais provenientes de dados cartográficos, censitários e de cadastro urbano e rural, imagens de satélite, redes e modelos numéricos de terreno (MNTs);

- Oferecer mecanismos para combinar as várias informações, através de algoritmos de manipulação e análise para gerar mapeamentos derivados;

- Consultar, recuperar, visualizar e desenhar saídas gráficas para o conteúdo da base de dados georeferenciados.

Segundo Harmon e Anderson (2003), o SIG é formado pelos seguintes componentes expostos em ordem decrescente de importância:

- Pessoas (os usuários do sistema);
- Aplicações (os processos e programas que os usuários usam para fazer seus trabalhos);
- Dados (as informações necessárias para suporte das aplicações);
- *Software* (o núcleo do *software* SIG);
- *Hardware* (os componentes físicos sobre os quais o sistema é executado).

A Figura 13 ilustra os componentes estruturais do SIG seguindo a hierarquia dos elementos:

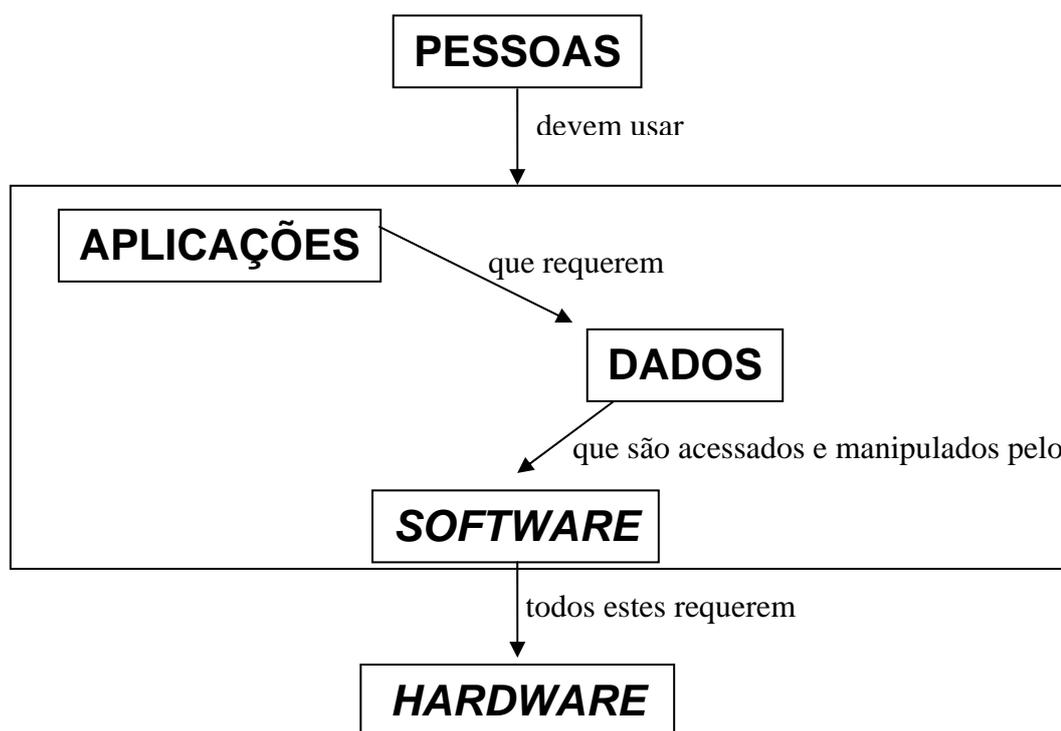


Figura 13 - Componentes de um SIG empresarial

2.2.3 Aplicações de SIG em transportes

A aplicação do SIG é observada em áreas como planejamento urbano, geografia, meio-ambiente, uso do solo, pesquisa operacional, engenharias, cartografia, arquitetura e urbanismo, transportes, entre outros. A ferramenta SIG adaptada e aplicada na análise e planejamento das questões relacionadas à Engenharia de Transportes é denominada de Sistemas de Informação Geográfica aplicados ao Transporte (SIG-T).

Segundo Langford e Lewis (1995), essa tecnologia foi aplicada mais efetivamente a partir de 1992/1993, onde, com a sua utilização, ficou mais fácil analisar a segmentação dinâmica (ou seja, ligar atributos lineares ou de pontos a uma rede) e a própria análise em rede (menor caminho, tráfego, alocação em rede e outros focos dados por algoritmos analíticos). Uma abordagem do estado da arte da aplicação de SIG-T é encontrada em Dantas et al. (1996).

Dentre os diversos trabalhos publicados sobre o emprego de SIG na área de transportes pode-se citar: localização de facilidades (DANTAS et al., 2002), planejamento de transportes (SANTOS e FERREIRA, 2004), roteirização de veículos

(PELIZARO, 2000; SARKIS, 2000), alocação de recursos (DINIZ, 2000; RIBEIRO, 2002), localização de pontos de parada de ônibus (TESIMA e LAPOLLI, 1996). No tema referente à implantação e utilização racional de equipamentos coletivos públicos, tais como escolas e postos de saúde, cita-se Lima (2003).

As principais vantagens do uso dos SIGs em conjunto com modelos de transportes é apresentado por Kagan et al. (1992):

- A integridade dos dados propiciada pelo SIG onde, se também integrado aos modelos, permite a maior transparência dos aspectos físicos dos dados para o usuário;

- Operações pré-incorporadas aos SIGs eliminam ou simplificam tarefas normalmente realizadas por processos manuais ou em módulos computacionais isolados;

- Facilidade de edição e representação gráfica;

- Tratamento topológico que facilita operações de edição da base geográfica;

- Menor custo no armazenamento e edição de informações;

- Realização de certos tipos de análises e representações, como a verificação de caminhos mínimos, outrora, praticamente inviáveis através dos processos tradicionais.

2.2.4 SIG na Internet

Dentre as novas mídias emergentes, a Internet passou a ser um excelente meio veiculador e disseminador de informações, inclusive para prover acesso a bases de dados geográficas, por meio do uso de mapas *web* interativos e/ou dinâmicos (MARISCO, 2004).

A usabilidade intuitiva e simples de interfaces de usuários em navegadores *web* simplifica a tarefa de planejamento e análise na área de transportes. Deve-se, entretanto, não perder de vista as reais limitações impostas pelo meio, como tamanho do arquivo a ser transferido e a área de apresentação.

Chang (1997) fez uma revisão literária da tecnologia SIG baseada na *web* e categorizou-as em cinco formas:

- Gráfico instantâneo de mapas pré-gerados;

- Bibliotecas e catálogos de banco de dados espaciais;
- Geradores de mapas;
- Pesquisas de mapas em tempo real;
- Mapas e imagens em tempo real.

Kleiner e Meneguette (2002) citam a última tecnologia categorizada por Chang (1997) ao se referirem à manutenção da base de dados, que deve começar imediatamente após esta ter sido criada e de uma maneira continuada, para evitar a desatualização dos dados. Com a disponibilidade dos dados geográficos pela Internet, um número maior de usuários pode acessar a base, tornando possível a implantação de mecanismos de *feedback* com estes usuários, por exemplo, e-mails, onde se poderá relatar erros encontrados, necessidades de atualizações (mudanças ocorridas) e sugestões.

Pode-se citar as principais vantagens do uso de SIG na internet como: a minimização do investimento em *software* e *hardware*, pois nenhum *software* precisa ser instalado no cliente, sendo necessário apenas um navegador *web*; e a independência de plataforma, ou seja, arquiteturas de *hardware* e *software* utilizadas nos clientes não precisam ser levadas em consideração. A desvantagem mais relevante se refere à necessidade de uso de banda larga.

Destacam-se como ferramentas de integração da Internet com SIG: ALOV Map (ALOV Software), SpringWeb (INPE / DPI) e Oracle MapViewer. Além destas, ESRI (*Environmental Systems Research Institute*), uma das maiores empresas na área de *software* e tecnologia para SIG, possui dois *softwares* voltados ao ambiente *web*: MapObjects *Internet Map Server* (IMS) e ArcIMS (conhecido até junho de 2004 por ArcView IMS). O ArcIMS disponibiliza informação em formato *raster* utilizando uma arquitetura cliente-servidor.

Uma das aplicações de SIG, via Internet, está presente na área de transporte. A Figura 14 mostra esse tipo de aplicação implementada nesse trabalho, onde é mostrada a malha viária de Fortaleza construída utilizando SVG para que o usuário possa interagir selecionando trechos de vias.

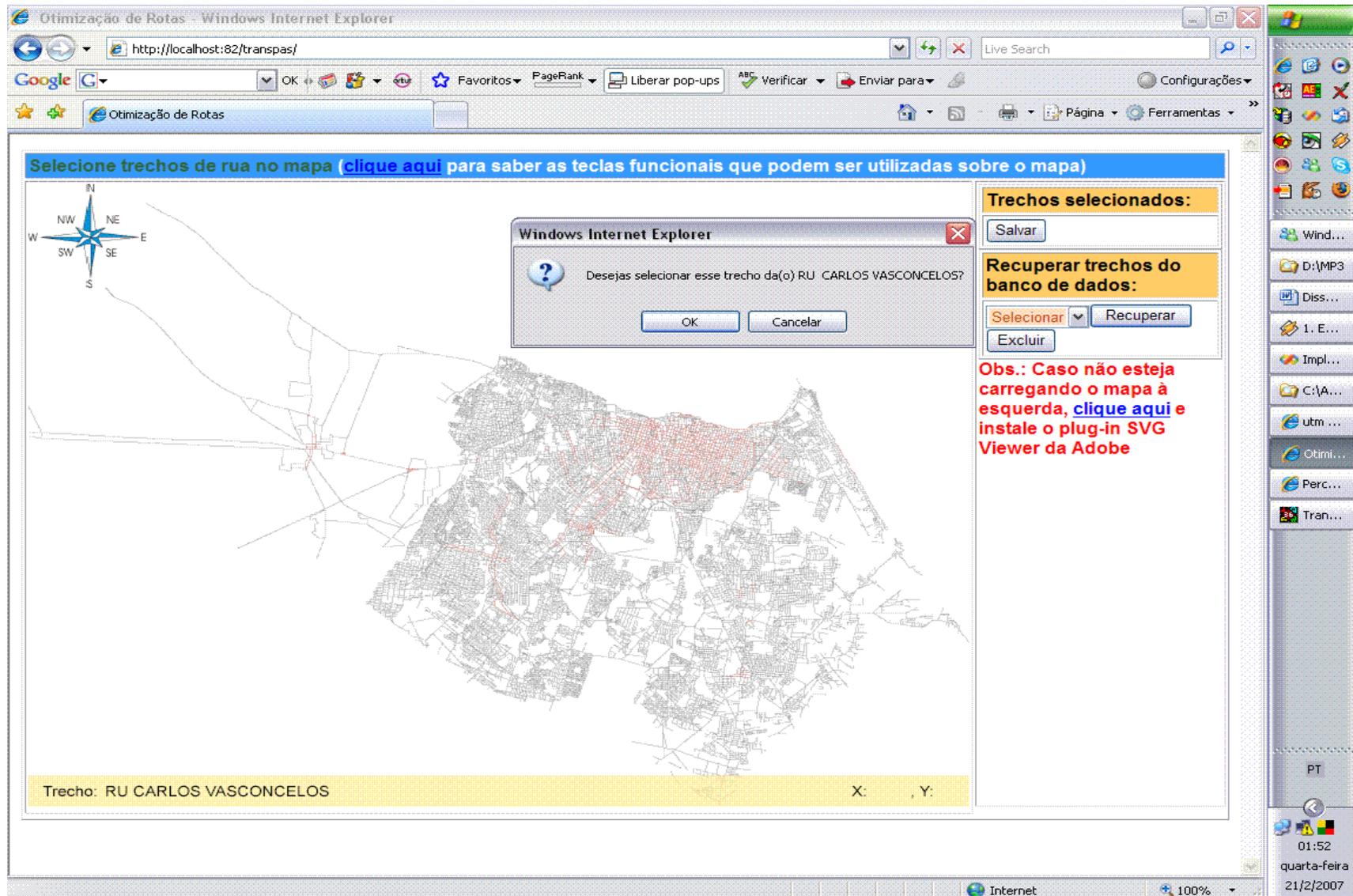


Figura 14 - Malha viária de Fortaleza construída utilizando SVG

2.3 Arquitetura cliente/servidor

Atualmente, o modelo de processamento cliente/servidor é uma das abordagens mais utilizadas na computação em ambientes corporativos, possibilitando às pessoas compartilharem recursos distribuídos como informações, periféricos, serviços e aplicações.

Segundo Sadoski (1997), a expressão cliente/servidor surgiu pela primeira vez nos anos 80 referenciando os computadores pessoais conectados em rede. O modelo atual desse sistema começou a adquirir maior aceitação no final dos anos 80. A arquitetura cliente/servidor é um modelo distribuído de computação, idealizado, de certa forma, para substituir o modelo computacional centralizado.

A estrutura centralizada, além de ser muito cara, é muito rígida. Sendo constituída por um *mainframe*, onde ocorre a maior parte do processamento, e por vários terminais, ditos “burros” por serem limitados apenas à solicitação e à exibição de dados, conectados a ele. Já nos modelos cliente/servidor, os computadores rodando os programas clientes não se limitam à mera exibição de dados na tela, mas participam do processamento destes.

As unidades funcionais que compõem uma aplicação cliente/servidor estão associadas a um cliente e a um ou mais servidores. As unidades funcionais mais comuns são: a interface do usuário, as regras de negócio e os dados a serem manipulados. Existem muitas variações possíveis de arquiteturas multi-camadas dependendo de como é dividida a aplicação e o *middleware* (*software* designado para realizar a comunicação entre as camadas).

A aplicação cliente fornece a interface de usuário e solicita informações que estão contidas no servidor. O servidor mantém os bancos de dados e processa solicitações do cliente para extrair ou atualizar dados (FREEDMAN, 1995).

De acordo com Bochenski (1995) e Orfali et al. (1999), as principais características dos sistemas cliente/servidor são:

- Consiste em um processo cliente e outro servidor, que podem ser distinguidos um do outro, embora possam interagir totalmente. A função do servidor é prover serviços e a do cliente é consumi-los;

- Um servidor pode atender a vários clientes simultaneamente, regulando seus acessos para compartilhar recursos, e os clientes podem acessar vários servidores;
- Há uma transparência de localização já que um processo no servidor pode residir sob a mesma máquina do cliente ou sob uma máquina diferente na rede;
- A parte do cliente e as partes do servidor podem operar em diferentes plataformas de computador, ou seja, independente de *hardware* e sistema operacional;
- Tanto a plataforma do cliente quanto a do servidor podem ser atualizadas sem a obrigatoriedade de atualizar a outra plataforma.

Os benefícios de um sistema cliente-servidor incluem sistemas mais fáceis de usar, maior produtividade do usuário e do desenvolvedor, custos menores e maior disponibilidade de acesso aos dados.

2.3.1 Sistema cliente/servidor em 2-camadas

Nos sistemas cliente/servidor em 2-camadas (Figura 15), a lógica da aplicação está presente ou na interface do usuário (cliente) ou no banco de dados (servidor), ou em ambos. Exemplos desses sistemas são os servidores de arquivos e os de banco de dados com *stored procedures* e *triggers*.

Trata-se de uma boa solução quando a manutenção no sistema não é freqüente e o número de clientes interagindo simultaneamente no sistema está na ordem de dezenas ou centenas. Excedendo esse quantitativo, o desempenho tende a deteriorar. Esta limitação é originada pela manutenção da conexão, pelo servidor, com cada cliente, mesmo quando não há requisições.

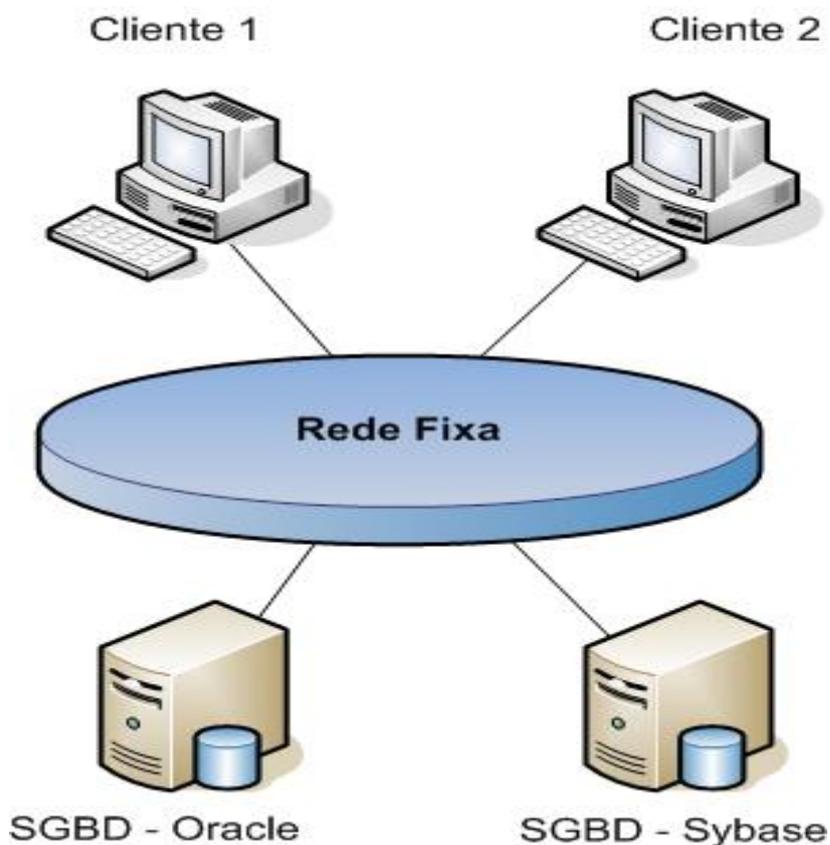


Figura 15 - Arquitetura cliente/servidor 2-camadas

2.3.2 Sistema cliente/servidor em 3-camadas

A arquitetura cliente-servidor em 3-camadas (Figura 16) surgiu para suprir as limitações da arquitetura em 2-camadas. Com este propósito, uma camada intermediária (servidor de aplicação) foi adicionada entre o cliente (interface do usuário) e o servidor (de dados). Não, necessariamente, há um computador designado para cada camada, as partes correspondentes aos servidores da aplicação e dos dados podem residir na mesma máquina. O principal exemplo de adoção desse sistema são as aplicações na Internet.

2.3.3 2-camadas versus 3-camadas

No Quadro 3 é apresentado algumas comparações entre as características das aplicações com 2-camadas e 3-camadas segundo Orfali et al. (1999):

	2-camadas	3-camadas
Administração do sistema	Complexo	Menos complexo
Segurança	Baixa	Alta
Encapsulamento dos dados	Baixa (tabelas de dados estão expostas)	Alta (o cliente invoca serviços ou métodos)
Reuso da aplicação	Pobre	Excelente
Suporte à internet	Pobre	Excelente
Suporte aos BD heterogêneos	Não	Sim
Flexibilidade na arquitetura de hardware	Limitado (tem-se um cliente e um servidor)	Excelente (todas as três camadas podem residir em computadores diferentes)

Quadro 3 - 2-camadas versus 3-camadas

2.3.4 Sistema cliente/servidor e a Internet

Como boa parte das aplicações na internet é baseada na arquitetura cliente/servidor, o potencial de desenvolvimento de serviços é extrapolado, já que podem ser acessados por diversas máquinas em qualquer ponto do globo terrestre.

Nos sistemas cliente/servidor aplicados na *web*, o cliente, por meio do *browser*, realiza uma requisição ao servidor *web*, o qual é detentor da lógica do negócio. Este aciona o servidor de BD para obter os dados solicitados pelo cliente, processa-os e encaminha o resultado ao cliente (arquivos HTML, GIF, ...). Esse tipo de funcionamento é bastante interessante, já que não é necessário manter uma conexão permanente entre o cliente e o servidor. Toda a comunicação é controlada por pedidos de conexão e respostas a esses pedidos.

O protocolo de comunicação entre o servidor de aplicações e o cliente é o protocolo HTTP (*HyperText Transfer Protocol* – Protocolo de Transferência de Hipertexto), padrão na Internet para transferências de páginas entre servidores e *browsers*. O HTTP é um protocolo do nível de aplicação que implementa conceitos de orientação a objetos genéricos.

A Figura 16 procura representar essa arquitetura em 3-camadas na *web*:

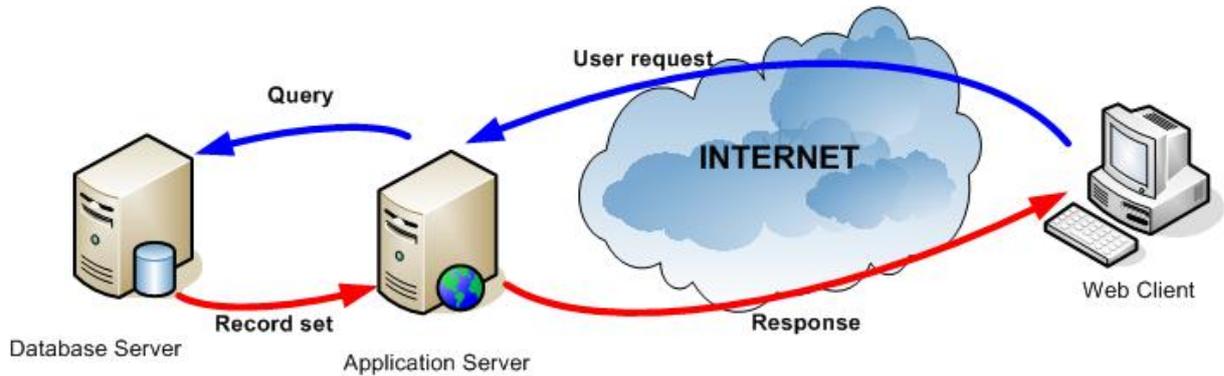


Figura 16 - Arquitetura cliente-servidor 3-camadas

Capítulo 3 – Problema de Transporte sob Regime de Fretamento

A visão econômica, seja do empresário ou do gestor público, é a minimização dos custos originários do desenvolvimento de sua atividade fim, apesar dessas entidades terem objetivos antagônicos quanto ao destino dado aos recursos provenientes dessa economia. Enquanto o primeiro almeja o aumento do lucro ou a aplicação dessa “sobra”, em outros setores componentes da empresa, o qual lhe gerarão mais dividendos, o segundo objetiva o remanejamento para áreas mais necessitadas de acordo com o interesse público.

Este desejo de diminuir gastos, que guiam as empresas e o Estado, não poderia deixar de ser aplicado ao setor de transporte, mais especificamente, na área correspondente à condução de pessoas, previamente definidas, até o destino desejado. Adotando o regime de fretamento contínuo para o transporte, a entidade interessada contrata empresas terceirizadas prestadoras desse serviço visando, além da economia, proporcionar segurança e comodidade a essas pessoas durante o trajeto ao destino final, como também no retorno. Problemas com essas características são conhecidos na literatura como Problemas de Localização e Roteamento (PLR).

Este capítulo tem como objetivos:

- Relatar as características que envolvem o regime de fretamento contínuo dentro de uma abordagem relacionada ao problema de localização e roteamento;
- Citar e descrever os algoritmos aproximativos implementados e utilizados na solução do PLR;
- Expor estratégias de resolução do problema visando o menor custo para a empresa, privada ou pública, e a melhor qualidade no transporte para os passageiros.

3.1 Fretamento de passageiros

No Brasil, o transporte de passageiros por fretamento, de acordo com as características atualmente apresentadas, surgiu no final dos anos 50 durante o processo de industrialização, especialmente, na região compreendida pelo ABC paulista. Por estarem distantes dos centros urbanos, fábricas passaram a apresentar uma série de problemas que precisavam ser contornados.

Devido às indústrias ficarem instaladas em locais relativamente distantes, além de conterem contingentes numerosos de empregados trabalhando em vários turnos e horários; e ainda, o sistema de transporte público ser insuficiente para atender demandas concentradas situadas em pontos distantes e em horários adversos, gerou-se uma oportunidade mercadológica, onde empreendimentos começaram a surgir vislumbrando ganhos com a necessidade das fábricas oferecerem serviços de transporte aos seus funcionários.

Hoje, o serviço de transporte coletivo de passageiros sob o regime de fretamento está presente em todo o país, nos mais diversos segmentos, e é destinado à condução de um grupo específico de pessoas, com contrato estabelecido, sem cobrança individual de passagens, não tendo caráter de serviço aberto ao público. De acordo com a resolução ANTT nº. 16, de 23/05/2002, a qual aprovou o glossário de termos e dos conceitos utilizados na regulamentação da prestação dos serviços de transporte rodoviário de passageiros, este serviço é dividido em duas modalidades conceituadas a seguir:

- Fretamento contínuo: serviço prestado a pessoas jurídicas para o transporte de seus empregados, bem como a instituições de ensino ou agremiações estudantis para o transporte de seus alunos, professores ou associados, estas últimas desde que legalmente constituídas, com prazo de duração máximo de doze meses e quantidade de viagens estabelecidas, com contrato escrito entre a transportadora e seu cliente, previamente analisado e autorizado pela Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT;

- Fretamento eventual ou turístico: serviço prestado à pessoa ou a um grupo de pessoas, em circuito fechado, com emissão de nota fiscal e lista de pessoas transportadas, por viagem, com prévia autorização ou licença da ANTT ou órgão com ela conveniado.

O valor a ser cobrado pelas empresas que prestam o serviço, de acordo com o Cadterc (2005), varia conforme:

- O tipo de veículo: ônibus ou micro ônibus tipo *van*;
- A capacidade do veículo;
- O horário da prestação do serviço: comercial, diurno ou diuturno;
- A modalidade de cobrança: quilômetro rodado ou preço fixo por veículo;
- Os dias da semana que o serviço é prestado: segunda a sexta ou diário.

O problema para transportar um grupo de pessoas distribuídas espacialmente em uma região, sob o regime de fretamento contínuo, das suas residências ou pontos de coleta, ao seu destino, e vice-versa, envolve dois ou três problemas que estão inter-relacionados:

- Problema para determinar os pontos de parada de ônibus (caso os pontos de coleta já estejam pré-definidos, não há a necessidade de solucioná-lo);
- Problema para alocar os passageiros aos pontos de parada determinados (ou pré-determinados);
- Problema em obter uma série de rotas de veículos que visitem as paradas, de modo a assegurar que o serviço seja provido satisfatoriamente.

Problemas com estas características são conhecidos na literatura como Problemas de Localização e Roteamento (PLRs) e são discutidos em Laporte (1988).

Laporte (1988) relata que os problemas de localização e roteamento fazem parte da classe de problemas NP-*hard*, por conseguinte, grandes problemas não podem ser solucionados por meios exatos em uma quantidade razoável de tempo. Como não existem algoritmos em tempo polinomial para a solução de problemas NP-*hard*, técnicas heurísticas foram adotadas a fim de gerar soluções para os PLRs seguindo os seguintes critérios de otimização:

- Minimizar o número de rotas e/ou a distância percorrida por cada uma delas;
- Balancear o número de passageiros transportados ao longo de cada rota, respeitando a capacidade dos veículos;

- Estabelecer os locais dos pontos de parada dos veículos, aos quais as pessoas são alocadas, de modo que minimize a distância que devem percorrer a partir de suas residências.

Usualmente, procura-se medir a qualidade das soluções em termos do número total de veículos utilizados e da distância total percorrida. É quase sempre possível reduzir a distância total percorrida aumentando o número total de veículos e vice-versa. O problema consiste em estabelecer um ponto de equilíbrio entre esses dois fatores de custo.

Almejando os critérios de otimização acima e respeitando as características do problema, as heurísticas utilizadas na implementação e descritas abaixo foram moldadas garantindo a adequação do problema de transporte às reais imposições cotidianas.

3.2 Heurísticas implementadas

Comumente, a avaliação de qualquer método heurístico está sujeito à comparação de certo número de critérios, os quais revelam vários aspectos do desempenho algorítmico. Exemplos de tais critérios são: tempo de execução (velocidade), qualidade da solução (em relação ao valor da função objetivo), facilidade de implementação (simplicidade), robustez (capacidade de o algoritmo apresentar resultados, mesmo em circunstâncias onde a instância do problema é patológica) e flexibilidade (habilidade para acomodar as várias restrições encontradas na maioria das aplicações reais) (BARR et al., 1995; CORDEAU et al., 2002b).

Há geralmente um *trade-off* entre o tempo de execução e a qualidade da solução – quanto mais tempo uma heurística é executada mais próximo se está da solução ótima global. Um ajuste é necessário de modo que soluções com boa qualidade sejam produzidas em uma quantidade razoável de tempo.

Dentre os critérios adotados na escolha das diferentes técnicas heurísticas para a solução de problemas reais, destaca-se o tempo de resposta para gerar soluções com boa qualidade. Essa importância é justificada, pelo fato do ambiente de execução escolhido nesse trabalho ser um *browser*, acessando o servidor de aplicativos via internet. É sabido que a conexão do usuário a rede mundial de

computadores possui restrições quanto à velocidade de transmissão de dados e ao *time-out* de espera por respostas do servidor.

Cordeau et al. (2002b) apresentaram quatro atributos (precisão, velocidade, simplicidade e flexibilidade) que visam comparar heurísticas aplicadas na solução de problemas de roteamento de veículos. Estes quesitos podem também ser aplicados sobre as heurísticas que buscam solucionar o problema de localização e roteamento utilizando como meio a *web*. Os algoritmos aproximativos clássicos, por apresentarem um equilíbrio aceitável em relação aos quatro atributos citados para comparação, são os que mais se adequam ao ambiente no qual vai ser executado o problema.

As heurísticas apresentadas a seguir foram agrupadas de acordo com as etapas de solução para o problema de localização e roteamento aplicado ao transporte de passageiros sob regime de fretamento contínuo. As etapas são propostas pelas estratégias heurísticas que serão apresentadas posteriormente neste capítulo.

3.2.1 Formação dos agrupamentos (*clusters*) de passageiros

O propósito desta fase é realizar o agrupamento dos passageiros de modo que cada pessoa seja alocada a um *cluster* específico. Como cada agrupamento formado será servido por apenas uma rota, é necessário que o número de passageiros alocados em cada *cluster* não exceda a capacidade para pessoas sentadas do veículo.

Os objetivos relacionados à minimização do número de rotas e ao balanceamento, entre os ônibus, das pessoas a serem transportadas são alcançados nessa etapa; garantindo assim, um número mínimo de rotas a serem traçadas e a ausência de pessoas em pé durante o traslado ao local de destino.

Em conformidade com a limitação na capacidade dos ônibus, o número mínimo de agrupamentos, NA , que deve ser formado para o problema é:

$$NA = \left\lceil \frac{\text{número de passageiros}}{\text{capacidade do ônibus}} \right\rceil$$

onde o valor de NA é o menor inteiro maior ou igual à divisão entre o número de passageiros e a capacidade do ônibus. O número de *clusters* coincide com o número de veículos utilizados no problema, já que há a associação de um ônibus por agrupamento.

As heurísticas implementadas levam em consideração a proximidade das residências dos passageiros.

3.2.1.1 Algoritmos de Teitz e Bart e de Gillett e Johnson

Evans e Minieka (1992) descrevem algumas aplicações práticas que envolvem o problema de localização de facilidades, dentre elas pode-se citar a localização de: paradas de ônibus, pontos de emergência e armazéns de distribuição de produtos. Para a formação dos NA *clusters* de passageiros foi utilizado, primeiramente, a heurística de Teitz e Bart (1968) para determinar a localização, entre as residências dos passageiros, dos NA “pontos-base”, de modo que a soma das distâncias da moradia de cada pessoa ao “ponto-base” mais próximo fosse mínima.

Posteriormente, o algoritmo de Gillett e Johnson (BODIN et al., 1983) foi implementado com o objetivo de formar agrupamentos em torno de cada um dos NA “pontos-base”, designando as residências dos passageiros aos “pontos-base” mais próximos, respeitando o número de pessoas alocadas em cada *cluster* à capacidade do veículo.

A heurística de Teitz e Bart para localização de facilidades é baseada na substituição de vértices (residências) exaustivamente, e seu objetivo é, a partir de uma solução inicial, melhorar o valor da função objetivo a cada iteração. Os passos que envolvem esse algoritmo aproximativo consideram todas as residências dos passageiros como potenciais “pontos-base” (medianas) e são apresentados a seguir:

Passo 1 – Inicialmente, a partir do conjunto V , cujos elementos são as residências dos passageiros, formar um subconjunto inicial $S \subset V$ com NA elementos (“pontos-base”) escolhidos aleatoriamente;

Passo 2 – Construir uma matriz de distâncias mínimas entre as residências;

Passo 3 – Para todos os elementos no conjunto $V - S$, verificar se algum elemento $v_i \in V - S$ pode substituir algum elemento $v_j \in S$. Para isso:

a) Selecionar um vértice $v_i \in V - S$, e calcular a redução R_{ij} do número de transmissão (NT), que é a soma das menores distâncias dos v_i elementos do conjunto V aos v_j elementos do subconjunto S , do conjunto S atual, $NT(S)$, em relação ao novo número de transmissão, $NT(S \cup \{v_i\} - \{v_j\})$, para todo v_j pertencente a S :

$$R_{ij} = NT(S) - NT(S \cup \{v_i\} - \{v_j\})$$

b) Encontrar $R_{ij\text{-máx}} = \text{máx}[R_{ij}]$, para todo R_{ij} calculado anteriormente;

c) Se $R_{ij\text{-máx}} > 0$ fazer $S \leftarrow S \cup \{v_i\} - \{v_j\}$;

Passo 4 – Se durante a execução do passo 3 ocorrer modificações no conjunto S , voltar ao passo 2. Caso contrário, terminar o algoritmo. O conjunto S será formado pela localização dos NA “pontos-base” que serão utilizados para a formação dos agrupamentos.

A heurística de Gillett e Johnson apresentada nesse trabalho sofreu algumas adaptações conforme apresentado por Nunes (1998). As etapas de desenvolvimento do algoritmo de designação modificado de Gillett e Johnson são assim descritas:

Passo 1 – Inicialmente, todas as residências encontram-se sem designação a qualquer “ponto-base”. Formar a matriz de distâncias mínimas de cada residência aos “pontos-base”;

Passo 2 – Para cada residência i , ainda não alocada, obter $PB_1(i)$ como sendo o “ponto-base” mais próximo a i e $PB_2(i)$ como sendo o segundo mais próximo, cujas capacidades desses “pontos-base” não estejam esgotadas, com distâncias iguais a $d_1(i)$ e $d_2(i)$, respectivamente, da residência i ;

Passo 3 – Para todas as residências i do passo 2, calcular a razão $r_i = d_1(i) / d_2(i)$ e adicioná-la a uma lista. Ordenar as residências i de acordo com os valores de r_i em ordem crescente. Essa lista determina a ordem em que as residências serão designadas a um dos “pontos-base”. Aquelas residências que estão relativamente próximas a um “ponto-base” serão consideradas primeiro (menor razão r_i), pois quanto menor for o valor de r_i , melhor será a alocação da residência ao “ponto-base” mais próximo já que o segundo mais próximo ficaria a uma distância bem maior em relação ao primeiro ponto;

Passo 4 – Percorrer a lista do passo 3, designando as residências i aos “pontos-base” mais próximos, até que a capacidade de algum *cluster* (igual a capacidade de um ônibus) esteja esgotada ou tenha terminado a lista. Caso tenha atingido a lotação da capacidade de algum *cluster*, voltar ao passo 2. Do contrário, terminar a execução do algoritmo.

3.2.1.2 Algoritmo de Gillett e Miller(1974)

Apesar do método de varredura (*sweep*), como também é conhecida a heurística, ter originado dos trabalhos de Wren (1971) e Wren e Holliday (1972) para o PRV capacitado com um ou vários depósitos, o algoritmo é atribuído a Gillett e Miller (1974).

A estratégia utilizada pelo trabalho de Gillett e Miller (1974) procura obter a solução do problema em duas fases distintas. A primeira visa agrupar as residências dos passageiros segundo algum critério de proximidade, formando assim *clusters*; enquanto na segunda etapa cada grupo é roteado independentemente. A estratégia parte do princípio que os trajetos de coleta serão realizados preferencialmente entre residências próximas. Um outro exemplo de aplicação dessa abordagem pode ser encontrado no trabalho de Fisher e Jaikumar (1981) que realizam o agrupamento através da solução de um problema de designação.

Para o nosso propósito, utilizou-se a heurística apenas para a formação dos *clusters*. Com isso, somente a primeira etapa será considerada e implementada, fase esta, onde, respeitando as restrições do problema para agrupar as residências, é realizada uma varredura circular a partir da garagem, na qual as residências vão sendo escolhidas de acordo com o ângulo de sua coordenada polar em relação à garagem. Os passos que compõem a implementação dessa fase do algoritmo são relatados a seguir:

Passo 1 – Inicialmente, todas as residências encontram-se sem designação a qualquer grupo. As residências serão divididas em NA agrupamentos;

Passo 2 – Para cada residência i , obter o ângulo da coordenada polar definido como $An_i = \arctan[(y_i - y_s) / (x_i - x_s)]$, tendo a garagem s como origem do sistema de coordenadas polares, e adicioná-lo a uma lista. Ordenar as residências i de acordo com os valores de An_i em ordem crescente (ou decrescente). Essa lista determina a ordem em que as residências serão selecionadas para a formação dos NA *clusters*;

Passo 3 – Formar o primeiro agrupamento: incluir a primeira residência da lista ordenada no *cluster*. Incluir as demais neste primeiro grupo, seguindo a lista ordenada, enquanto não ultrapassar a capacidade do *cluster* (igual à lotação de um veículo);

Passo 4 – Formar os (NA - 1) *clusters* seguintes: proceder da mesma forma utilizada para obtenção do primeiro grupo, sendo que a primeira residência para o *cluster* é a próxima da lista ordenada que não pôde ser incluída no grupo anterior.

3.2.2 Problema de localização dos pontos de parada e alocação dos passageiros aos pontos

Sabendo do aumento, durante a etapa de roteamento, da distância percorrida por cada rota, caso os passageiros sejam coletados em suas próprias residências; os objetivos desse problema de localização e alocação se tornaram imprescindíveis: determinar pontos de parada de ônibus onde os passageiros serão alocados e, posteriormente, coletados, além de especificar quais pessoas serão alocadas a cada uma dessas paradas.

Apesar de visar tais objetivos, não foi omitido o cuidado em garantir conforto e segurança ao passageiro, estabelecendo assim, sua alocação à parada de ônibus mais próxima dentro de uma distância máxima aceitável a ser percorrida a partir de sua residência. Procurou-se também, garantir imparcialidade na solução proposta, evitando assim, o favorecimento de alguns passageiros em detrimento a outros.

3.2.2.1 Algoritmo baseado na heurística de Kolesar e Walker

O algoritmo desenvolvido nessa etapa tomou como base a heurística de Kolesar e Walker (1974) para a solução de um problema de cobertura de conjunto. Pode-se citar como uma das restrições implementada no método: a busca em garantir que o número de passageiros alocados a uma parada não exceda a capacidade do ônibus.

Adicionalmente ao procedimento, no passo referente à escolha de qual ponto de parada selecionar, adotou-se um critério de desempate quando há coincidência no número de passageiros a ser alocado entre duas ou mais paradas de ônibus candidatas. Esse critério é utilizado como uma forma de dar preferência àqueles pontos de parada de ônibus cujos viajantes alocados estejam mais distantes da

parada; isso, teoricamente, gerará uma rota mais curta durante a etapa de roteamento.

Os passos, que compõem o algoritmo aproximativo implementado, são descritos como:

Passo 1 – Inicialmente, todos os passageiros (localizados em suas residências) encontram-se sem designação a qualquer ponto de parada de ônibus (as paradas candidatas são as próprias residências). Construir a matriz de distâncias mínimas entre as residências dos passageiros;

Passo 2 – Para cada viajante i , ainda não alocado, calcular e adicionar a uma lista o valor correspondente ao número de residências dos passageiros que estão a uma distância d de sua residência;

Passo 3 – Ordenar em ordem decrescente os passageiros i de acordo com os valores contidos na lista. Essa lista determina a ordem na qual as paradas de ônibus serão selecionadas com os respectivos passageiros a elas alocados;

Passo 4 – Percorrer a lista do passo 3 do seu início seguindo os seguintes critérios para selecionar uma parada de ônibus:

a) Caso o número de passageiros alocados a essa parada não exceda a capacidade de um veículo, ir ao passo 4.b, do contrário, selecionar a próxima parada na lista até que a condição seja satisfeita;

b) Em caso de empate entre dois ou mais potenciais pontos de parada de ônibus, no atributo referente ao número de passageiros designados; utilizar um segundo atributo para desempatar e selecionar uma parada. Este atributo é calculado para cada parada de ônibus empatada e é composto pela soma das distâncias das residências, que foram alocadas à parada, até a própria parada de ônibus. A parada com a maior soma será escolhida como ponto de parada real e excluída da lista, juntamente com as pessoas a ela alocadas;

Passo 5 – Caso todos os passageiros já tenham sido designados, terminar a execução do algoritmo, do contrário, voltar ao passo 2.

3.2.3 Problema de roteamento de veículos (PRV)

O problema de roteamento de veículos introduzido por Dantzig e Ramser (1959) é colocado em um lugar central no gerenciamento de distribuição e, com isso, tornou-se um dos problemas mais estudados em otimização combinatória.

A idéia básica almejada por essa fase consiste na geração de uma série de rotas de veículos que, partindo da garagem e finalizando no destino previamente estabelecido, visitem as paradas de ônibus determinadas na fase anterior, no menor percurso possível e atendendo todas as imposições do problema.

Os percursos foram formados a partir de heurísticas de construção de rota que selecionam os pontos de parada sequencialmente (constroem uma rota por vez) ou paralelamente (produzem várias rotas simultaneamente) até uma solução viável ter sido definida.

Como foi estabelecido que o ponto de origem da rota (garagem) é diferente do ponto de destino, mudanças foram realizadas nos algoritmos aproximativos de construção das rotas de modo a refletir tal situação.

3.2.3.1 Algoritmo do vizinho mais próximo

O método do vizinho mais próximo (ROSENKRATZ, STEARNS e LEWIS, 1977) trata-se de uma heurística gulosa (*greedy*) que inicia toda rota pelo ponto de parada (não alocado a qualquer rota) mais próximo à garagem. As iterações subseqüentes do algoritmo buscam o ponto de coleta, ainda não visitado, mais próximo ao último ponto adicionado à rota e acrescenta-o no fim desta.

Como os pontos de parada adicionados não são otimizados, resultados pouco atraentes podem ser obtidos. A métrica utilizada para medir a proximidade de qualquer par de pontos de parada é a distância real mínima entre os pontos.

Para a inserção de um ponto de parada de ônibus à rota, duas restrições podem ser consideradas:

- Capacidade do veículo - o número de passageiros presentes na parada a ser adicionada não exceda a capacidade do ônibus;
- Percurso total - a rota do veículo com a inserção da parada de ônibus não ultrapasse a distância máxima do percurso.

Visando adequar as restrições acima à característica do problema (origem é diferente do destino), modificações foram implementadas em relação à versão original do algoritmo do vizinho mais próximo, resultando na seguinte descrição:

Passo 1 – Inicialmente, construir a matriz de distâncias mínimas entre os pontos de parada, a garagem e o destino; e estabelecer que todos os pontos de parada de ônibus estejam designados a nenhuma rota;

Passo 2 – Iniciar a rota a partir da garagem v_s dos veículos;

Passo 3 – Encontrar a parada v_i , ainda não designada a nenhuma rota, mais próxima ao último ponto de parada incluído na solução. Inserir a parada v_i após o último ponto (o seu vizinho mais próximo) caso não exceda a capacidade do veículo nem a distância máxima percorrida pelo ônibus na rota. Do contrário, terminar a rota ligando o último ponto de parada ao destino v_t ;

Passo 4 – Caso todos os pontos de coleta já pertençam a alguma rota, finalizar a execução da heurística. Caso contrário, retornar ao passo 2 construindo uma nova rota.

Conforme Golden et al. (1980), esta heurística apresenta, no pior caso, complexidade de tempo computacional $O(n^2)$, sendo n o número de elementos (pontos de parada de ônibus, garagem e destino) presentes no grafo do problema.

3.2.3.2 Algoritmo de Clarke e Wright paralelo

Denominada por heurística de *savings* ou das economias, o algoritmo de Clarke e Wright (1964), originalmente desenvolvido para PRV clássico, sem limite no número de veículos utilizados, é uma das primeiras e, provavelmente, a mais famosa das heurísticas de construção de rotas devida sua simplicidade e baixo tempo de execução. Baseia-se na idéia de economia, que pode ser obtida com a união sucessiva de duas rotas (s, \dots, i, s) e (s, j, \dots, s) , respeitando as restrições, em uma única rota $(s, \dots, i, j, \dots, s)$ gerando economia na distância percorrida $e_{ij} = d_{is} + d_{sj} - d_{ij}$.

A fim de adequar à característica do problema abordado (origem de cada rota diferente de seu destino), modificações foram realizadas no passo referente ao cálculo das economias (Figura 17), onde: s é a garagem, t o local de destino e i e j dois pontos de parada de ônibus.

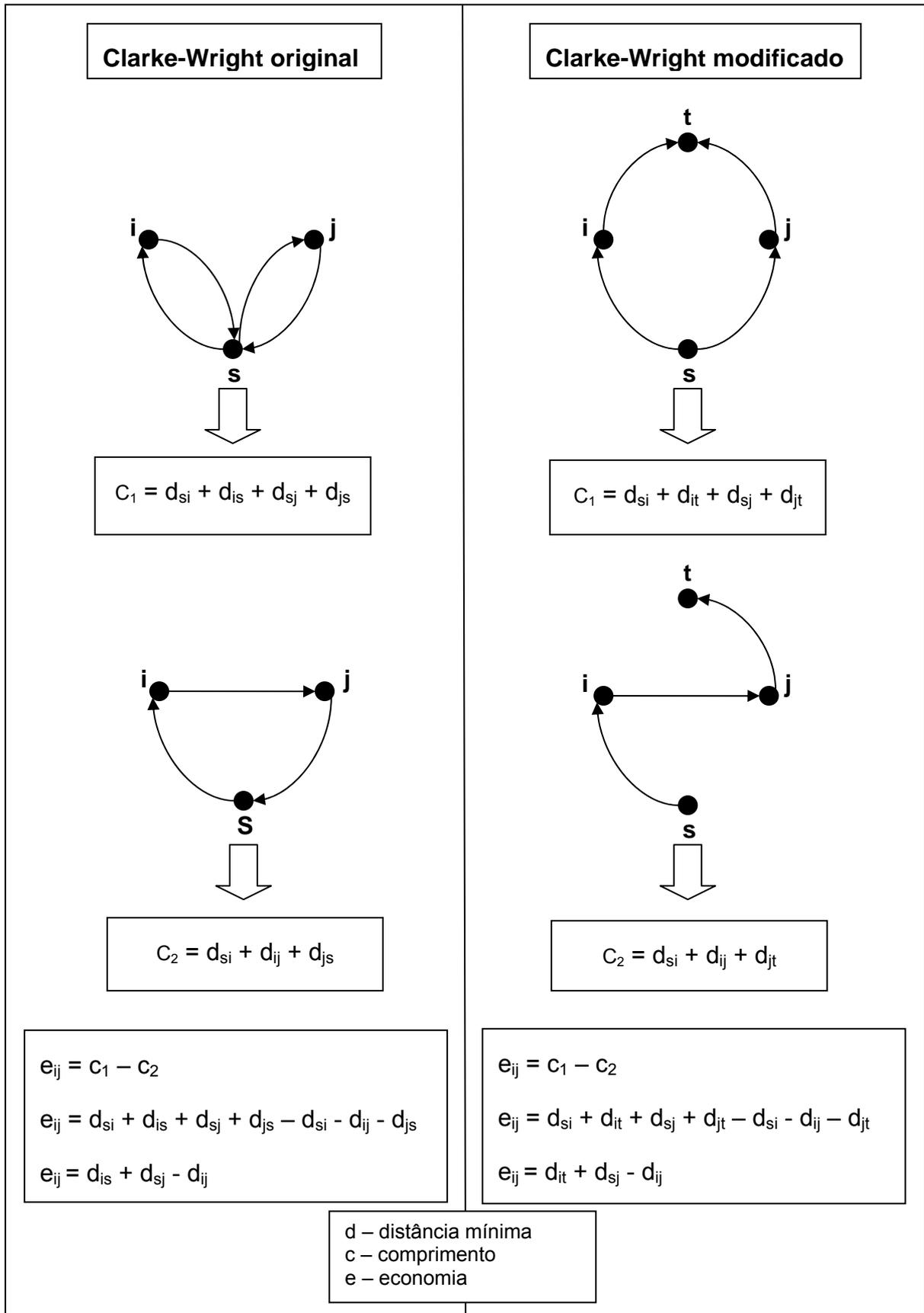


Figura 17 - Cálculo das economias (e)

Foi implementada a versão paralela dessa heurística, por esta apresentar resultados melhores, na prática, do que sua forma seqüencial (CORDEAU et al., 2002b). O algoritmo de economias paralelo difere do seqüencial por percorrer a lista de economias apenas uma vez, tentando desenvolver várias rotas simultaneamente até que a lista esteja esgotada.

Os passos que compreendem esse algoritmo aproximativo paralelo modificado são descritos da seguinte forma:

Passo 1 – Inicialmente, construir a matriz de distâncias mínimas entre os pontos de parada, bem como a distância de cada parada a garagem e ao local de destino;

Passo 2 – Obter a rota $(s - i - t)$ para cada ponto de parada de ônibus i , com a ligação de cada parada, a partir da garagem, ao destino;

Passo 3 – Para todos os pares de pontos de parada (i, j) , com $i \neq j$, calcular e adicionar a uma lista, o valor correspondente às economias e_{ij} (Equação 1):

$$e_{ij} = d_{it} + d_{sj} - d_{ij}$$

Equação 1 - Cálculo das economias

Passo 4 – Ordenar a lista em ordem decrescente do valor das economias e_{ij} dos pares (i, j) ;

Passo 5 – Percorrer, do seu início, a lista ordenada do passo 4 até que a lista completa de economias esteja exaurida, verificando para os pontos de parada i e j da economia e_{ij} , se todas as condições a seguir são satisfeitas, sendo assim, uma nova rota é gerada. Do contrário, passa-se para o próximo par da lista, desconsiderando o par (i, j) :

- Existe uma rota iniciando com (s, j) ;
- Existe uma rota, diferente da anterior, finalizando com (i, t) ;
- A capacidade do ônibus não é excedida e a distância máxima a ser percorrida pelo ônibus não é violada com a união das duas rotas acima gerando uma nova rota com o percurso $(s, \dots, i, j, \dots, t)$;

De acordo com Marinakis e Migdalas (2002), o algoritmo de economias de Clarke e Wright apresenta complexidade de tempo computacional, no pior caso, $O(n^2 \log_2 n)$, sendo n o número de elementos (pontos de parada de ônibus, garagem e destino) presentes no grafo do problema.

3.2.3.3 Algoritmo de inserção mais distante

Essa heurística construtiva adiciona um ponto de parada a uma rota por meio das duas seguintes etapas:

- Etapa de seleção: é a escolha de uma parada de ônibus ainda não visitada a ser inserida na solução;

- Etapa de inserção: é a posição de inserção (entre quais dois pontos de parada) dessa nova parada na rota.

Heurísticas têm sido sugeridas de acordo com o critério utilizado para o passo de seleção dos pontos de parada (ROSENKRANTZ et al., 1977). Algumas destas são:

- Inserção arbitrária: escolha aleatória de qualquer parada ainda não pertencente a alguma rota;

- Inserção mais próxima: escolha de uma parada não visitada que esteja mais próxima da rota;

- Inserção de menor custo: compara os custos de inserção de todos os pontos de parada ainda não roteados em todas as posições de inserção e escolhe um com o menor custo;

- Inserção mais distante: escolha de uma parada não visitada que esteja mais distante da rota.

Dentre as quatro heurísticas apresentadas e diferenciadas pela etapa de seleção adotada foi escolhida e implementada no trabalho a heurística de inserção mais distante.

A etapa de inserção presente no algoritmo é executada após a escolha do ponto de parada de ônibus mais distante f . Todas as arestas (i, j) presentes na rota em formação da solução serão examinadas através do cálculo do custo de inserção de f entre os pontos i e j , onde w é a distância mínima (Equação 2):

$$C_{ij} = W_{if} + W_{fj} - W_{ij}$$

Equação 2 - Cálculo do custo de inserção

É selecionada a aresta que apresenta o menor custo de inserção (podendo inclusive, ser negativo). O ponto f é inserido entre os dois pontos que compõem a aresta selecionada.

Para o fim de adequá-la às características do problema, onde a origem é diferente do destino, foram realizadas pequenas alterações no seu algoritmo. De uma forma geral, os passos que compõem sua implementação modificada podem ser descritos a seguir:

Passo 1 – Inicialmente, construir a matriz de distâncias mínimas entre os pontos de parada, a garagem e o destino; e estabelecer que todos os pontos de coleta estejam designados a nenhuma rota;

Passo 2 – Iniciar a rota inserindo a garagem (origem) s e local de destino t , formando a rota inicial $R = \{s, t\}$;

Passo 3 – Etapa de seleção: selecionar o ponto de parada de ônibus f , ainda não visitado, mais distante de qualquer ponto pertencente à rota;

Passo 4 – Etapa de inserção: para cada aresta (i, j) , calcular o custo de inserção c do ponto f entre as paradas i e j da seguinte forma: $c_{ij} = w_{if} + w_{fj} - w_{ij}$ e selecionar a aresta que apresenta o menor custo de inserção;

Passo 5 – Etapa de inserção: inserir o ponto de parada f entre os pontos i e j da aresta selecionada formando a rota $R = \{s, \dots, i, f, j, \dots, t\}$ e retornar ao passo 3; desde que, com a inserção do ponto f , não seja excedida a capacidade do veículo nem a distância máxima percorrida pelo ônibus na rota. Do contrário, não realizar a inserção e terminar a rota;

Passo 6 – Caso todos os pontos de parada de ônibus já pertençam a alguma rota finalizar a execução da heurística. Caso contrário, retornar ao passo 2 construindo uma nova rota.

Segundo Golden et al. (1980), esta heurística requer, no pior caso, complexidade de tempo computacional $O(n^2)$, sendo n o número de elementos (pontos de parada de ônibus, garagem e destino) presentes no grafo do problema.

3.2.4 Problema de melhoria da rota

As heurísticas, que adotam a técnica de busca local, são umas das mais conhecidas para a melhoria de rotas. Croes (1958) foi quem apresentou o primeiro trabalho sobre procedimentos para melhoramento da rota por meio da troca de arestas. A técnica utilizada realiza troca de duas arestas em uma rota. Posteriormente, Lin (1965) desenvolveu um método que propicia trocas de três arestas a cada iteração em uma mesma rota. Logo em seguida, Lin e Kernighan (1973) melhoraram o algoritmo de Lin (1965) considerando diferentes quantidades de arestas a serem trocadas por iteração durante a execução do algoritmo.

A solução melhorada gerada pelas trocas de arestas, geralmente, termina em um ótimo local, ou seja, gera uma solução aproximada; portanto, não necessariamente obtém o ótimo global.

As heurísticas de busca local adotam a seguinte metodologia. A partir de uma rota inicial R ; exclui-se k arestas de R , produzindo assim, k caminhos desconectados. Então, reconecta-se estes k caminhos de tal maneira que produza uma nova rota R' , usando para isso, arestas diferentes daquelas que foram removidas de R . Para que a nova rota R' substitua R é necessário que $d(R') < d(R)$, onde d é a distância total percorrida pelo veículo. Este processo continua até que nenhum melhoramento é obtido pela troca de k arestas.

Em geral, quanto maior o valor de k (número de arestas trocadas por iteração), melhor será a solução, mas, em contrapartida, há um aumento no tempo computacional da ordem de $O(n^k)$, onde n é o número de vértices. Portanto, deve-se fazer um balanço entre a precisão da solução e o custo computacional para a escolha de k . Trabalhos de Lin (1965) e Lin e Kernighan (1973) sugerem que soluções com $k = 3$, conhecido na literatura por *3-opt*, são muito melhores do que *2-opt*, mas soluções *4-opt* não são suficientemente melhores do que as soluções *3-opt* a fim de justificar o aumento do tempo computacional.

3.2.4.1 Algoritmo 3-*opt*

É definido para esta heurística a troca de três arestas de uma rota por meio da exclusão de três arestas e sua substituição por outras três de modo a formar uma nova rota, então a rota é 3-ótimo se não é possível melhorar a rota através de mais alguma troca (LIN, 1965).

Os passos do algoritmo para efetuar melhoramentos 3-*opt* são aplicados sobre cada rota gerada pela solução do problema de roteamento e são apresentados como se segue:

Passo 1 – Inicialmente, construir a matriz de distâncias mínimas entre os pontos de parada, bem como a distância de cada parada a garagem e ao local de destino;

Passo 2 – Obter uma rota inicial factível, utilizando algum dos procedimentos de formação de rotas e calcular a distância total percorrida $d(R)$ pelo veículo;

Passo 3 – Remover 3 arestas da rota atual, substituindo-as por outras diferentes daquelas que foram desconectadas, formando uma nova rota R' . Se o comprimento da rota nova for menor que o da rota anterior, $d(R') < d(R)$, substituir a rota atual pela nova rota;

Passo 4 – Prosseguir no passo 3 até que nenhuma melhoria possa ser alcançada.

3.3 Estratégias heurísticas de solução

Para desenvolver uma solução heurística para o problema de transporte de passageiros é preciso considerá-lo como composto pelos três seguintes subproblemas relacionados:

- Um problema de localização: para determinar os pontos de parada de ônibus;
- Um problema de alocação: para designar os passageiros a um grupo ou aos pontos de coleta;
- Um problema de roteamento: para produzir as rotas que visitam as paradas de ônibus coletando as pessoas a elas designadas.

Na literatura, duas estratégias principais utilizando heurísticas foram propostas para solucionar problemas de localização e roteamento (PLR) (LAPORTE, 1988),

sendo estas, diferenciadas pela ordem em que os três subproblemas são solucionados.

A primeira estratégia é conhecida como *Location-Allocation-Routing* (LAR). Ela procura determinar um conjunto de pontos de parada e alocar os viajantes a eles de acordo com uma distância máxima a ser percorrida pelos passageiros até as paradas. Em seguida, uma heurística clássica para o problema de roteamento de veículos (PRV) é aplicada para gerar as rotas de ônibus que passam pelos pontos de coleta determinados. Dulac et al. (1980) utilizam esta técnica em seu algoritmo de roteamento de ônibus escolar.

Em decorrência da estrutura de execução apresentada pela estratégia LAR, algumas limitações ao PLR surgem, mas não, necessariamente, significam numa solução final pior. Salhi e Rand (1989) relatam sobre o efeito causado pela não consideração das rotas durante a determinação da localização dos depósitos (pontos de parada de ônibus), mas não conseguem chegar a uma correlação entre o resultado do roteamento obtido a partir de boas ou más localizações dos depósitos.

Pode-se citar dentre as limitações provocadas pela metodologia LAR, a dificuldade em realizar o balanceamento dos passageiros nos ônibus e a tendência em gerar um número excessivo de rotas. Pelo fato da fase de localização-alocação (seleciona os pontos de parada e aloca as pessoas a esses pontos) ignorar restrições do subproblema de roteamento (como a capacidade dos veículos), várias paradas de ônibus podem apresentar um número relativamente grande de passageiros alocados a elas, possibilitando assim, uma propensão a gerar um número maior de rotas, sendo estas, não balanceadas pelo número de viajantes.

Entretanto, como vantagem, a estratégia permite um controle explícito sobre o tamanho do percurso de todas as rotas, já que cada uma é gerada após a fase de alocação e a cada ponto de parada inserido na rota é verificado o percurso para confirmar se não foi excedido seu limite.

A segunda estratégia é conhecida como *Allocation-Routing-Location* (ARL). Inicialmente, essa estratégia procura alocar os passageiros em *clusters* (agrupamentos) de modo que cada grupo possa ser servido por apenas um veículo. Então, para cada *cluster*, os pontos de parada de ônibus são determinados, os

passageiros são alocados e uma rota passando pelos pontos selecionados é construída.

Vários trabalhos utilizam essa técnica, dentre os quais, podemos destacar os de Steiner et al. (1997) e Steiner et al. (2000) aplicados ao transporte escolar e de funcionários, respectivamente. Chapleau et al. (1980) e Bowerman et al. (1995) também adotam essa metodologia e descrevem um algoritmo de roteamento de ônibus escolar.

Dentre as vantagens que permeiam a estratégia ARL sobre a LAR, pode-se citar o efetivo balanceamento do número de passageiros entre os ônibus e a minimização do número de rotas. Estes dois objetivos são proporcionados pela fase de associação dos viajantes aos *clusters* e independem das fases de localização-alocação e roteamento. Entretanto, o objetivo de fixar o tamanho máximo a ser percorrido pelas rotas não pode ser controlado explicitamente já que os percursos são gerados após a fase de alocação (formação de grupos) e com isso, é dependente da dispersão das pessoas dentro de cada agrupamento.

As estratégias heurísticas apresentadas neste capítulo buscam tanto imparcialidade quanto eficiência dos resultados. Almejando isso, utilizam vários algoritmos aproximativos clássicos para resolver os subproblemas que envolvem o problema de localização e roteamento tendo como base as técnicas LAR e ARL.

Para o nosso trabalho, na fase de localização, devido a grande quantidade de pontos a serem analisados, considerou-se apenas as residências dos passageiros como possíveis pontos de parada de ônibus. Outro ponto considerado consiste que a etapa de alocação foi aplicada para a designação dos passageiros às paradas de ônibus, como também, para a alocação das pessoas em *clusters*, onde passou a ser denominada como “formação de agrupamentos de passageiros”.

Já na fase de roteamento foram implementadas heurísticas para a construção de rotas e, posteriormente, para a melhoria das rotas geradas. Durante estas duas etapas, o escopo de pontos a serem visitados é restringido a apenas os pontos de parada de ônibus reais, ou seja, que há passageiros designados.

Os procedimentos seguintes estão presentes em todas as estratégias implementadas:

- A etapa referente ao cadastramento das residências dos passageiros antecede a execução de todas as estratégias. Esse cadastro é realizado diretamente no mapa ao clicá-lo identificando a localização da moradia;

- A matriz composta pelas distâncias mínimas entre todas as residências dos passageiros, a garagem e o local de destino foi construída com a aplicação do algoritmo de menor caminho de Dijkstra.

3.3.1 Estratégia LAR

Essa estratégia é inspirada no trabalho de Dulac et al. (1980) por meio do uso da técnica LAR. Com o intuito de evitar que o subproblema de alocação dos passageiros às paradas de ônibus ignore completamente restrições da fase de roteamento, introduziu-se o parâmetro referente à capacidade do veículo, que está presente na etapa de definição das rotas, como limitante máximo do número de pessoas alocadas em uma parada.

As etapas que compõem a estratégia juntamente com seus respectivos parâmetros de entrada e saída são apresentadas a seguir:

Etapa 1: Problema de localização dos pontos de parada e alocação dos passageiros aos pontos.

Utiliza o algoritmo modificado de Kolesar e Walker para a localização dos pontos de coleta e associação dos passageiros a esses pontos respeitando duas condições:

- Os viajantes não podem realizar o percurso até a parada, a partir de suas residências, percorrendo um trajeto superior a uma distância pré-estabelecida;

- O número de passageiros alocados a cada parada é limitado pela capacidade de assentos do veículo com o objetivo de evitar a visita a uma parada novamente.

O grafo adotado correspondente ao mapa viário urbano da cidade não é orientado, já que os passageiros podem transitar nas vias independentemente do sentido da mão de direção.

Parâmetros de entrada:

- Grafo não direcionado simples da malha viária da cidade;

- Localização das residências dos passageiros selecionadas no mapa;

- Distância máxima a ser percorrida por uma pessoa até o ponto de parada de ônibus;

- Capacidade do veículo;
- Localização da garagem dos ônibus (ponto de partida de todas as rotas);
- Localização do local de destino (ponto de chegada de todas as rotas).

Parâmetros de saída:

- Localização dos pontos de parada de ônibus;
- Especificação dos passageiros alocados a quais paradas de ônibus.

Etapa 2: Problema de roteamento de veículos.

Construiu-se rotas que visitam os pontos de parada de ônibus determinados na etapa 1. Foram implementadas e utilizadas três heurísticas clássicas modificadas: vizinho mais próximo, inserção mais distante e Clarke e Wright paralelo. Utilizou-se um grafo orientado da cidade, já que os veículos têm que seguir as regras de trânsito ditadas pelo sentido da mão de direção.

Parâmetros de entrada:

- Grafo direcionado simples das vias da cidade;
- Localização dos pontos de parada de ônibus;
- Distância máxima a ser percorrida por um veículo durante a coleta dos passageiros;

- Capacidade do veículo;
- Localização da garagem dos ônibus (ponto de partida de todas as rotas);
- Localização do ponto de chegada de todas as rotas.

Parâmetros de saída:

- Rota a ser percorrida por todos os ônibus;
- Especificação de quais passageiros estão presentes em cada percurso.

Etapa 3: Problema de melhoria da rota.

A partir das rotas geradas pelos algoritmos da etapa 2, procurou-se melhorá-las com a utilização do algoritmo *3-opt* para troca de arestas em uma mesma rota.

Parâmetros de entrada:

- Grafo direcionado da malha viária da cidade;
- Percurso a ser seguido por todos os ônibus;
- Localização da garagem dos ônibus (ponto de partida de todas as rotas);
- Localização do ponto de destino de todas as rotas.

Parâmetros de saída:

- Rota melhorada a ser percorrida pelos ônibus;
- Especificação de quais passageiros estão presentes em cada percurso.

A Figura 18 a seguir ilustra a seqüência de execução dos algoritmos que envolvem cada etapa dessa estratégia:

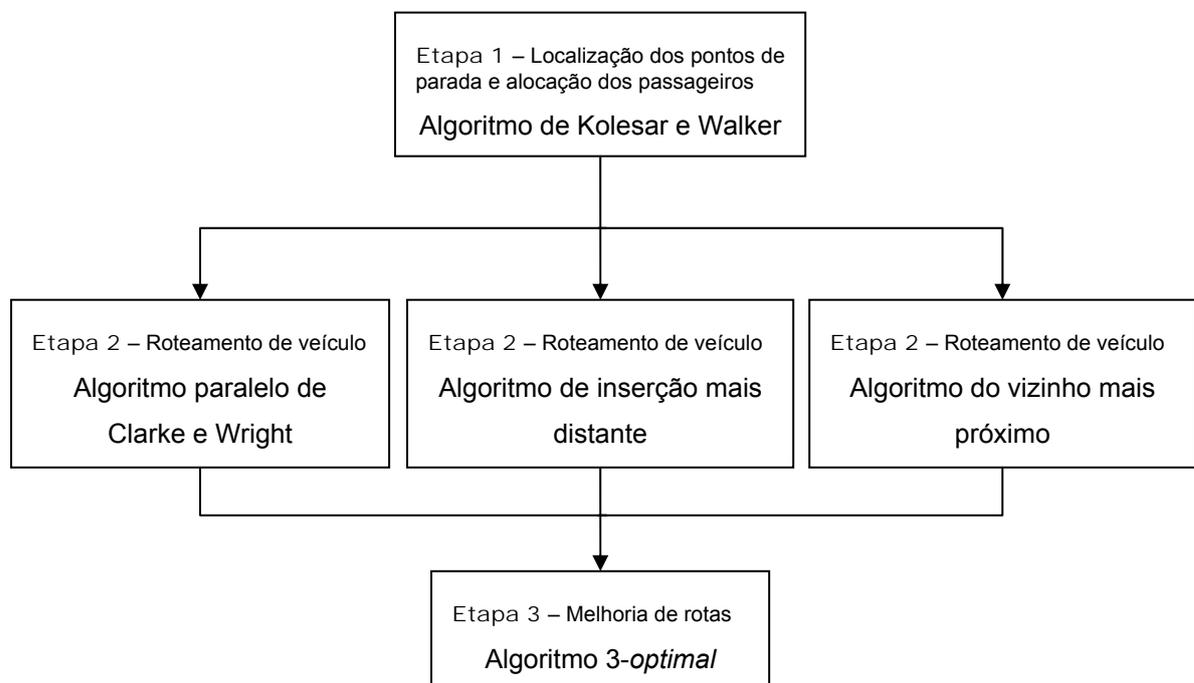


Figura 18 – Fluxograma das etapas e algoritmos envolvidos na estratégia LAR

3.3.2 Estratégia ARL

A idéia que conduz a estratégia ARL sofreu influência do trabalho de Chapleau et al. (1980) por intermédio da utilização da técnica ARL e apresenta as seguintes etapas com seus respectivos algoritmos e parâmetros de entrada e saída:

Etapa 1: Formação dos agrupamentos de passageiros.

Buscou-se nessa etapa alocar os passageiros em *clusters*, formando grupos, ao invés de considerá-los como pertencentes a um único grupo. Para tal fim, foram aplicadas as heurísticas de Teitz e Bart e de Gillett e Johnson. O grafo correspondente ao mapa viário da cidade não é orientado, haja vista que as pessoas podem transitar nas vias independentemente do sentido da mão de direção.

Parâmetros de entrada:

- Grafo não direcionado simples da malha viária da cidade;
- Localização das residências dos passageiros selecionadas no mapa;
- Capacidade do veículo;
- Localização do ponto de partida das rotas;
- Localização do ponto de chegada das rotas.

Parâmetros de saída:

• Especificação dos agrupamentos com seus respectivos passageiros alocados.

Etapa 2: Problema de localização dos pontos de parada e alocação dos passageiros aos pontos.

Para cada *cluster*, o algoritmo aproximativo modificado de Kolesar e Walker foi executado visando determinar as paradas reais dentre os possíveis pontos de parada de ônibus e alocar as pessoas, de modo que, todo passageiro esteja dentro de uma distância máxima previamente determinada da parada a qual foi designado. Os locais definidos para serem os pontos de coleta reais foram selecionados dentro do conjunto das residências dos passageiros (potenciais paradas de ônibus).

Parâmetros de entrada:

- Grafo não direcionado simples da malha viária da cidade;

- Localização das residências dos passageiros designadas a um agrupamento;
- Distância máxima a ser percorrida por uma pessoa até o ponto de parada de ônibus;

- Capacidade do veículo;
- Localização da garagem dos ônibus (ponto de partida de todas as rotas);
- Localização do ponto de chegada de todas as rotas.

Parâmetros de saída:

- Localização dos pontos de parada de ônibus para cada *cluster* constituído;
- Especificação dos passageiros alocados a quais paradas de ônibus.

Etapa 3: Problema de roteamento de veículos.

Construiu-se rotas, para cada agrupamento formado, que visitam os pontos de parada de ônibus determinados na etapa 2. Foram implementadas e utilizadas três heurísticas clássicas modificadas: vizinho mais próximo, inserção mais distante e Clarke e Wright paralelo. Utilizou-se um grafo orientado da cidade, já que os veículos têm que seguir as regras de trânsito ditadas pelo sentido da mão de direção.

Parâmetros de entrada:

- Grafo direcionado simples das vias da cidade;
- Localização dos pontos de parada de ônibus;
- Localização da garagem dos ônibus (ponto de partida de todas as rotas);
- Localização do ponto de chegada de todas as rotas.

Parâmetros de saída:

- Rota a ser percorrida por todos os veículos em cada *cluster*;
- Especificação de quais passageiros estão presentes em cada percurso.

Etapa 4: Problema de melhoria das rotas.

A partir das rotas geradas pelos algoritmos da etapa 3, para cada agrupamento, procurou-se melhorá-las com a execução do algoritmo *3-opt* para troca de arestas pertencentes a uma mesma rota.

Parâmetros de entrada:

- Grafo direcionado simples da malha viária da cidade;
- Percurso a ser seguido por todos os ônibus em cada *cluster*;
- Localização da garagem dos ônibus (ponto de partida de todas as rotas);
- Localização do ponto de chegada de todas as rotas.

Parâmetros de saída:

- Rota melhorada a ser percorrida pelos veículos;
- Especificação de quais passageiros estão presentes em cada percurso.

A Figura 19 ilustra a seqüência de execução dos algoritmos que envolvem cada etapa dessa estratégia. As etapas 2, 3 e 4 são executadas para cada agrupamento formado na etapa 1.

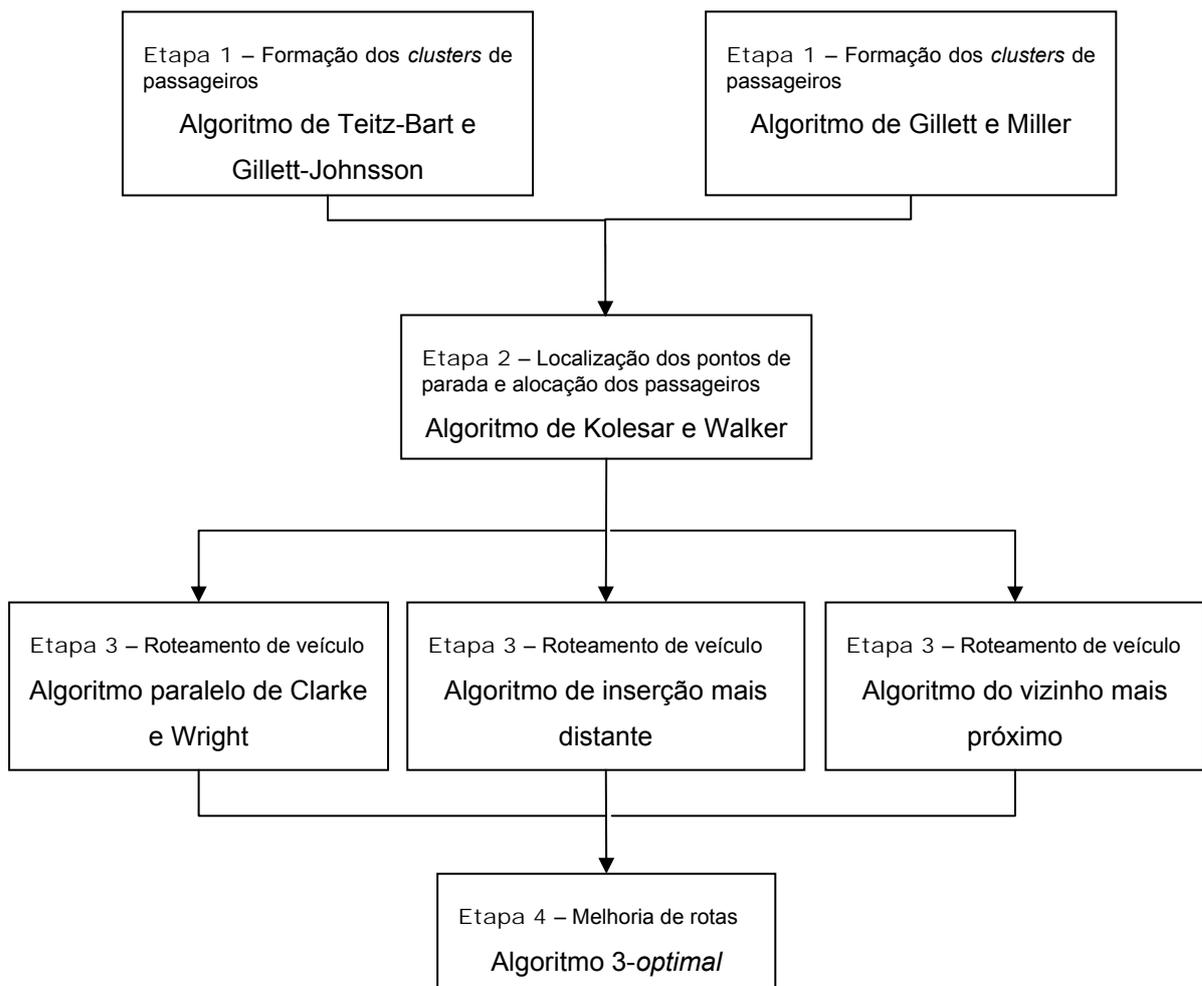


Figura 19 – Fluxograma das etapas e algoritmos envolvidos na estratégia ARL e em sua variação

3.3.3 Variação da estratégia ARL

Similar a estratégia anterior, a técnica *Allocation-Routing-Location* é também aplicada nessa metodologia, tendo como diferencial, o algoritmo aproximativo aplicado na etapa inicial de solução do problema abordado. A seguir é apresentada a única etapa que diverge da técnica anterior com seu respectivo algoritmo e parâmetros de entrada e saída (Figura 19).

Etapa 1: Formação dos agrupamentos de passageiros.

Foi almejado nessa etapa dividir os passageiros em grupos por meio da aplicação da heurística de Gillett e Miller. O grafo correspondente ao mapa viário da cidade não é orientado nesta etapa.

Parâmetros de entrada:

- Grafo não direcionado da malha viária da cidade;
- Localização das residências dos passageiros selecionadas no mapa;
- Capacidade do veículo;
- Localização da garagem dos ônibus (ponto de partida de todas as rotas);
- Localização do ponto de chegada das rotas.

Parâmetros de saída:

- Especificação dos passageiros alocados a quais agrupamentos.

Capítulo 4 – Estudo de Caso

Uma questão importante dentro dos custos empresariais e da qualidade do trabalho dos empregados está relacionada à condução dos funcionários até a empresa. Pelo fato dos trabalhadores não serem simples objetos como no caso da entrega e coleta de mercadorias, restrições adicionais relacionadas à qualidade (conforto e segurança) e eficiência no traslado até o trabalho tornam este problema significativamente mais complicado do que os problemas de roteamento de veículos (PRV) tradicionais.

O problema de transporte de funcionários pode ser especificado como um grupo de empregados distribuídos espacialmente em uma região, que devem ser munidos com o transporte das suas residências até a empresa e do local de trabalho às suas moradias. O problema consiste em encontrar uma série de rotas de ônibus que assegurem o provimento equitativo do serviço, entre todos os trabalhadores, com o menor custo para a empresa contratante e, em menor tempo e maior conforto para o funcionário. A solução desse problema proporciona um aumento na produtividade e uma melhoria, considerável, no vínculo "empresa-funcionário".

Neste capítulo, far-se-á uma descrição real do problema vivenciado pela fábrica Esmaltec S. A., detalhando as características da aplicação *web* implementada, bem como a metodologia aplicada atualmente pela empresa para solucionar o problema. Serão apresentados também, os resultados numéricos obtidos com a execução da aplicação desenvolvida em ambiente *web*, objetivando expô-los agrupados de acordo com as etapas contidas em cada uma das estratégias de resolução do problema dissertadas nesse trabalho. Por fim, serão realizadas comparações entre os resultados obtidos na aplicação das estratégias.

4.1 Descrição do problema

Com o propósito inicial de diminuir os custos de transporte e, posteriormente, melhorar a qualidade na realização do trabalho dos empregados, várias empresas de grande porte localizadas na região metropolitana de Fortaleza (CE), mais

especificamente, no distrito industrial de Maracanaú contratam empresas prestadoras do serviço de transporte de passageiros sob regime de fretamento contínuo para a condução de seus funcionários das suas residências ou pontos de parada de ônibus pré-estabelecidos até a empresa e no retorno ao lar. Isso é justificado por estas indústrias apresentarem grande parte de seu quantitativo laboral residindo na capital cearense, conseqüentemente, distante da sede da empresa.

No caso específico da empresa de grande porte Esmaltec S. A., onde será desenvolvido esse estudo de caso, suas atividades fabris – composta por três unidades produtivas: fogão, refrigeração (refrigeradores, bebedouros elétricos e *freezers*) e recipientes para GLP – eram realizadas em Fortaleza, mas devido ao crescimento de sua participação no mercado surgiu a necessidade de expandir-se. Nesse momento, deparou-se com o insuficiente espaço físico disponível em sua antiga sede, tornando necessária a busca por um local no qual suprisse seu objetivo de ampliação. A decisão pela escolha do distrito industrial de Maracanaú (CE), como nova sede, veio alicerçada na infra-estrutura básica adequada e no espaço físico suficiente para garantir o crescimento da empresa ao longo prazo.

Dentro desse panorama, outro ponto favorável à contratação desse serviço consiste na experiência profissional de seus funcionários, que detentores do conhecimento do processo fabril, não poderiam ser substituídos imediatamente pela mão-de-obra local, pois esta não apresentava a qualificação profissional esperada e nem condições de adquiri-la ao curto prazo.

Como os trabalhadores estão distribuídos em praticamente todos os bairros de Fortaleza, os custos envolvidos no transporte são consideráveis e exigem a confecção de meios que visem minimizá-los e que evitem um traslado demorado e cansativo.

Os empregados estão divididos em quatro turnos de trabalho e exercem suas atividades de segunda a sexta, sendo que a grande maioria trabalha durante o horário comercial (segundo turno), conforme a Tabela 2 apresentada a seguir:

Turnos	Horários	Nº. total de funcionários	Nº. funcionários transportados
1º turno	06:00 – 14:00	162	85
2º turno	07:00 – 17:00	1223	641
3º turno	14:00 – 22:00	102	65
4º turno	22:00 – 06:00	171	78
Total		1658	869

Tabela 2 – Horários da jornada de trabalho e distribuição dos trabalhadores que utilizam o serviço de transporte por turno

4.1.1 Solução do problema atualmente

A indústria, como pode ser visto na Tabela 2, possui atualmente cerca de 1660 funcionários distribuídos entre os quatro turnos de trabalho vigentes, sendo que, 869 são transportados por intermédio do fretamento contínuo de ônibus. A Tabela 3 expõe de maneira mais detalhada os empregados, que utilizam o serviço, agrupados de acordo com a cidade onde residem.

Para a concretização desse objetivo, são utilizados 17 ônibus para o horário comercial, 4 para o primeiro turno, 3 para o terceiro e, por último, 4 para a quarta jornada de trabalho, conforme a Tabela 3. Os ônibus solicitados à empresa contratada possuem 42 lugares sentados e a sua maioria parte da garagem da empresa terceirizada. O serviço contratado é prestado de segunda a sexta.

Inicialmente, as rotas foram estabelecidas por um funcionário da indústria, responsável por fornecer os trajetos à terceirizada, com base em seu conhecimento tácito da malha viária da cidade e da análise e formulação empírica das rotas. Ou seja, o encarregado pela realização da tarefa não utilizava qualquer aparato computacional para auxiliá-lo no trabalho ou na otimização da solução.

Além disso, ele também pré-estabelecia os pontos de coleta dos funcionários, agrupando-os de acordo com a proximidade da residência ao ponto. Um outro fator importante, diz respeito à rotatividade média aproximada de 2.50% ao mês, no quadro de funcionários da empresa, além de aposentadorias e mudanças de endereços. Com isso, a solução provida manualmente desprende muito tempo e obriga a dedicação exclusiva do funcionário para resolver uma nova situação diariamente na localização residencial de alguns empregados.

Os valores cobrados pela empresa prestadora do serviço eram contabilizados de acordo com a quilometragem percorrida, recaindo sobre o empregado designado a elaborar os percursos, a responsabilidade árdua e dispendiosa de produzir rotas que minimizassem os custos para a fábrica.

Atualmente, no contrato de serviço é estabelecido um valor fixo a ser pago por rota, independente do tamanho do ônibus e do percurso dos trajetos. Com esta mudança, ficou a cargo da terceirizada minimizar o percurso total dos veículos. Como a busca pela diminuição dos custos é constante, a fábrica almeja adotar critérios de otimização para a determinação das rotas visando uma renegociação dos valores presentes no contrato. Para isto, é necessário um ambiente computacional que possa atender com rapidez e garantia de bons resultados, já que a solução provida manualmente desprende muito tempo e obriga a dedicação exclusiva de um funcionário.

Em decorrência da ausência de algumas informações, ou por parte da empresa na qual o estudo de caso foi realizado ou por parte da terceirizada, o detalhamento de alguns dados da solução atual não foi possível, como por exemplo, as distâncias reais percorridas por cada veículo. Entretanto, pôde-se presenciar alguns acontecimentos, como o fato de alguns ônibus excederem sua capacidade máxima de 42 lugares sentados, forçando alguns funcionários a viajarem em pé. Em contrapartida, alguns outros veículos realizaram o percurso com lugares ociosos.

No presente momento, as rotas são definidas respeitando um tempo limite máximo para o qual o funcionário deve permanecer no ônibus durante o percurso, que varia de 45 minutos à uma hora, evitando assim, cansaço e indisposição com rotas muito longas. Após a definição dos percursos, cada motorista recebe uma lista contendo os nomes dos empregados a serem transportados, além do horário de passagem pelos locais de embarque dos funcionários, sendo estes locais, pré-determinados pela Esmaltec.

A Tabela 3 apresenta o quantitativo de empregados, os quais usufruem da condução até o local de trabalho e no trajeto de volta, discriminado de acordo com o turno e a cidade onde residem. É exibido também, o número de veículos empregados no transporte.

Turno de trabalho	Nº. de veículos	Nº. de funcionários	Localização
1º turno	4	70	Fortaleza
		12	Maracanaú
		2	Caucaia
		1	Pacatuba
2º turno	17	597	Fortaleza
		23	Maracanaú
		16	Caucaia
		2	Maranguape
		1	Pacajus
		1	Pacatuba
		1	Guaiuba
3º turno	3	60	Fortaleza
		3	Caucaia
		2	Maracanaú
4º turno	4	68	Fortaleza
		9	Maracanaú
		1	Caucaia
Total	28	869	

Tabela 3 - Distribuição detalhada por localidade do quantitativo de funcionários e ônibus utilizados em cada turno

4.2 Características da aplicação

Cidades com malha viária urbana extensa, como Fortaleza, apresentam peculiaridades que favorecem a adoção de uma determinada representação computacional em detrimento a outras, como também em relação aos algoritmos escolhidos. O fato da aplicação ser executada em ambiente *web* influencia também a escolha do modelo de arquitetura adotado. Sendo assim, durante o desenvolvimento da aplicação objetivou-se adequar a implementação às características do problema.

Com base nas condições envolvidas no problema de transporte de funcionários ora solucionadas, a aplicação desenvolvida apresenta as seguintes características:

4.2.1 Representação computacional

De acordo com o exposto no capítulo 1, pode-se especificar as características da malha viária de Fortaleza, bem como a melhor estrutura de representação computacional a ser implementada.

O grafo que representa a rede viária possui 25.130 intersecções de vias (nós) e 36.910 trechos de vias (arcos) com as seguintes particularidades:

- Misto

Como é sabido, em grandes centros urbanos existem vias de mão-única e vias de mão-dupla. Esse tipo de característica é representado no grafo por intermédio de arcos direcionados e não direcionados, respectivamente.

- Esparso

Por o grafo possuir o número de arcos (36.910) bastante inferior ao quadrado do número de nós ($25.130^2 = 631.516.900$), conclui-se que a rede é esparsa.

- Ponderado ou valorado

Os arcos são ponderados com seu peso indicando a distância em metros.

- Conexo

Como a base de dados adquirida junto à AMC, para a construção da malha viária da capital cearense, possui imperfeições (trechos de via inalcançáveis), foi necessário um tratamento desses dados visando tornar o grafo conexo.

A utilização de listas de adjacências é fortemente recomendada, pois em conformidade com o exposto na comparação do espaço de armazenamento (capítulo1) utilizado entre as estruturas matriz e lista de adjacência, prevalece a última:

$$36.910 < (25.130^2 - 2*25.130)/2 \Rightarrow 36.910 < 315.733.320$$

Para a formação do subgrafo (formado a partir do grafo da malha viária de Fortaleza), o qual possui o peso de seus arcos representando a menor distância entre os seus nós (garagem dos ônibus, empresa e as residências dos funcionários ou pontos de parada), optou-se pelo processamento dos caminhos mínimos, ao invés do cálculo simplificado de distâncias euclidianas.

Apesar da aplicação do algoritmo de menor caminho acarretar em um impacto no desempenho computacional do sistema (maior tempo e recursos de processamento), ele obtém uma maior precisão na solução gerada proporcionada pela representação geográfica detalhada das vias através do sistema de informações geográficas.

O algoritmo de menor caminho escolhido para dar suporte às heurísticas de localização dos pontos de parada de ônibus e de roteamento de veículos abordados nesse trabalho foi o algoritmo de Dijkstra. Visando minimizar o “gargalo” presente neste algoritmo no momento da escolha do menor rótulo temporário utilizou-se a estrutura de dados *heap* binária por apresentar uma implementação menos complexa e por demonstrar, na prática, uma menor complexidade computacional em redes esparsas do que a *heap* fibonacci (GOLDBERG e TARJAN, 1996), por exemplo.

4.2.2 Modelo cliente/servidor e configurações

A arquitetura idealizada (Figura 20) procura refletir um modelo no qual o usuário possa visualizar o mapa na Internet sem a necessidade de instalar programas de computador específicos, a não ser o *plug-in* Adobe SVG Viewer, em seu navegador. Diferentes tecnologias podem ser empregadas, tanto do lado do cliente quanto do lado do servidor. Neste trabalho, a opção pelas tecnologias padronizadas e fontes abertas como: XML, SVG, DOM e *ECMAScript/JavaScript*, e outras proprietárias como o servidor *web* IIS, ASP.Net e o servidor de banco de dados Access permitiram obter resultados como os posteriormente apresentados.

Com a tecnologia SVG empregada no lado cliente (*browser web*), muitas ações executadas pelos usuários são processadas localmente. Apenas as que necessitam de novas informações exigem outra requisição ao servidor. Por exemplo, o usuário pode fazer manipulações na forma de exibição dos dados geográficos apresentados, por meio de várias operações (arrastar, ampliar, reduzir, ...) sem gerar uma requisição ao servidor.

No processo de construção da aplicação SIG envolvendo o mapa interativo na Internet, a arquitetura utilizada adota o paradigma computacional cliente/servidor; no qual o cliente solicita um serviço através do navegador *web* e o servidor responde ao serviço solicitado.

A Figura 20 ilustra o sistema cliente/servidor 3-camadas na qual a aplicação *web* está inserida:

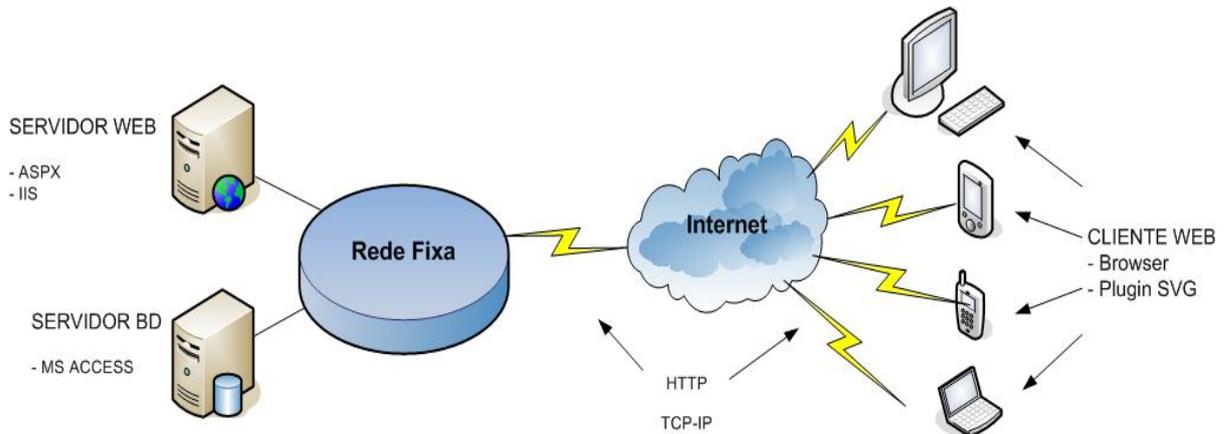


Figura 20 - Arquitetura cliente-servidor em 3-camadas

A base de dados que foi utilizada para a confecção desse trabalho foi construída a partir de informações importantes exportadas do sistema de informações geográficas TransCAD para o banco de dados MS Access. O SIG continha informações sobre a malha viária de Fortaleza (por exemplo: nome do logradouro e direção da via) e sobre as coordenadas geográficas (UTM) necessárias para construir o mapa utilizando SVG.

Para a execução adequada da aplicação, tanto do lado do cliente quanto do servidor, são desejáveis as configurações apresentadas no Quadro 4:

Hardware/Software	Configurações	
	Cliente	Servidor
Computador	Processador 1.00 Ghz com 512 Mb de RAM	Processador 2.40 Ghz e 1 Gb de RAM
Acesso a internet	Banda larga (300 kbps)	Banda Larga (300 kbps)
Sistema operacional	Qualquer	MS Windows 2000 Server, XP Professional.

Quadro 4 - Configurações desejáveis no servidor e no cliente

Todas as configurações de *hardware* e *software* adotadas no desenvolvimento da aplicação são apresentadas no Quadro 5:

Hardware e software	Configurações
Computador (servidor)	Intel Pentium 4 2.80 GHz, 1(um) GB de Ram
Sistema Operacional	MS Windows XP <i>Professional</i>
Bando de dados	MS <i>Access</i> 2003
Servidor <i>web</i>	<i>Internet Information Service</i> (IIS)
Navegador	MS <i>Internet Explorer</i> 6.0
Linguagem de programação	C#(Sharp).Net
<i>Scripts e plug-ins</i> no cliente	<i>JavaScript</i> e Adobe SVG Viewer 3.03 para sistema Windows
<i>Framework</i> de desenvolvimento	MS Visual Studio.Net
Páginas <i>web</i>	ASP.Net (extensão “.aspx”)
Acesso à Internet	Banda larga (300 kbps)

Quadro 5 - Configurações de *hardware* e *software* da aplicação

4.2.3 Considerações em relação ao problema

As características presentes no problema de transporte a ser resolvido são apresentadas a seguir levando em consideração a taxonomia geral para o PRV publicado por Bodin e Golden (1981):

- A natureza da demanda (passageiros) é determinística e homogênea;
- Os passageiros localizam-se nas esquinas (nós) das ruas (grafo);
- Possui mais de um ponto de parada de ônibus (aonde as pessoas serão recolhidas);
- Os locais definidos para serem os pontos de parada neste trabalho foram selecionados dentro do conjunto das residências dos funcionários;
- Serão considerados na realização da coleta dos 869 empregados, apenas os 795 funcionários que residem em Fortaleza, conforme a Tabela 3. Com base nos endereços residenciais dos trabalhadores fornecidos pela Esmaltec, realizou-se a inserção dos pontos correspondentes à localização de suas casas no mapa;
- A malha viária apresenta ruas de mão única e de mão dupla (grafo misto).
- Possui mais de um veículo disponível para o transporte dos passageiros;
- A frota de ônibus utilizada para o transporte é homogênea, por conseguinte, todos os ônibus possuem a mesma capacidade;

- Será designado um veículo para cada rota estabelecida. Ou seja, um mesmo veículo não realizará o percurso em dois roteiros distintos;

- No início do expediente, todas as rotas iniciam na garagem e terminam na empresa, sendo ao contrário na volta para casa;

- Como a Esmaltec está localizada em Maracanaú e o mapa *web* construído compreende apenas as vias da cidade de Fortaleza será adicionado 5 km ao resultado apresentado por cada rota, quilometragem esta, correspondente à distância entre sua sede (destino real) e o ponto extremo do mapa mais próximo à empresa (destino fictício);

- Cada ponto de parada de ônibus está associado a apenas uma rota, ou seja, duas ou mais rotas não compartilham um mesmo ponto de parada.

É almejado neste trabalho, os seguintes critérios de otimização:

- Minimizar o número de rotas: já que o preço cobrado é fixo e por ônibus, o custo em se inserir mais um veículo é maior do que o custo em se percorrer uma rota mais longa com o mesmo quantitativo de ônibus;

- Balanceamento de funcionários: respeitando a capacidade dos ônibus, equilibrar a quantidade de funcionários a serem transportados entre os ônibus, evitando assim, excesso de passageiros ou ociosidade de lugares nos veículos ao longo de cada rota;

- Distância percorrida pelo funcionário: estabelecer os locais dos pontos de parada de ônibus, aos quais os empregados são alocados, de modo que minimize a distância que devem percorrer a partir de suas residências.

Para esse último critério, objetivando uma melhor qualidade na prestação do transporte ao empregado foi estabelecida uma distância máxima de 800 metros a ser percorrida pelos funcionários até o ponto de parada ao qual foram alocados. Procurou-se garantir também imparcialidade na solução apresentada, evitando um clima organizacional adverso na empresa provocado pelo favorecimento de alguns funcionários em detrimento a outros.

Em relação ao mapa de Fortaleza construído adotando a tecnologia SVG, as informações sobre o sentido das vias são identificadas da seguinte maneira:

- Segmentos (retas) com a cor vermelha: indicam vias com único sentido de direção;
- Trechos com a cor cinza: indicam vias com tráfego permitido em ambos os sentidos.

4.3 Resultados numéricos obtidos

Visando a resolução do problema de transporte de passageiros sob regime de fretamento contínuo, realizou-se a implementação computacional dos algoritmos expostos no capítulo 3. Para cada turno de trabalho, aplicou-se as três estratégias dissertadas e os resultados computacionais obtidos em cada turno são apresentados logo a seguir.

Como a empresa está localizada no município de Maracanaú, adjacente a cidade de Fortaleza, o mapa *web* não contempla suas vias, sendo assim, foi utilizado como ponto de destino fictício das rotas, o trecho de rua no mapa mais próximo a Maracanaú e ao resultado obtido em cada rota, adicionou-se cinco quilômetros referentes ao percurso entre os destinos fictício e real (Esmaltec).

4.3.1 Segundo turno (horário comercial)

A Figura 21 apresenta a distribuição espacial, no município de Fortaleza, das residências dos funcionários do turno comercial, da garagem (origem das rotas) e do ponto mais próximo à empresa (destino fictício).

Dentre os 795 trabalhadores transportados, que residem em Fortaleza, grande parte destes, 597 funcionários (Tabela 3), trabalham durante o horário comercial, compreendido das 07:00 às 17:00. Sob esse quantitativo do segundo turno laboral, as estratégias LAR (*location-allocation-routing*) e ARL (*allocation-routing-location*) foram executadas apresentando os resultados e ilustrações a seguir:



Figura 21 - Distribuição residencial dos funcionários do segundo turno

4.3.1.1 Estratégia LAR

Conforme relatado no capítulo 3, essa estratégia, influenciada pelo trabalho de Dulac et al. (1980), é composta por três etapas interdependentes. Cada etapa será exposta com seus respectivos resultados e ilustrações.

Etapa 1: Localização dos pontos de coleta e alocação dos funcionários aos pontos

Objetiva estabelecer pontos de parada de ônibus e alocar os passageiros a eles limitando o percurso até a parada a no máximo 800 metros. A quantidade máxima de funcionários alocados a um ponto corresponde à capacidade máxima de passageiros sentados no ônibus, ou seja, 42 pessoas.

A Figura 22 expõe os resultados atingidos com o algoritmo modificado de Kolesar e Walker. Foram obtidos 156 pontos de parada com os respectivos funcionários alocados a cada um deles (Tabela 4).

Através da execução do algoritmo de Dijkstra (1959), efetuaram-se os cálculos das distâncias mínimas reais do grafo não direcionado completo, cujos vértices são as residências dos funcionários e as arestas, as vias de Fortaleza. Foram consumidos para isso, 2.182,22 segundos (36,37 minutos) e para o algoritmo de Kolesar e Walker foram transcorridos 0,17 segundos.

Pt. parada	Nº. de func.	Pt. parada	Nº. de func.	Pt. parada	Nº. de func.
1	2	53	1	105	1
2	1	54	1	106	28
3	3	55	1	107	17
4	1	56	1	108	1
5	6	57	2	109	1
6	1	58	1	110	1
7	1	59	9	111	1
8	1	60	4	112	7
9	7	61	1	113	1
10	1	62	1	114	1
11	1	63	3	115	1
12	1	64	2	116	1
13	1	65	2	117	1
14	1	66	1	118	1
15	2	67	4	119	1
16	2	68	1	120	1
17	1	69	1	121	1
18	6	70	4	122	1

19	1	71	1	123	1
20	2	72	1	124	1
21	1	73	1	125	2
22	1	74	2	126	1
23	1	75	2	127	1
24	1	76	1	128	1
25	1	77	1	129	1
26	3	78	4	130	1
27	2	79	2	131	3
28	5	80	1	132	2
29	3	81	15	133	5
30	1	82	10	134	1
31	1	83	1	135	2
32	9	84	7	136	1
33	1	85	6	137	1
34	10	86	31	138	1
35	5	87	2	139	1
36	1	88	10	140	1
37	9	89	33	141	1
38	2	90	3	142	1
39	2	91	13	143	1
40	2	92	2	144	1
41	3	93	17	145	1
42	1	94	35	146	1
43	2	95	2	147	1
44	4	96	42	148	1
45	1	97	1	149	1
46	1	98	42	150	2
47	4	99	2	151	2
48	2	100	8	152	2
49	1	101	2	153	1
50	1	102	1	154	2
51	1	103	9	155	2
52	7	104	1	156	1

Tabela 4 - Distribuição de freqüência do número de funcionários por ponto de parada.

Na Tabela 5, segue um relatório contendo informações mais detalhadas (distância percorrida pelo funcionário até a parada, distância acumulada) sobre o ponto de parada 89, que contém os funcionários identificados pelo nome da rua onde residem:

Funcionário	Distância (m)	Distância Acumulada (m)
Residência 1: ru rosa leite oliveira	555	555
Residência 2: ru otavio paranhos	477	1032
Residência 3: ru rosa leite oliveira	718	1750
Residência 4: ru otavio paranhos	637	2387
Residência 5: ru misericordia	557	2944
Residência 6: ru rosa leite oliveira	672	3616
Residência 7: ru rio araguaia (Ponto de parada)	163	3779
Residência 8: ru maria clara	221	4000
Residência 9: ru gaudioso carvalho	221	4221
Residência 10: ru alberto ferreira	732	4953
Residência 11: ru eretides alencar	513	5466
Residência 12: ru rio araguaia	328	5794
Residência 13: ru rio paraguai	723	6517
Residência 14: ru jose acioly	524	7041
Residência 15: ru rio tocantins	570	7611
Residência 16: ru rio araguaia	425	8036
Residência 17: ru altaneira	441	8477
Residência 18: ru maria clara	381	8858
Residência 19: ru raimundo bizarria	613	9471
Residência 20: ru raimundo bizarria	441	9912
Residência 21: ru altaneira	345	10257
Residência 22: tr antenor almeida	572	10829
Residência 23: vl silveira	470	11299
Residência 24: ru consolação	316	11615
Residência 25: ru eretides alencar	418	12033
Residência 26: ru carnaúbas	576	12609
Residência 27: ru pitanga (d26)	531	13140
Residência 28: tr jose de alencar (d25)	388	13528
Residência 29: tr rincão	449	13977
Residência 30: tr pitanga (d26)	531	14508
Residência 31: av maj assis	659	15167
Residência 32: r joao ximenes	769	15936
Residência 33: ru pitanga (d26)	618	16554

Tabela 5 - Relatório do ponto de parada 89

Otimização de Rotas - Windows Internet Explorer

http://localhost:82/transpas/Default.aspx

Google

Otimização de Rotas

Selezione trechos de rua no mapa [clique aqui](#) para saber as teclas funcionais

Resultado

Kolesar e Walker modificado

Grp. 1: Pt. prd. 1 Grp. 1: Pt. prd. 2 Grp. 1: Pt. prd. 3 Grp. 1: Pt. prd. 4

Grp. 1: Pt. prd. 5 Grp. 1: Pt. prd. 6 Grp. 1: Pt. prd. 7 Grp. 1: Pt. prd. 8

Relatório de Ponto de Parada de Ônibus - Windows Inte...

http://localhost:82/transpas/relPontoParada.aspx?ptInicial=547750.436156-415849

Residência 1: r estrelinha	82m	82m
Cluster 1 - Pt. de Parada 154	Distância	Dist. Acumulada
Residência 1: ru rosa cordeiro	149m	149m
Residência 2: ru rosa cordeiro	199m	348m
Cluster 1 - Pt. de Parada 155	Distância	Dist. Acumulada
Residência 1: ru osvaldo araujo	152m	152m
Residência 2: ru osvaldo araujo	152m	304m
Cluster 1 - Pt. de Parada 156	Distância	Dist. Acumulada
Residência 1: ru renato braga	111m	111m

Distância total percorrida pelos funcionários: 257626m

Selezione os trechos:

Origem: AV CARNEIRO DE MENDC

Destino: AV GODOFREDO MACIEL

Legenda:

- Origem
- Destino
- Ponto Parada
- Residência
- Ponto-Base

Escolha a estratégia:

Estratégia LAR

Escolha o passo da

Internet 100%

PT

12:50

terça-feira

20/2/2007

Figura 22 – Visualização no mapa dos resultados obtidos na etapa 1 da estratégia LAR

Etapa 2: Roteamento dos ônibus

Para esta fase, foram implementadas três heurísticas de roteamento adaptadas: vizinho mais próximo, Clarke e Wright paralelo e inserção mais distante. Elas são responsáveis por especificar as rotas dos ônibus que passam pelos pontos de coleta definidos pela etapa anterior.

Visando limitar a distância percorrida por todos os ônibus foi estabelecida a velocidade média e o tempo de duração da rota em, respectivamente, 60km/h e 60min, assim, é determinada a distância máxima do percurso (60km) multiplicando-se a velocidade pelo tempo. A Figura 23 exibe o resultado do algoritmo Clarke e Wright paralelo, que apresentou a melhor solução entre as heurísticas de roteamento, sabendo da capacidade máxima dos veículos de 42 funcionários sentados.

Os tempos de execução, a distância total percorrida e o número de veículos utilizados por cada heurística são apresentados na Tabela 6 a seguir, para comparação. O cálculo das distâncias mínimas reais do grafo direcionado completo cujos nós são os pontos de parada de ônibus e os arcos, as vias de Fortaleza exigiram 441,36 segundos (7,36 minutos).

Heurística	Nº. de rotas	Distância total (m)	Tempo de execução (s)
Vizinho mais próximo	21	643.472	0,01
Inserção mais distante	25	1.117.477	0,01
Clarke-Wright paralelo	15	501.539	1,00

Tabela 6 - Resultados das heurísticas de roteamento de veículos na estratégia LAR

Otimização de Rotas - Windows Internet Explorer
 http://localhost:82/transpas/Default.aspx

Percurso da Rota - Windows Internet Explorer
 http://localhost:82/transpas/percursoRota.aspx?ptInicial=547750.436156-415849.1

ru bar aratanha	318m	42872m
av luciano carneiro	512m	43384m
av eduardo girao	496m	43880m
av dos expedicionarios	197m	44077m
ru antonio mendes	288m	44365m
ru damasceno girao	263m	44628m
ru alberto magno	2503m	47131m
ru elcias lopes	43m	47174m
tr vila azul	103m	47277m
ru colombo	230m	47507m
et ferrovia de carga	394m	47901m
ru germano franck	558m	48459m
	1163m	49622m
av godofredo maciel	6148m	55770m

Distância total percorrida pelos veículos: 501539m

Concluído

Selecione os trechos:
 Origem: AV CARNEIRO DE MENDC
 Destino: AV GODOFREDO MACIEL

Legenda:
 ● Origem 🚌 Ponto Parada
 ● Destino 🏠 Residência
 ● Ponto-Base

Escolha a estratégia:
 Estratégia LAR

Escolha o passo da estratégia:
 Etapa2: Rotear CW

Resultado
Clarke-Wright Paralelo

<input type="checkbox"/> Grp. 1: Rt. 1 - 25548m	<input type="checkbox"/> Rota 2 - 28009m	<input type="checkbox"/> Rota 3 - 20944m	<input type="checkbox"/> Rota 4 - 32195m
<input type="checkbox"/> Rota 5 - 29083m	<input type="checkbox"/> Rota 6 - 54609m	<input type="checkbox"/> Rota 7 - 52952m	<input type="checkbox"/> Rota 8 - 32891m
<input type="checkbox"/> Rota 9 - 22045m	<input type="checkbox"/> Rota 10 - 25183m	<input type="checkbox"/> Rota 11 - 28741m	<input type="checkbox"/> Rota 12 - 29837m
<input type="checkbox"/> Rota 13 - 28847m	<input type="checkbox"/> Rota 14 - 28273m	<input type="checkbox"/> Rota 15 - 55639m	<input checked="" type="checkbox"/> Total

16:51
 terça-feira
 20/2/2007

Figura 23 - Visualização no mapa dos resultados obtidos na etapa 2 da estratégia LAR

Etapa 3: Melhoria das rotas

Com a aplicação da heurística *3-optimal* foi possível diminuir o percurso em algumas rotas, totalizando uma economia de aproximadamente 8,5 km (1,72%) no algoritmo de Clarke e Wright paralelo. A Tabela 7 ilustra o tempo de execução, a economia, o percurso total e o número de rotas estabelecidas com a utilização do algoritmo de melhoria de rota a partir das rotas obtidas por cada heurística do passo anterior.

Heurística	Nº. rotas	Dist. total (m)	Economia (m)	Economia (%)	Tempo de execução (s)
3-opt sob vizinho mais próximo	21	640.693	2.779	0,43	0,06
3-opt sob inserção mais distante	25	1.117.477	0	0,00	0,01
3-opt sob Clarke-Wright paralelo	15	493.054	8.485	1,72	0,08

Tabela 7 - Resultados da heurística de melhoria de rota na estratégia LAR

Otimização de Rotas - Windows Internet Explorer
 http://localhost:82/transpas/Default.aspx

Percurso da Rota - Windows Internet Explorer
 http://localhost:82/transpas/percursoRota.aspx?ptInicial=547750.436156-41584

ru bar aratanha	318m	42872m
av luciano carneiro	512m	43384m
av eduardo girao	496m	43880m
av dos expedicionarios	197m	44077m
ru antonio mendes	288m	44365m
ru damasceno girao	263m	44628m
ru alberto magno	2503m	47131m
ru elcias lopes	43m	47174m
tr vila azul	103m	47277m
ru colombo	230m	47507m
et ferrovia de carga	394m	47901m
ru germano frank	558m	48459m
	1163m	49622m
av godofredo maciel	6148m	55770m

Distância total percorrida pelos veículos: 493054m

Seleção de origem e destino:
 Origem: AV CARNEIRO DE MENDC
 Destino: AV GODOFREDO MACIEL

Legenda:
 Origen (Green circle), Destino (Red circle), Ponto Parada (Bus icon), Residência (House icon), Ponto-Base (Black circle)

Resultado: Clarke-Wright Paralelo

<input type="checkbox"/> Grp. 1: Rt. 1 - 25548m	<input type="checkbox"/> Rota 2 - 39006m	<input type="checkbox"/> Rota 3 - 20944m	<input type="checkbox"/> Rota 4 - 32195m
<input type="checkbox"/> Rota 5 - 29083m	<input type="checkbox"/> Rota 6 - 54509m	<input type="checkbox"/> Rota 7 - 46831m	<input type="checkbox"/> Rota 8 - 32891m
<input type="checkbox"/> Rota 9 - 22045m	<input type="checkbox"/> Rota 10 - 25183m	<input type="checkbox"/> Rota 11 - 28741m	<input type="checkbox"/> Rota 12 - 27476m

Escolha a estratégia: Estratégia LAR
 Escolha o passo da estratégia: Etapa3: Rotear CW - 3opt

Trecho: X: , Y:

17:08
 terça-feira
 20/2/2007

Figura 24 - Visualização no mapa dos resultados obtidos na etapa 3 da estratégia LAR

À distância total (fictícia) foi adicionado 75km representando o acréscimo de 5km em cada rota, que corresponde a distância aproximada entre o ponto de destino fictício e a Esmaltec (Tabela 8). Finalmente, a Figura 24 expõe o melhor resultado atingido na estratégia LAR, resultado este, proporcionado pela heurística Clarke e Wright paralelo e o algoritmo 3-*opt*.

Rotas	Nº. pts. de prod.	Nº. de func.	Distância fictícia (m)	Distância real (m)
Rota 1	5	41	25.548	30.548
Rota 2	12	27	39.006	44.006
Rota 3	6	41	20.944	25.944
Rota 4	16	42	32.195	37.195
Rota 5	6	42	29.083	34.083
Rota 6	22	42	54.509	59.509
Rota 7	17	28	46.831	51.831
Rota 8	13	42	32.891	37.891
Rota 9	4	42	22.045	27.045
Rota 10	1	42	25.183	30.183
Rota 11	10	42	28.741	33.741
Rota 12	15	40	27.476	32.476
Rota 13	7	42	28.817	33.817
Rota 14	1	42	23.273	28.273
Rota 15	21	42	55.672	60.672
Total	156	597	493.054	568.054

Tabela 8 - Distâncias fictícias e reais de cada rota na estratégia LAR

4.3.1.2 Estratégia ARL

Influenciada pelo trabalho de Chapleau et al. (1980), essa estratégia é constituída por quatro etapas que se relacionam e serão expostas a seguir, com seus resultados e ilustrações.

Etapa 1: Formação dos agrupamentos (*clusters*) de funcionários

Procura alocar os trabalhadores em *clusters* com a execução das heurísticas de Teitz e Bart, juntamente com Gillett e Johnson, de modo que cada grupo formado utilize apenas um ônibus para o transporte, ou seja, cada grupo possua no máximo

42 pessoas. Com isso, e de acordo com o cálculo efetuado para a determinação do número de agrupamentos, 15 ônibus são necessários para satisfazer a demanda.

A Figura 25 ilustra os 15 *clusters* obtidos. Foram despendidos 2.314,12 segundos para a formação da matriz de distâncias mínimas do grafo direcionado completo cujos vértices são as residências dos trabalhadores e as arestas as vias da capital, além de 24,23 segundos para a heurística de Teitz e Bart e 0,02 segundos para o algoritmo de Gillett e Johnson.

Grupos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Número de funcionários	42	26	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	25	42	42

Tabela 9 - Distribuição do quantitativo de funcionários alocados em cada *cluster* na estratégia ARL

A Tabela 9 discrimina a quantidade de funcionários distribuída em cada grupo formado. Como ocorrem entre os processos de cada estratégia, os resultados servirão de entrada para a etapa seguinte.

Otimização de Rotas - Windows Internet Explorer
 http://localhost:82/transpas/Default.aspx

Relatório do Agrupamento de Funcionários - Windows I...
 http://localhost:82/transpas/relCluster.aspx?ptInicial=547750.436156-415849.16

Cluster 15

- Residência 1: ru primeiro de maio d34
- Residência 2: ru car arco verde
- Residência 3: ru dor hugo rocha
- Residência 4: av 20 de janeiro
- Residência 5: ru araquem
- Residência 6: ru araquem
- Residência 7: ru caubi
- Residência 8: ru estevao de campos
- Residência 9: av francisco sa
- Residência 10: ru 24 de junho
- Residência 11: tr sao roque (d23)

Seleção dos trechos:
 Origem: AV CARNEIRO DE MENDC
 Destino: AV GODOFREDO MACIEL

Legenda:
 Origem (Green Circle), Destino (Red Circle), Ponto Parada (Bus Icon), Residência (House Icon), Ponto-Base (Black Circle)

Escolha a estratégia:
 Estratégia ARL

Escolha o passo da estratégia:
 Etapa1: Formar Cluster TBGJ

Resultado
 Teitz-Bart

Cluster 1
 Cluster 2
 Cluster 3
 Cluster 4
 Cluster 5
 Cluster 6
 Cluster 7
 Cluster 8
 Cluster 9
 Cluster 10
 Cluster 11
 Cluster 12
 Cluster 13
 Cluster 14
 Cluster 15
 Todos clusters

19:48
 terça-feira
 20/2/2007

Figura 25 - Visualização no mapa dos resultados obtidos na etapa 1 da estratégia ARL

Etapa 2: Localização dos pontos de coleta e alocação dos funcionários aos pontos

Nessa fase, a alocação dos funcionários aos pontos de coleta e a determinação dos próprios pontos são alcançados, para cada grupo formado, através do algoritmo de Kolesar e Walker modificado. Limitou-se o percurso máximo do funcionário até o ponto de parada à distância de 800 metros.

Grupos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Pontos parada	14	12	15	22	15	7	5	4	4	1	4	11	22	18	14

Tabela 10 - Distribuição do número de pontos de parada de acordo com os grupos determinados pela estratégia ARL

Com o tempo de execução de 0,01 segundos, obteve-se 168 pontos de coleta distribuídos entre os 15 *clusters* conforme a Tabela 10. A Figura 26 apresenta o resultado no *browser web*.

Otimização de Rotas - Windows Internet Explorer

http://localhost:82/transpas/Default.aspx

Google

Otimização de Rotas



Trecho: X: , Y:

Resultado

Kolesar e Walker modificado

Grp. 1: Pt. prd. 1
 Grp. 1: Pt. prd. 2
 Grp. 1: Pt. prd. 3
 Grp. 1: Pt. prd. 4
 Grp. 1: Pt. prd. 5
 Grp. 1: Pt. prd. 6
 Grp. 1: Pt. prd. 7
 Grp. 1: Pt. prd. 8
 Grp. 1: Pt. prd. 9
 Grp. 1: Pt. prd. 10
 Grp. 1: Pt. prd. 11
 Grp. 1: Pt. prd. 12

Relatório de Ponto de Parada de Ônibus - Windows Inte...

http://localhost:82/transpas/relPontoParada.aspx?ptInicial=547750.436156-415

Cluster 14 - Pt. de Parada 14	Distância	Dist. Acumulada
Residência 1: ru rosa cordeiro	149m	149m
Residência 2: ru rosa cordeiro	199m	348m
Cluster 15 - Pt. de Parada 1	Distância	Dist. Acumulada
Residência 1: av francisco sa	451m	451m
Residência 2: ru sao bernardo	117m	568m
Residência 3: av francisco sa	275m	843m
Residência 4: av francisco sa	315m	1158m
Cluster 15 - Pt. de Parada 2	Distância	Dist. Acumulada
Residência 1: ru bem aventuraanca	692m	692m
Residência 2: ru primeiro de maio	751m	1443m

Concluído

Internet 100%

Selecione os trechos:

Origem: AV CARNEIRO DE MENDC

Destino: AV GODOFREDO MACIEL

Legenda:

Origem
 Ponto Parada
 Destino
 Residência
 Ponto-Base

Escolha a estratégia:

Estratégia ARL

Escolha o passo da estratégia:

Etapa2: Alocar Funcionário

PT

22:55
terça-feira
20/2/2007

Figura 26 - Visualização no mapa dos resultados obtidos na etapa 2 da estratégia ARL

Etapa 3: Roteamento dos ônibus

Nessa fase da estratégia, em cada um dos agrupamentos, definiu-se uma ordem para visitação dos pontos de parada. Para cada uma das heurísticas de roteamento de veículos executadas foram formadas 15 rotas iniciais.

Heurística	Nº. de rotas	Distância total (m)	Tempo de execução (s)
Vizinho mais próximo	15	604.341	0,01
Inserção mais distante	15	547.294	0,01
Clarke-Wright paralelo	15	584.998	0,05

Tabela 11 - Resultados das heurísticas de roteamento de veículos na estratégia ARL

Na Tabela 11, as distâncias totais até o ponto de destino fictício e os tempos computacionais dos algoritmos aproximativos de roteamento executados são expostos, tendo a heurística de inserção mais distante apresentado o melhor resultado. Para a formação da matriz de distâncias mínimas reais do grafo direcionado completo cujos nós são os pontos de parada de ônibus e os arcos, as vias de Fortaleza exigiram 134,42 segundos.

Etapa 4: Melhoria das rotas

Com a aplicação do algoritmo *3-opt* visando melhorar as rotas traçadas na etapa anterior, obteve-se os resultados apresentados na Tabela 12 (o tempo de execução apresentado é em relação apenas ao algoritmo *3-opt*). Pode-se observar na heurística que proporcionou melhor resultado, quanto à distância total percorrida, que não se alcançou melhoramentos.

Heurística	Nº. rotas	Dist. total (m)	Economia (m)	Economia (%)	Tempo de execução (s)
3-opt sob vizinho mais próximo	15	596.458	7.883	1,32	0,14
3-opt sob inserção mais distante	15	547.294	0	0,00	0,07
3-opt sob Clarke-Wright paralelo	15	575.396	9.602	1,67	0,34

Tabela 12 - Resultados da heurística de melhoria de rota 3-opt na estratégia ARL

A Figura 27 exhibe os resultados obtidos com as heurísticas de inserção mais distante e 3-optimal. É exposto também, na Tabela 13, as distâncias fictícias e reais atingidas pelo percurso de cada rota.

Rotas	Nº. pts. de prod.	Nº. de func.	Distância fictícia (m)	Distância real (m)
Rota 1	14	42	39.510	44.510
Rota 2	12	26	44.768	49.768
Rota 3	15	42	38.749	43.749
Rota 4	22	42	43.611	48.611
Rota 5	15	42	32.419	37.419
Rota 6	7	42	26.159	31.159
Rota 7	5	42	26.926	31.926
Rota 8	4	42	20.683	25.683
Rota 9	4	42	23.514	28.514
Rota 10	1	42	25.611	30.611
Rota 11	4	42	25.132	30.132
Rota 12	11	42	33.329	38.329
Rota 13	22	25	64.960	69.960
Rota 14	18	42	44.173	49.173
Rota 15	14	42	57.326	62.326
Total	168	597	547.294	622.294

Tabela 13 - Distâncias fictícias e reais de cada rota na estratégia ARL

Otimização de Rotas - Windows Internet Explorer
 http://localhost:82/transpas/Default.aspx

Percurso da Rota - Windows Internet Explorer
 http://localhost:82/transpas/percursoRota.aspx?ptInicial=547750.436156-4158

Cluster 15 - Rota 1	Distância	Distância Acumulada
av carneiro de mendonca		
av carneiro de mendonca	210m	210m
	2677m	2887m
av eng humberto monte	265m	3152m
av gov parsifal barroso	1079m	4231m
av dor theberge	355m	4586m
ru luis guimaraes	122m	4708m
ru virgilio brigido	8m	4716m
ru luis guimaraes	96m	4812m
av ten lisboa	129m	4941m
ru dor hugo rocha	744m	5685m
ru sao bernardo	38m	5723m
ru sao bernardo	117m	5840m
4 funcionário(s) alocado(s)		
ru dna mendinha	164m	6004m
ru dor hugo rocha	151m	6155m

Seleção dos trechos:
 Origem: AV CARNEIRO DE MENDC
 Destino: AV GODOFREDO MACIEL

Legenda:
 Origem (Green circle), Destino (Red circle), Ponto Parada (Bus icon), Residência (House icon), Ponto-Base (Red dot)

Escolha a estratégia:
 Estratégia ARL

Escolha o passo da estratégia:
 Etapa4: Rotear IMD - 3opt

Resultado

Inserção mais Distante - IMD			
<input type="checkbox"/> Grp. 1: Rt. 1 - 46446m	<input type="checkbox"/> Grp. 2: Rt. 1 - 49903m	<input type="checkbox"/> Grp. 3: Rt. 1 - 49211m	<input type="checkbox"/> Grp. 4: Rt. 1 - 43609m
<input type="checkbox"/> Grp. 5: Rt. 1 - 32562m	<input type="checkbox"/> Grp. 6: Rt. 1 - 26211m	<input type="checkbox"/> Grp. 7: Rt. 1 - 23266m	<input type="checkbox"/> Grp. 8: Rt. 1 - 22825m

Figura 27 - Visualização no mapa dos resultados obtidos na etapa 4 da estratégia ARL

4.3.1.3 Variação da estratégia ARL

A mudança que essa variação da estratégia ARL apresenta em relação à metodologia aplicada na seção anterior, ocorre no algoritmo aproximativo implementado para determinar a alocação dos passageiros em grupos (etapa 1). As etapas restantes seguem o mesmo roteiro.

Etapa 1: Formação dos agrupamentos (*clusters*) de funcionários

Os passageiros são divididos em grupos através da aplicação da heurística de Gillett e Miller. Os *clusters* possuem no máximo 42 pessoas (número de assentos do ônibus).

A Figura 28 ilustra os 15 *clusters* obtidos. Foram despendidos 25,72 segundos para a obtenção dos resultados da heurística de Gillett e Miller. Na Tabela 14, pode-se observar a distribuição dos funcionários em cada grupo formado.

Grupos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Número de funcionários	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	9

Tabela 14 - Distribuição do quantitativo de funcionários alocados em cada *cluster* na variação da estratégia ARL

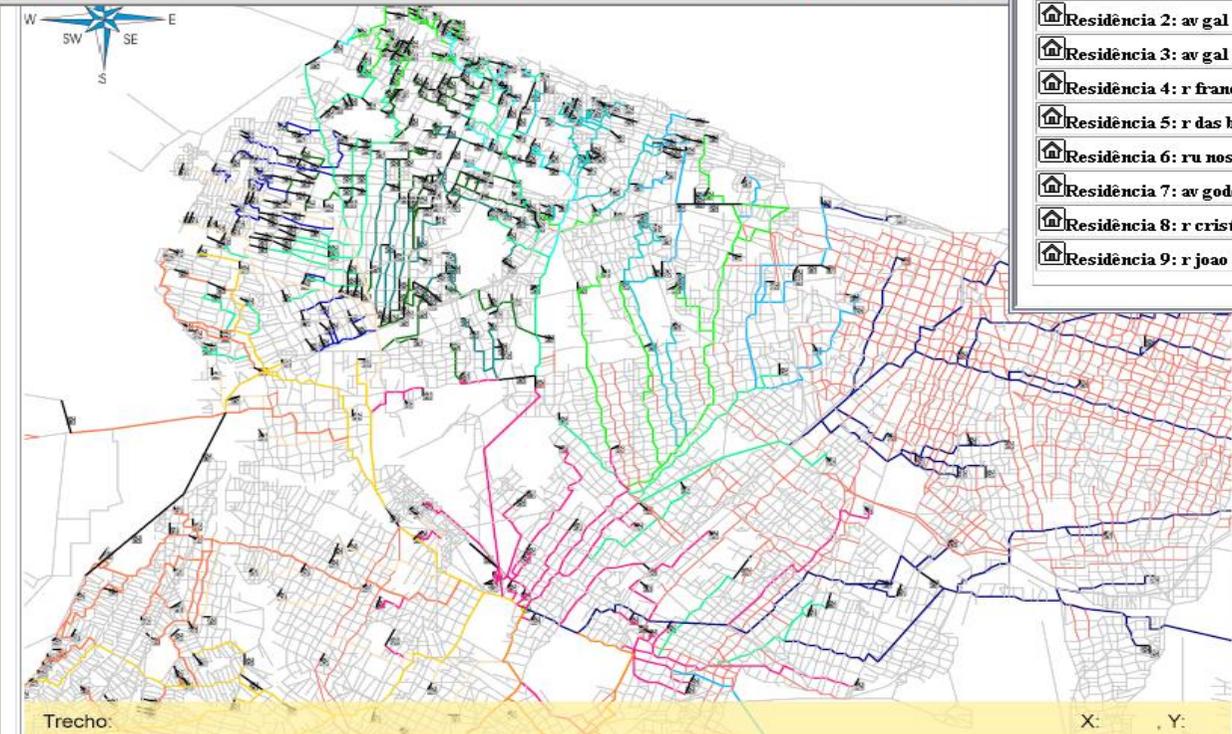
As etapas seguintes são idênticas às apresentadas pela metodologia da seção anterior desse trabalho. Os resultados computacionais referentes aos tempos de execução e distância percorrida, além de ilustrações dos melhores resultados das heurísticas implementadas serão expostos a seguir.

Otimização de Rotas - Microsoft Internet Explorer

Arquivo Editar Exibir Favoritos Ferramentas Ajuda

Endereço <http://localhost:82/transpas/Default.aspx>

Google



W SW SE E

Trecho: X: Y:

Resultado

Gillett-Miller

Cluster 1
 Cluster 2
 Cluster 3
 Cluster 4
 Cluster 5
 Cluster 6

Cluster 7
 Cluster 8
 Cluster 9
 Cluster 10
 Cluster 11
 Cluster 12

Cluster 13
 Cluster 14
 Cluster 15
 Todos clusters

Visualizar

Relatório do Agrupamento de Funcionários - Microsoft I...

Residência 40: av j c j ceara

Residência 41: ru manuel galdino

Residência 42: ru b

Cluster 15

Residência 1: ru con castro

Residência 2: av gal osorio de paiva

Residência 3: av gal osorio de paiva

Residência 4: r francisco machado

Residência 5: r das belas

Residência 6: ru nossa sra aparecida

Residência 7: av godofredo maciel

Residência 8: r cristovao melo

Residência 9: r joao ramos

2º Turno Recuperar

Excluir Atualizar BD

Selecione os trechos:

Origem: AV CARNEIRO DE MENDC

Destino: AV GODOFREDO MACIEL

Legenda:

Origem
 Ponto Parada

Destino
 Residência

Ponto-Base

Escolha a estratégia:

Variação Estratégia ARL

Escolha o passo da estratégia:

Etapa1: Formar Cluster GM

Intranet local

PT

15:24

sábado

12/8/2006

Figura 28 - Visualização no mapa dos resultados obtidos na etapa 1 da variação da estratégia ARL

Etapa 2: Localização dos pontos de coleta e alocação dos funcionários aos pontos

Respeitando um percurso máximo de 800 metros da residência dos funcionários até os pontos de coleta, foram estabelecidos 195 pontos de parada de ônibus com a aplicação da heurística modificada de Kolesar e Walker. A Tabela 15 mostra a distribuição desses pontos por *cluster*.

Grupos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Pontos parada	28	24	7	5	4	4	6	5	6	16	19	24	16	27	4

Tabela 15 - Distribuição dos pontos de parada de acordo com os grupos determinados pela variação da estratégia ARL

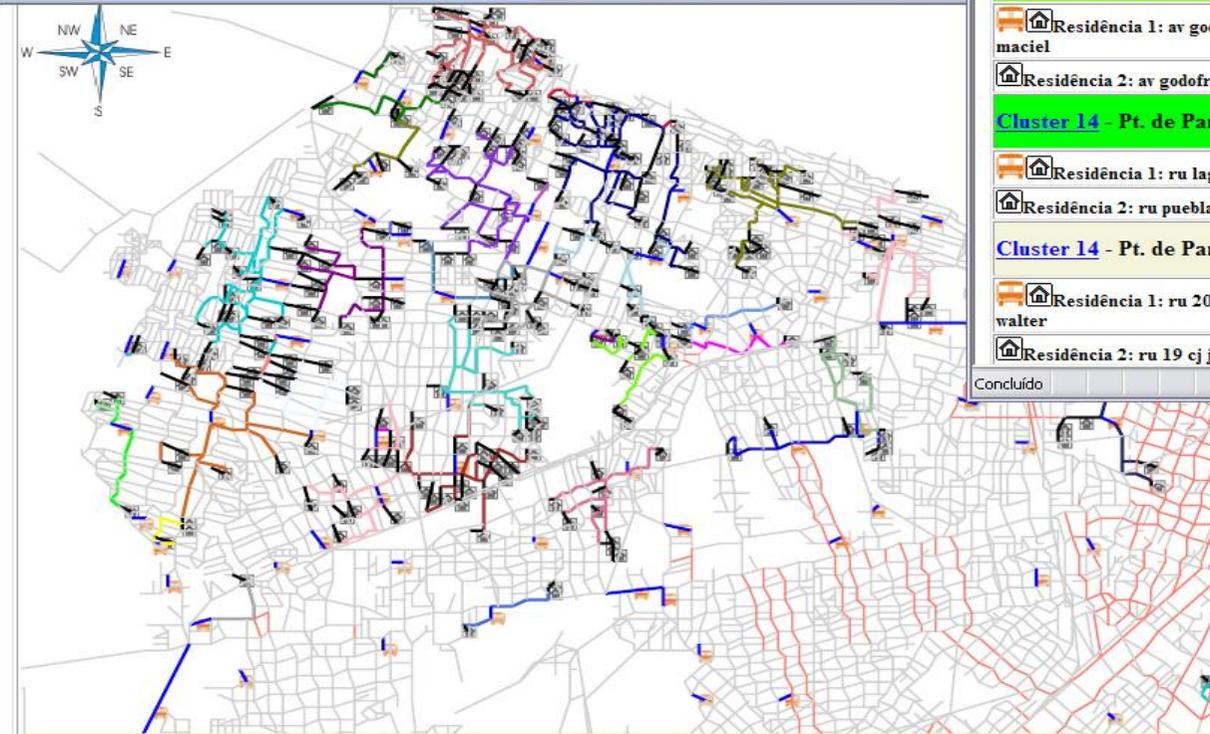
Foram despendidos 541,30 segundos para a formação da matriz de distâncias mínimas reais do grafo não direcionado completo cujos vértices são as residências dos funcionários e as arestas, as vias de Fortaleza. Já para a heurística de Kolesar e Walker foram gastos 0,01 segundos. A Figura 29 exhibe os pontos de coleta com seus respectivos funcionários alocados.

Otimização de Rotas - Windows Internet Explorer

http://localhost:82/transpas/Default.aspx

Google

Otimização de Rotas



Relatório de Ponto de Parada de Ônibus - Windows Inte...

http://localhost:82/transpas/relPontoParada.aspx?ptInicial=547750.436156-415

Residência 1: ru delta	77m	77m
Cluster 14 - Pt. de Parada 11	Distância	Dist. Acumulada
Residência 1: av godofredo maciel	112m	112m
Residência 2: av godofredo maciel	423m	535m
Cluster 14 - Pt. de Parada 12	Distância	Dist. Acumulada
Residência 1: ru lago azul	188m	188m
Residência 2: ru puebla	241m	429m
Cluster 14 - Pt. de Parada 13	Distância	Dist. Acumulada
Residência 1: ru 20 cj jose walter	46m	46m
Residência 2: ru 19 cj jose walter	349m	395m

Concluído

Internet 100%

Selecione os trechos:

Origem: AV CARNEIRO DE MENDC

Destino: AV GODOFREDO MACIEL

Legenda:

- Origem
- Destino
- Ponto Parada
- Residência
- Ponto-Base

Escolha a estratégia:

Variação Estratégia ARL

Escolha o passo da estratégia:

Etapa2: Alocar Funcionário

Trecho: X: Y:

Resultado

Kolesar e Walker modificado

- Grp. 1: Pt. prd. 1
- Grp. 1: Pt. prd. 2
- Grp. 1: Pt. prd. 3
- Grp. 1: Pt. prd. 4
- Grp. 1: Pt. prd. 5
- Grp. 1: Pt. prd. 6
- Grp. 1: Pt. prd. 7
- Grp. 1: Pt. prd. 8
- Grp. 1: Pt. prd. 9
- Grp. 1: Pt. prd. 10
- Grp. 1: Pt. prd. 11
- Grp. 1: Pt. prd. 12

Internet 100%

00:01 quarta-feira 21/2/2007

Figura 29 - Mapa dos resultados oriundos da etapa 2 da variação da estratégia ARL

Etapa 3: Roteamento dos ônibus

Como pode ser observado na Tabela 16, o algoritmo aproximativo inserção mais distante apresentou o menor percurso total para a coleta dos funcionários. Com o tempo computacional de 147,85 segundos, formou-se a matriz de distâncias mínimas do grafo direcionado completo cujos vértices são os pontos de coleta dos funcionários em cada grupo e as arestas, as ruas e avenidas de Fortaleza.

Heurística	Nº. de rotas	Distância total (m)	Tempo de execução (s)
Vizinho mais próximo	15	637.481	0,01
Inserção mais distante	15	590.515	0,01
Clarke-Wright paralelo	15	626.333	0,06

Tabela 16 - Resultados das heurísticas de roteamento de veículos na variação da estratégia ARL

Etapa 4: Melhorias das rotas

Com a execução da heurística 3-optimal sob as rotas obtidas dos algoritmos de roteamento, contatou-se uma economia mais significativa (1,01%) nos trajetos alcançados a partir da heurística Clarke-Wright paralelo (Tabela 17). Entretanto, o melhor resultado foi alcançado sob as rotas traçadas com o algoritmo inserção mais distante.

Heurística	Nº. rotas	Dist. total (m)	Economia (m)	Economia (%)	Tempo de execução (s)
3-opt sob vizinho mais próximo	15	635.648	1.833	0,29	0,18
3-opt sob inserção mais distante	15	590.315	200	0,03	0,19
3-opt sob Clarke-Wright paralelo	15	620.073	6.260	1,01	0,49

Tabela 17 - Resultados da heurística de melhoria de rota 3-opt na variação da estratégia ARL

As melhores rotas alcançadas com essa estratégia são expostas na Tabela 18 com suas distâncias fictícias e reais. A Figura 30 visualiza o mapa com os resultados obtidos com as heurísticas: inserção mais distante e 3-optimal.

Rotas	Nº. pts. de prod.	Nº. de func.	Distância fictícia (m)	Distância real (m)
Rota 1	28	42	76.668	81.668
Rota 2	24	42	72.725	77.725
Rota 3	7	42	26.577	31.577
Rota 4	5	42	33.981	38.981
Rota 5	4	42	26.736	31.736
Rota 6	4	42	25.744	30.744
Rota 7	6	42	24.364	29.364
Rota 8	5	42	25.800	30.800
Rota 9	6	42	26.939	31.939
Rota 10	16	42	41.266	46.266
Rota 11	19	42	39.196	44.196
Rota 12	24	42	45.751	50.751
Rota 13	16	42	42.941	47.941
Rota 14	27	42	62.788	67.788
Rota 15	4	9	18.595	23.595
Total	195	597	590.315	665.315

Tabela 18 - Distâncias fictícias e reais de cada rota na variação da estratégia ARL

The screenshot displays a web application interface for route optimization. It consists of two main browser windows and a central map area.

Percurso da Rota - Windows Internet Explorer (Right Window):

r sao jorge	199m	15703m
ru 4 de outubro	356m	16059m
r juvencio porfirio sales	301m	16360m
r luiz porfirio sales	239m	16599m
r hercules de miranda	409m	17008m
ru ana brito	99m	17107m
vl valencia	96m	17203m
ru dor procopio	192m	17395m
tr jacunauba	57m	17452m
ru jatai d= 71	282m	17734m
av godofredo maciel	624m	18358m
av godofredo maciel 4 funcionário(s) alocado(s)		
av godofredo maciel	236m	18594m
av godofredo maciel		

Distância total percorrida pelos veículos: 590315m

Otimização de Rotas - Windows Internet Explorer (Left Window):

Mapa de ruas com rotas coloridas (verde, amarelo, laranja, vermelho, azul) traçadas sobre a malha urbana. Um compasso indica as direções (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW).

Controles e Resultados:

- Seleção de trechos:** Origem: AV CARNEIRO DE MENDC; Destino: AV GODOFREDO MACIEL.
- Legenda:**
 - Origem (círculo verde)
 - Destino (círculo vermelho)
 - Ponto Parada (ônibus)
 - Residência (casa)
 - Ponto-Base (círculo preto)
- Escolha a estratégia:** Variação Estratégia ARL.
- Escolha o passo da estratégia:** Etapa4: Rotear IMD - 3oot.

Resultado (Bottom Left):

Inserção mais Distante - IMD

<input type="checkbox"/> Grp. 1: Rt. 1 - 76668m	<input type="checkbox"/> Grp. 2: Rt. 1 - 72725m	<input type="checkbox"/> Grp. 3: Rt. 1 - 26577m	<input type="checkbox"/> Grp. 4: Rt. 1 - 33981m
<input type="checkbox"/> Grp. 5: Rt. 1 - 26736m	<input type="checkbox"/> Grp. 6: Rt. 1 - 25744m	<input type="checkbox"/> Grp. 7: Rt. 1 - 24364m	<input type="checkbox"/> Grp. 8: Rt. 1 - 25800m

Figura 30 - Visualização no mapa dos resultados obtidos na etapa 4 da variação da estratégia ARL

4.3.2 Demais turnos

Para o primeiro, terceiro e quarto turnos de trabalho restantes na Esmaltec, adotou-se os mesmos procedimentos e restrições impostos no segundo turno laboral. A Tabela 19 expõe uma visão geral dos resultados computacionais alcançados em relação aos tempos de execução, o número de pontos de parada ou número de rotas (depende do tipo de resultado apresentado pela heurística), e a distância percorrida real, nas etapas de todas as estratégias, de acordo com o turno. Os valores apresentados expressam apenas os trajetos de coleta dos funcionários até a empresa.

Turno	Estratégia	Etapa	Algoritmo	Tempo(s)	Pt. Prd./Rota	Distância(m)	
Primeiro Turno	Estratégia LAR	1ª Etapa	Formação da matriz de distâncias	144,60	-	-	
			Kolesar e Walker	0,01	45	-	
		2ª Etapa	Formação da matriz de distâncias	110,59	-	-	
			Clarke e Wright	0,03	3	153.809	
			Vizinho mais próximo	0,01	3	164.548	
			Inserção mais distante	0,01	4	247.807	
		3ª Etapa	3-opt sob Clarke e Wright	0,02	3	151.526	
			3-opt sob vizinho mais próximo	0,03	3	164.548	
			3-opt sob inserção mais distante	0,01	4	247.807	
		Estratégia ARL	1ª Etapa	Formação da matriz de distâncias	142,53	-	-
	Teitz e Bart			0,01	-	-	
	Gillet e Johnson			0,01	-	-	
	2ª Etapa		Kolesar e walker	0,01	46	-	
	3ª Etapa		Formação da matriz de distâncias	50,79	-	-	
			Clarke e Wright	0,01	2	164.505	
			Vizinho mais próximo	0,01	2	163.176	
			Inserção mais distante	0,01	2	145.340	
	4ª Etapa		3-opt sob Clarke e Wright	0,07	2	158.984	
			3-opt sob vizinho mais próximo	0,07	2	163.176	
			3-opt sob inserção mais distante	0,05	2	145.340	
	Variação da Estratégia ARL		1ª Etapa	Gillett e Miller	3,13	-	-
				Formação da matriz de distâncias	74,47	-	-
			2ª Etapa	Kolesar e Walker	0,01	45	-
		Formação da matriz de distâncias		61,12	-	-	
		3ª Etapa	Clarke e Wright	0,01	2	142.498	
			Vizinho mais próximo	0,01	2	151.176	
			Inserção mais distante	0,01	2	137.923	
		4ª Etapa	3-opt sob Clarke e Wright	0,04	2	142.498	
			3-opt sob vizinho mais próximo	0,18	2	150.124	
			3-opt sob inserção mais distante	0,05	2	137.923	
Terceiro Turno	Estratégia LAR	1ª Etapa	Formação da matriz de distâncias	162,86	-	-	
			Kolesar e Walker	0,01	37	-	
		2ª Etapa	Formação da matriz de distâncias	118,51	-	-	
			Clarke e Wright	0,02	3	135.921	
			Vizinho mais próximo	0,01	3	162.467	
			Inserção mais distante	0,01	4	218.970	
		3ª Etapa	3-opt sob Clarke e Wright	0,02	3	135.921	
			3-opt sob vizinho mais próximo	0,06	3	160.015	
			3-opt sob inserção mais distante	0,01	4	218.970	
		Estratégia ARL	1ª Etapa	Formação da matriz de distâncias	146,96	-	-
	Teitz e Bart			0,01	-	-	
	Gillet e Johnson			0,01	-	-	
	2ª Etapa		Kolesar e Walker	0,01	37	-	
	3ª Etapa		Formação da matriz de distâncias	54,58	-	-	
			Clarke e Wright	0,01	2	162.146	
			Vizinho mais próximo	0,01	2	161.770	
	4ª Etapa		Inserção mais distante	0,01	2	141.988	
			3-opt sob Clarke e Wright	0,04	2	158.605	
			3-opt sob vizinho mais próximo	0,03	2	161.196	
	3-opt sob inserção mais distante	0,03	2	141.988			
		Variação da Estratégia ARL	1ª Etapa	Gillett e Miller	2,93	-	-
				Formação da matriz de distâncias	88,67	-	-
	2ª Etapa		Kolesar e Walker	0,01	38	-	
			Formação da matriz de distâncias	73,42	-	-	
3ª Etapa	Clarke e Wright		0,01	2	151.972		
	Vizinho mais próximo		0,01	2	163.008		
	Inserção mais distante	0,01	2	141.659			
4ª Etapa	3-opt sob Clarke e Wright	0,11	2	151.972			
	3-opt sob vizinho mais próximo	0,03	2	163.008			
	3-opt sob inserção mais distante	0,11	2	141.659			

Quarto Turno	Estratégia LAR	1ª Etapa	Formação da matriz de distâncias	180,80	-	-
			Kolesar e Walker	0,01	36	-
		2ª Etapa	Formação da matriz de distâncias	96,82	-	-
			Clarke e Wright	0,02	3	141.696
			Vizinho mais próximo	0,01	3	166.826
			Inserção mais distante	0,01	5	275.905
		3ª Etapa	3-opt sob Clarke e Wright	0,01	3	141.696
			3-opt sob vizinho mais próximo	0,01	3	166.826
			3-opt sob inserção mais distante	0,01	5	273.618
		Estratégia ARL	1ª Etapa	Formação da matriz de distâncias	160,38	-
	Teitz e Bart			0,01	-	-
	Gillet e Johnson			0,01	-	-
	2ª Etapa		Kolesar e walker	0,01	36	-
	3ª Etapa		Formação da matriz de distâncias	58,54	-	-
			Clarke e Wright	0,01	2	148.399
			Vizinho mais próximo	0,01	2	154.167
	Inserção mais distante		0,01	2	145.463	
	4ª Etapa		3-opt sob Clarke e Wright	0,03	2	148.399
			3-opt sob vizinho mais próximo	0,03	2	154.167
		3-opt sob inserção mais distante	0,03	2	145.463	
Variação da Estratégia ARL	1ª Etapa	Gillett e Miller	2,86	-	-	
	2ª Etapa	Formação da matriz de distâncias	107,62	-	-	
		Kolesar e walker	0,01	40	-	
	3ª Etapa	Formação da matriz de distâncias	57,04	-	-	
		Clarke e Wright	0,01	2	155.952	
		Vizinho mais próximo	0,01	2	166.839	
	Inserção mais distante	0,01	2	138.647		
	4ª Etapa	3-opt sob Clarke e Wright	0,14	2	152.162	
		3-opt sob vizinho mais próximo	0,05	2	162.046	
		3-opt sob inserção mais distante	0,03	2	138.647	

Tabela 19 - Resultados alcançados no primeiro, terceiro e quarto turnos de trabalho.

4.4 Comparação dos resultados

As comparações dos resultados alcançados entre as estratégias adotadas para a resolução do problema de localização e roteamento e a solução atual da empresa foram focadas sob o ponto de vista das distâncias reais percorridas e dos custos diários de transporte.

4.4.1 Entre as estratégias

Um resumo dos melhores valores obtidos em cada estratégia foi exposto no gráfico da Figura 31 e no Quadro 6, discriminado de acordo com os turnos de trabalho.

Para o primeiro turno, a variação da estratégia ARL apresentou o menor percurso (137.923m) com a execução dos algoritmos aproximativos de inserção mais distante e 3-opt. Já para o segundo turno, as heurísticas de Clarke e Wright paralelo e 3-opt exibiram distâncias reais mais curtas na estratégia LAR (568.054m).

Turno	Estratégia LAR			Estratégia ARL			Variação da estrat. ARL		
	Dist.(m)	Rota	Heurística	Dist.(m)	Rota	Heurística	Dist.(m)	Rota	Heurística
1º turno	151.526	3	CW e 3-opt	145.340	2	IMD e 3-opt	137.923	2	IMD e 3-opt
2º turno	568.054	15	CW e 3-opt	622.294	15	IMD e 3-opt	665.315	15	IMD e 3-opt
3º turno	135.921	3	CW e 3-opt	141.988	2	IMD e 3-opt	141.659	2	IMD e 3-opt
4º turno	141.696	3	CW e 3-opt	145.463	2	IMD e 3-opt	138.647	2	IMD e 3-opt

Quadro 6 - Comparação das estratégias quanto à distância total real percorrida e o número de rotas em cada turno.

Apesar da estratégia LAR apresentar melhor resultado (135.921m) para o terceiro turno com a execução dos algoritmos de Clarke e Wright e 3-opt, ela utiliza um veículo (rota) a mais do que as outras estratégias. No último turno do dia, a variação da estratégia ARL mostrou um percurso menor (138.647m) com as heurísticas de inserção mais distante e 3-opt.

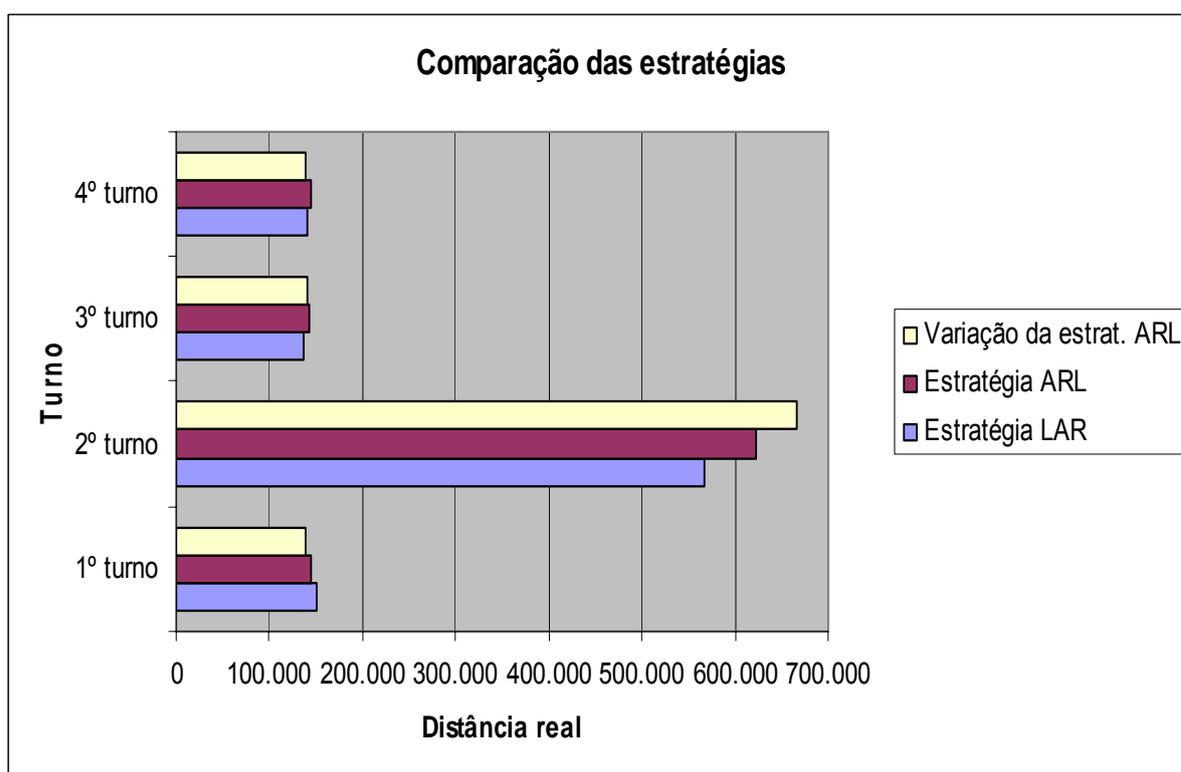


Figura 31 - Gráfico da comparação dos melhores valores obtidos por cada estratégia

Realizando uma análise geral em todos os turnos, pode-se verificar que a heurística de inserção mais distante (IMD), juntamente com a 3-opt, apresentaram melhores resultados para a estratégia ARL e sua variação. Em contrapartida, os

algoritmos de Clarke e Wright (CW) paralelo e 3-opt mostraram-se mais adequados para a estratégia LAR.

4.4.2 Entre a solução vigente na empresa e as estratégias

Como não é sabido, na solução aplicada atualmente, a distância exata percorrida em cada rota, tanto no trajeto de coleta dos funcionários até a Esmaltec quanto no percurso de volta, estabeleceu-se 65km como o percurso médio de cada rota para o transporte dos empregados até a empresa com base no conhecimento que a empresa adquiriu (distância mínima de 45 km e máxima de 80km por rota) durante a época em que fornecia os percursos à empresa contratada para o serviço de transporte.

Buscando a minimização dos custos, duas modalidades de contrato são consideradas para cobrança do custo total incorrido no serviço de transporte. Uma está alicerçada no custo fixo para utilizar um ônibus durante um mês e a outra no custo de uma rota por quilômetro percorrido. Tendo posse dos valores referentes ao quilômetro percorrido (R\$ 2,50/km) em uma rota e ao custo por ônibus alugado (R\$ 100,00/dia) no sentido garagem → residências → empresa, determinou-se os custos da seguinte maneira:

$\text{CQTP} = \text{percurso total das rotas} \times \text{valor do quilômetro percorrido}$ $\text{CFTO} = \text{número de rotas} \times \text{valor fixo cobrado para cada ônibus utilizado}$

Os valores são computados tomando como base de cálculo ou o custo por quilômetro total percorrido (CQTP) por todos os ônibus ou de acordo com o custo fixo total cobrado por ônibus (CFTO) utilizado no transporte, que independe da distância percorrida. Os custos são referentes ao percurso dos ônibus para transportar os funcionários até a fábrica, não sendo estimado o trajeto de volta.

O valor do percurso total das rotas na solução atual é calculado multiplicando-se o número de rotas pelo percurso médio de cada trajeto.

	1º turno			2º turno			3º turno			4º turno		
	Rt.	CQTP	CFTO	Rt.	CQTP	CFTO	Rt.	CQTP	CFTO	Rt.	CQTP	CFTO
Solução atual	4	650,00	400,00	17	2.762,50	1.700,00	4	650,00	400,00	3	487,50	300,00
Estratégia LAR	3	378,82	300,00	15	1.420,14	1.500,00	3	339,80	300,00	3	354,24	300,00
Estratégia ARL	2	363,35	200,00	15	1.555,74	1.500,00	2	354,97	200,00	2	363,66	200,00
Varição Estratégia ARL	2	344,81	200,00	15	1.663,29	1.500,00	2	354,15	200,00	2	346,62	200,00

Tabela 20 - Comparação das estratégias e da solução atual da Esmaltec quanto aos custos diários em cada turno.

A Tabela 20 e o gráfico da Figura 32 expõem os custos diários atuais da empresa, bem como aqueles apresentados por cada solução do PLR de acordo com as modalidades de cobrança do serviço pela empresa terceirizada em cada turno laboral.

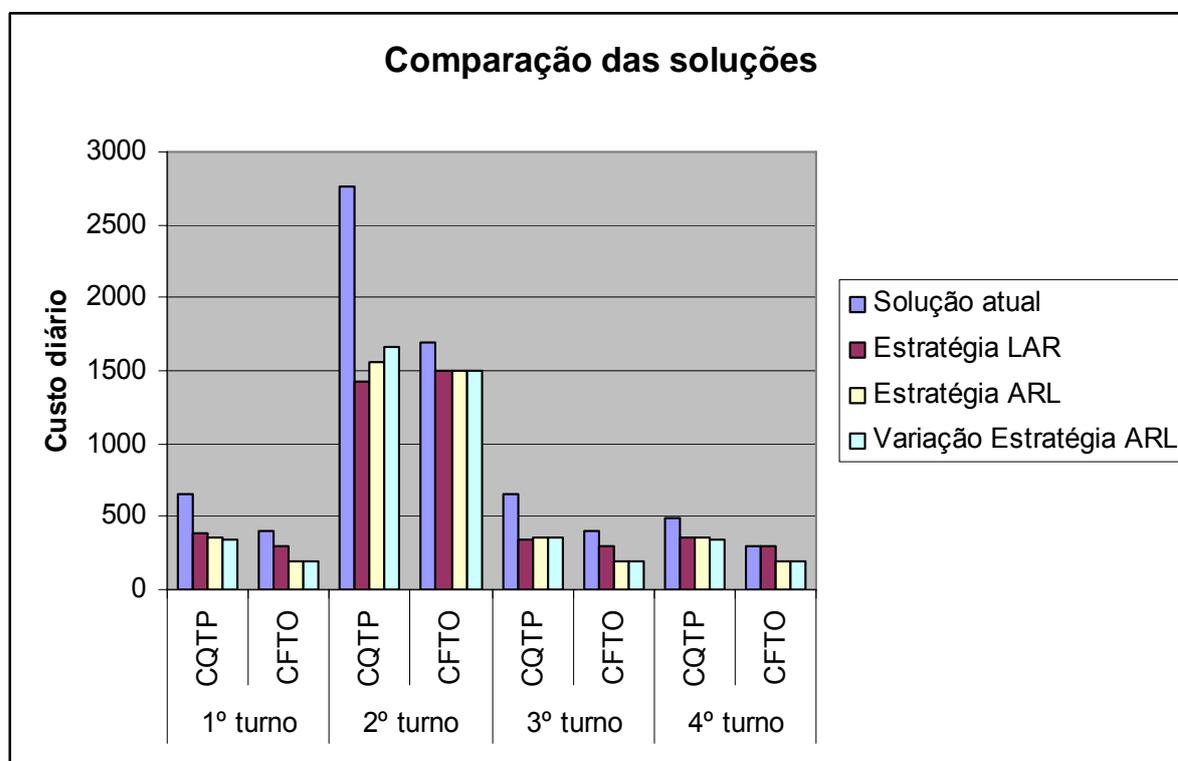


Figura 32 - Gráfico da comparação dos custos diários de acordo com as soluções por turno

Confrontando-se os números alcançados entre as estratégias propostas e a solução atual na Esmaltec, constatou-se, conforme a Tabela 21, a redução de 46,95% nos valores cobrados no primeiro turno caso seja escolhida a modalidade de cobrança por quilômetro rodado e de 50% se for fixo por ônibus utilizado. Neste turno, a forma mais econômica para a empresa provém do contrato com base no CFTO e na adoção da estratégia ARL ou de sua variação.

	1º turno		2º turno		3º turno		4º turno	
	CQTP	CFTO	CQTP	CFTO	CQTP	CFTO	CQTP	CFTO
Solução atual	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Estratégia LAR	41,72%	25,00%	48,59%	11,76%	47,72%	25,00%	27,34%	0,00%
Estratégia ARL	44,10%	50,00%	43,68%	11,76%	45,39%	50,00%	25,40%	33,33%
Variação Estratégia ARL	46,95%	50,00%	39,79%	11,76%	45,51%	50,00%	28,90%	33,33%

Tabela 21 – Redução percentual dos custos diários promovida por cada estratégia em relação à solução atual da Esmaltec.

Já para o turno comercial, a redução mais significativa (48,59%) em relação à solução vigente foi obtida pela estratégia LAR, onde o valor cobrado é estabelecido com base no custo por quilômetro percorrido.

No terceiro turno laboral, para a modalidade de contrato onde cobra-se de acordo com a quilometragem percorrida, obteve-se maior economia na estratégia LAR, com uma redução de 47,72% em relação à solução atual. Já para a cobrança por ônibus utilizado, a estratégia ARL e sua variação conseguiram redução de 50%, sendo a modalidade mais indicada para esse turno.

Para o último turno de trabalho, a variação da estratégia ARL apresentou maior redução nas despesas da empresa tanto em relação aos custos cobrados por quilômetro percorrido, 28,90%, quanto por ônibus alugado, 33,33%. A estratégia ARL também obteve a redução de 33,33% com relação à modalidade do contrato por ônibus utilizado.

Com exceção do segundo turno, que apresentou para a solução da estratégia LAR menor custo caso seja adotado a modalidade de cobrança por quilômetro rodado, constatou-se nos demais turnos, que os custos são reduzidos ao se propor uma solução pela modalidade de cobrança por veículo utilizado. Por conseguinte,

para esses turnos, é preferível a obtenção de rotas maiores e com menos ônibus (rotas) aos trajetos menores, mas com um maior número de veículos.

Em todos os turnos de trabalho, todas as estratégias propostas apresentaram diminuição nos custos, seja por causa do menor número de rotas ou do menor percurso, em relação à solução vigente na Esmaltec. A economia constatada representa uma redução significativa nos custos da fábrica, tornando possível potencializar o objetivo de sempre otimizar seus processos visando superar a concorrência e de proporcionar comodidade aos funcionários com a realização de todo o percurso sentado.

Conclusão

5.1 Considerações finais e contribuições

Dada a grande relevância que os custos relacionados ao transporte, seja de mercadorias, pessoas ou serviços têm sobre os negócios empresariais, tanto a nível nacional como mundial, desenvolver aplicações que minimizem gastos nesse setor ou que proporcione alternativas para auxiliar na tomada de decisão é uma meta a ser seguida por todo empresário que tem no consumo de combustível, uma de suas principais despesas. Esse desafio é ainda maior quando o cenário internacional é prejudicado por conflitos de guerra nos grandes países exportadores de petróleo, pressionando o preço dos combustíveis para cima, aumentando assim, os custos.

O objetivo principal de proporcionar a redução nos gastos das empresas no transporte de seus empregados e ainda conceber maior comodidade e segurança a seus funcionários foi alcançado nesse trabalho com o desenvolvimento de um ambiente na Internet, a partir da aplicação de diversas tecnologias, proprietárias e abertas, que implementam várias heurísticas. Essa aplicação na internet tem como sua maior relevância, a possibilidade de ser executada em qualquer computador pessoal que tenha acesso ao servidor *web* da aplicação, a qualquer momento ou lugar, desde que este possua um navegador *web* e o *plug-in SVG Viewer* instalados na máquina.

A partir de uma interface intuitiva, para a entrada e análise dos dados, mapas e relatórios foram gerados a fim de possibilitar a visualização e impressão dos resultados de cada etapa do problema de transporte dos funcionários, sob regime de fretamento contínuo, categorizado como um problema de localização e roteamento. Com base nessas facilidades, as tomadas de decisões tornaram-se mais rápidas, fáceis e precisas. Um exemplo seria a dinâmica, para a escolha da modalidade de cobrança (fixo por ônibus ou por quilômetro percorrido), durante o processo de realização das negociações para o fechamento do contrato de prestação de serviços que o melhor custo-benefício assevera a Esmaltec.

A validação maior da aplicabilidade e qualidade das soluções apresentadas pode ser constatada nos resultados obtidos na fábrica da Esmaltec, localizada no distrito industrial de Maracanaú, que utiliza 28 rotas de ônibus para o transporte de pouco mais de 860 funcionários distribuídos entre quatro turnos. O trabalho e a aplicação desenvolvida podem ser focados também para atender os interesses das empresas prestadoras do serviço de fretamento contínuo, onde poderiam aumentar seus lucros e melhorar a análise das rotas aplicadas para atender um cliente.

Como o problema de transporte de funcionários é similar aos de alunos, já que ambos possuem características parecidas, soluções apresentadas na literatura envolvendo o transporte de estudantes podem ser aplicadas ao transporte de empregados, salvo algumas adaptações. Embora a aplicação desenvolvida tenha tomado a cidade de Fortaleza como base, ela é aplicável a qualquer município, dependendo apenas de dados como: as coordenadas geográficas para a construção do mapa e informações de tráfego da região analisada.

Além da aplicação *web* desenvolvida, vale ressaltar como outra importante contribuição dessa dissertação, a comparação entre os resultados alcançados por cada estratégia implementada para solução desse tipo de problema. Adaptações nessas metodologias foram realizadas de acordo com as restrições impostas pelo estudo de caso, tendo-se ainda focado na apresentação de resultados mais próximos possíveis da realidade, por meio da utilização de distâncias reais e da consideração do sentido de direção das vias.

5.2 Trabalhos futuros

Visando o aprimoramento da aplicação *web* desenvolvida e dos resultados alcançados, as seguintes sugestões são apresentadas:

- Implementar o algoritmo de geração de sementes (PARAÍBA et al., 1990) para a determinação dos pontos-base presente na fase de formação dos *clusters* de funcionários da estratégia ARL;
- Implementar escala animada (*zoom* dinâmico), isto é, variar a densidade de informações apresentadas e a simbolização conforme o nível de *zoom*;
- Transportar a aplicação implementada sob *desktops* para dispositivos móveis, como os telefones celulares e assistentes pessoais digitais (PDAs);

- Executar sob o sistema operacional Linux;

• Implementar meta-heurísticas como algoritmos genéticos, *ant system*, *simulated annealing* ou algoritmos híbridos com o objetivo de comparar os resultados alcançados com os dos algoritmos aproximativos clássicos sugeridos e implementados nesse trabalho.

• Considerar as proibições referentes às conversões, à esquerda ou à direita, nas vias durante a execução do algoritmo de menor caminho, pois sabe-se que a manutenção e a atualização de uma base de dados de informações viárias é particularmente crítica, principalmente em cidades maiores, nas quais há mudanças freqüentes de mão de direção e de restrições à circulação de veículos (conversões e outros movimentos proibidos).

Sabendo que a utilização das próprias residências dos funcionários como potenciais pontos de coleta pode dificultar o acesso dos ônibus às paradas reais estabelecidas, em decorrência da desproporcionalidade, em algumas situações, entre a largura da via e o tamanho dos ônibus no momento da realização de manobras de conversão, duas alternativas para a solução do problema poderiam ser implementadas caso se tivesse a informação da localização dos pontos de parada de ônibus utilizados pelo transporte coletivo urbano de passageiros do município de Fortaleza:

• Utilização das paradas do transporte coletivo urbano como possíveis pontos de coleta, na etapa de localização dos pontos de parada e alocação dos funcionários a esses pontos, ao invés das próprias residências dos funcionários;

• Resolução em duas etapas: primeiro, utilizar-se-ia as residências como possíveis pontos de parada e, após a determinação dos pontos reais, far-se-ia uma translação destes até o ponto de parada utilizado pelo transporte coletivo urbano mais próximo. Garantindo assim, que os ônibus utilizados no transporte de funcionários tenham condições de transitar realmente pelo ponto de coleta estabelecido.

Bibliografia

AHUJA, R. K.; MEHLHORN K.; ORLIN, J. B.; TARJAN, R. E. Faster algorithms for the shortest path problem. **Journal of Association for Computing Machinery**, v. 37, n. 2, p. 213-223, abr. 1990.

ARONOFF, S. Geographical information system: a management perspective. **WDL Publications**, Ottawa, 1989.

BANCO DO NORDESTE DO BRASIL – BNB. Processo nº 2006/0168, de 08 de Fevereiro de 2006. **Extrato de dispensa de licitação**. Disponível em: <http://www.bnb.gov.br/content/aplicacao/fornecedores/Editais_Publicados/Editais/DISPENSA_INEX_FEV_2006.htm>. Acesso em: 20 mai. 2006.

BARR, R. S.; GOLDEN, B. L.; KELLY, J. P.; RESENDE, M. G. C.; STEWART, W. R. Designing and reporting on computational experiments with heuristic methods. **Journal of Heuristics**, v. 1, n. 1, p. 9–32, 1995.

BARROS NETO, J.F. **Georedes e Georedes WEB: Sistemas de apoio à decisão espacial para modelos em redes georeferenciadas**. 2002. Tese (Doutorado), Engenharia de Produção COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2002.

BELLMAN, R. E. On a routing problem. **Quarterly of Applied Mathematics**, v. 16, n. 1, p. 87-90, 1958.

BOCHENSKI, B. **Implementando sistemas cliente-servidor de qualidade**. São Paulo: Makron *Books*, 1995.

BODIN, L. D. Twenty years of routing and scheduling. **Operations Research**, v. 38, n. 4, p. 571-579, 1990.

BODIN, L. D.; GOLDEN, B. L. Classification in vehicle routing and scheduling. **Networks**, v. 11, p. 97-108, 1981.

BODIN, L.; GOLDEN, B.; ASSAD, A.; BALL, M. Routing and scheduling of vehicles and crews: the state of the art. **Computers and Operations Research**, vol. 10, n. 2, p. 63-211, 1983.

BOWERMAN, R.; HALL, B.; CALAMAI, P. A multi-objective optimization approach to urban school bus routing: formulation and solution method. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 29A, n. 2, p. 107-123, jul 1995.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. **Principles of geographical information systems**. New York: Oxford University Press, 1998.

CADASTRO DE SERVIÇOS TERCEIRIZADOS - Cadterc. **Prestação de serviços de transporte de funcionários, sob regime de fretamento contínuo**, Secretaria da Casa Civil – Governo do Estado de São Paulo, v. 4, 2005.

CÂMARA, G. Anatomia de um SIG. **Fator GIS – A Revista do Geoprocessamento**, ano 1, n. 4, p. 11-15, jan./fev./mar. 1994.

CÂMARA, G. As roupas novas do imperador. **Revista InfoGeo**, ano 3, n. 12, mar./abr. 2000.

CÂMARA, G.; CASANOVA, M. A.; HEMERLY, A. S.; MAGALHÃES, G. C.; MEDEIROS, C. M. B. **Anatomia de sistemas de informação geográfica**. Instituto de Computação, UNICAMP, Campinas, São Paulo, 1996.

CEPOLINA E., Micro-simulation for the management of vehicles fleet in restricted area. **Multiagent Robotic Systems: Trends and Industrial Applications**, v. 1, p. 1-8, 2003.

CHANG, K.-P. **The design of a web-based geographic information system for community participation**. 1997. Masters Thesis. Department of Geography, University at Buffalo, 1997.

CHERKASSKY, B. V.; GOLDBERG, A. V.; RADZIK, T. Shortest paths algorithms: theory and experimental evaluation. **Mathematical Programming**, v. 73, p. 129-174, 1996.

CHAPLEAU, L.; FERLAND, J.; ROUSSEAU, J. Clustering for routing in densely populated areas. **European Journal of Operational Research**, v. 20, p. 48-57, 1985.

CLARKE, G.; WRIGHT, J. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. **Operations Research**, v. 12, n. 6, p. 568-581, 1964.

CORDEAU, J.-F.; GENDREAU, M.; LAPORTE, G.; POTVIN, J.-Y.; SEMET, F. A guide to vehicle routing heuristics. **Journal of the Operational Research Society**, v. 53, n. 5, p. 512–522, 2002.

COWEN, David J. GIS versus CAD versus DBMS: What are the differences?. **Photogrammetric Engineering and remote sensing**, [S.l.], v. 4, n. 11, p. 1551-1555, 1988.

CROES, G. A. A method for solving traveling salesman problems. **Operations Research**, v. 6, n. 6, p. 791-812, 1958.

DANTAS, A. S.; TACO, P. W. G.; YAMASHITA, Y. Sistemas de informação geográfica em transportes: o estudo do estado da arte. In: **Anais do Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – ANPET**, 10., 1996, Brasília, DF, 1996, v. 1, p. 211–222.

DANTAS, A. S.; YAMASHITA, Y.; TACO, P. W. G. Metodologia para localização de um terminal de carga postal com auxílio do SIG, SR e MAH. In: **Anais do Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET**, 16., 2002, Natal, RN, v. 2, p. 57-68.

DANTZIG, G. B. All shortest routes in a graph. **Theory of Graphs. International Symposium**, Gordon and Breach, New York, p. 91-93, 1967.

DANTZIG G. B.; RAMSER J. H. The truck dispatching problem. **Management Science**, v.6, n. 1, p. 80-91, 1959.

DENARDO, E. V.; FOX, B. L. Shortest-route methods: 1. Reaching, pruning, and buckets. **Operations Research**, v. 27, n. 1, p. 161-186, 1979.

DEO N.; PANG C. Shortest path algorithms: Taxonomy and annotation. **Networks**, v. 14, n. 2, p. 275-323, 1984.

DIAL, R. B. Algorithm 360 shortest path forest with topological ordering. **Communications of the ACM**, v. 12, n. 11, p. 632-633, 1969.

DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. **Numerische Mathematik**, v. 1, p. 269-271, 1959.

DINIZ, U. L. **Alocação e dimensionamento de frotas de veículos para apoio a maquinário agrícola de usinas sucro-alcooleiras**. 2000. 109f. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

DIVOKY, J.; HUNG, H. Performance of shortest path algorithms in network flow problems. **Management Science**, v. 36, n. 6, p. 661-673, jun. 1990.

DODGE M.; HAKLAY, M.; RANA, S. **GIS timeline**. Centre for Advanced Spatial Analysis, University College. Disponível em: <<http://www.casa.ucl.ac.uk/gistimeline/>>. Acesso em: 30 ago. 2005.

DULAC, G.; FERLAND, J.; FORGUES, P.-A. School bus routes generator in urban surroundings. **Computers and Operations Research**, v. 7, n. 3, p. 199-213, 1980.

EISENBERG, J. D. **SVG essentials**. United States of American: O'Reilly & Associates. 2002. 335 p.

ESRI - ENVIRONMENTAL SYSTEM RESEARCH INSTITUTE. **Understanding GIS: the ARC/INFO method**. Redlands, California, p. 1-2, 1990.

EVANS, J. R.; MINIEKA, E. **Optimization algorithms for networks and graphs**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 1992.

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

FLOYD R. W. Algorithm 97: shortest path. **Communications of the ACM**, v. 5, n. 6, p. 345, 1962.

FOOTE, K.; CRUM, S. **Cartographic communication: the geographer's craft project**. Department of geography. Austin, University of Texas, 1997.

FORD Jr., L. R. **Network flow theory**. Santa Monica, CA: Rand Corporation Report, p. 923, 1956.

FREEDMAN, A. **Dicionário de Informática**. São Paulo: Makon Books, 1995.

FREDMAN, M. L.; TARJAN, R. E. Fibonacci heaps and their uses in improved network optimization algorithms. **Journal of Association for Computing Machinery**, v. 34, n. 3, p. 596-615, 1987.

GALLO, G.; PALLOTTINO, S. Shortest path methods: a unifying approach, **Mathematical Programming Study**, v. 26, p. 38-64, 1986.

GALLO, G.; PALLOTTINO, S. Shortest path algorithms. **Annals of Operations Research**, v. 13, p. 3-79, 1988.

GAREY, M. R.; JOHNSON, D. S. **Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completeness**. New York: W.H. Freeman and Company, 1979.

GILLETT, B. E.; MILLER, L. R. A heuristic algorithm for the vehicle-dispatch problem. **Operations Research**, v. 22, n. 2, p. 340-349, 1974.

GLOVER, F.; KLINGMAN, D.; Phillips, N. A new polynomially bounded shortest path algorithm. **Operations Research**, v. 33, n. 1, p. 65-73, 1985.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. Rio de Janeiro: Campus, 2000.

GOLDBERG, A. V.; RADZIK, T. A heuristic improvement of the Bellman-Ford algorithm. **Applied Mathematics Letters**, v. 6, n. 3, p. 3-6, 1993.

GOLDBERG, A. V.; TARJAN, R. E. **Expected performance of dijkstra's shortest path algorithm**. 1996. Technical Report. Computer Science Department, Princeton University.

GOLDEN, B.; BODIN, L.; DOYLE, T.; STEWART Jr., W. Approximate traveling salesman algorithms. **Operations Research**, v. 28, n. 3, parte II, p. 694-711, maio/jun. 1980.

HARMON, J. E.; ANDERSON, S. J. **The design and implementation of geographic information systems**. New Jersey: John Wiley & Sons. 2003.

JOHNSON, E. L. On shortest paths and sorting. **Proceedings of the 25th ACM annual conference**, p. 510-517, ago. 1972.

KAGAN, H.; ROSSETTO, C. F.; CUSTÓDIO, P. S.; MARTINS, W. C. Uso de sistemas de informação geográfica no planejamento de transportes. In: **Anais do VI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**. Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes – ANPET, 1992, Rio de Janeiro, RJ, v. 1, p. 892-909.

KLEINER, R. M.; MENEGUETTE, A. A. C. A tecnologia dos sistemas de informação geográfica (SIG) e a internet. In: **Simpósio Brasileiro de Geomática**. Anais do Simpósio Brasileiro de Geomática, 2002, Presidente Prudente: Unesp, v. 1. p. 357-364.

KOLESAR, P.; WALKER, W. An algorithm for the dynamic relocation of fire companies. **Operations Research**, v. 22, n. 2, p. 249-274, mar./abr. 1974.

LANGFORD, H.; LEWIS, S. A comparison of the GIS-T market in Europe and the UK. **The 23rd European Transport Forum**, England, p. 73-84, 1995.

LAPORTE, G. **Location-routing problems**. In Golden, B. e Assad, A., editors, *Vehicle routing: methods and studies*. Amsterdam: North-Holland, p. 163-197, 1988.

LIMA, R.S. **Bases para uma metodologia de apoio à decisão para serviços de educação e saúde sob a ótica dos transportes**. 2003. 200f. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.

LIN, S. Computer solutions of the traveling salesman problem. **Bell System Technical Journal**, v. 44, p. 2245-2269, 1965.

LIN, S.; KERNIGHAN, B. W. An effective heuristic algorithm for the Traveling Salesman Problem. **Operations Research**, v. 21, n. 2, p. 498-516, 1973.

MARINAKIS, Y.; MIGDALAS, A. **Heuristic solutions of vehicle routing problems in supply chain management**. Combinatorial and Global Optimization, P.M. Pardalos et al. (eds.), Scientific World, p. 205-235, 2002.

MARISCO, N. **Web mapas interativos como interfaces aos dados geoespaciais: uma abordagem utilizando-se tecnologias fontes abertas**. 2004. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

MARISCO, N.; PHILIPS, J.; PEREIRA, H. R. Protótipo de mapa para web interativo: uma abordagem utilizando código aberto. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 56/01, 2004.

MAYEDA, W. **Graph theory**. New York: John Wiley & Sons, 1972.

MICHAEL, A. Faltava a desculpa: A Volkswagen aproveita o pacote fiscal e anuncia um duro ajuste interno para recuperar terreno perdido. **Revista Isto É**, dez. 1997.

MISHRA, P. K. Computational efficiency of shortest path algorithms in C language. **Information and Management Science**, v. 16, n. 1, p. 67-82, 2005.

MOORE, E. F. The shortest path through a maze. **Proc. International Symposium on the Theory of Switching**, parte 2, Harvard University Press, p. 285-292, 1959.

NADDEF, D.; RINALDI, G. **Branch-and-cut algorithms for the capacitated VRP**. In: P. Toth and D. Vigo (eds), The Vehicle Routing Problem, SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications, Philadelphia, p. 53-84, 2002.

NUNES, L. F. **Algoritmos genéticos aplicados na abordagem de um problema real de roteirização de veículos**. 1998. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná, 1998.

ORFALI, R.; HARKEY, D.; EDWARDS, J. **Client/Server survival guide**. New York: John Wiley & Sons, 1999.

PALLOTTINO, S.; SCUTELLÀ, M. G. **Shortest path algorithms in transportation models: classical and innovative aspects**. Equilibrium and Advanced Transportation Modelling, P. Marcotte and S. Nguyen (eds.), Kluwer Academic Publishers, p. 245-281, 1998.

PARÁIBA, L. C.; FERNANDES, J. F. R.; ANDO, A. S. **Um algoritmo heurístico de construção paralela para o problema do m-caixeiro viajante**. 1990. Trabalho de circulação interna. Departamento de Engenharia Elétrica e Sistemas, UNICAMP, Campinas, 1990.

PELIZARO, C. **Avaliação de desempenho do algoritmo de um programa comercial para roteirização de veículos**. 2000. 153f. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2000.

PREISS, B. R. **Estruturas de dados e algoritmos: padrões de projetos orientados a objeto com Java**. Rio de Janeiro: Campus, 2001.

REINELT, G. **The traveling salesman problem: computational solutions for TSP applications**. Lecture Notes in Computer Science 840, Springer-Verlag, Berlin, 1994.

RIBEIRO, G. M. **Modelo de apoio ao planejamento de distribuição de carga em área urbana**. 2002. 126f. Dissertação (Mestrado). Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2002.

ROSENKRATZ, D. J.; STEARNS, R. E.; LEWIS, P. M. An analysis of several heuristics for the traveling salesman problem. **SIAM Journal on Computing**, v. 6, p. 563-581, 1977.

SADOSKI, Darleen. **Client/Server Architectures – An Overview**. Software Engineering Institute. EUA: Universidade de Carnegie Mellon, jan. 1997. Disponível em: <http://www.sei.cmu.edu/str/descriptions/clientserver_body.html>. Acesso em: 23 abr. 2006.

SALHI, S.; RAND, G. K. The effect of ignoring routes when locating depots. **European Journal of Operational Research**, v. 39, p. 150-156, 1989.

SANTOS, L.; FERREIRA, D. L. Sistema de Informação Geográfica Aplicado ao Planejamento de Trânsito e Transportes. **Caminhos de Geografia**. Uberlândia, v.12, p. 94-113, jun. 2004. Disponível em: <<http://www.ig.ufu.br/revista/caminhos.html>>. Acesso em: 29 jul. 2004.

SARKIS, L. F. P. G. **Resíduos de serviços de saúde em cidades de médio porte: caracterização de sistemas de coleta e aplicação de um sistema de informação geográfica na roteirização de veículos de coleta e transporte**. 2000. 215f. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2000.

SAVAS, E. On equity in providing public services. **Management Science**, v. 24, p. 800-808, 1978.

STEINER, M. T. A.; COSTA, D. M. B.; NUNES, L. F.; ZAMBONI, L. V. S.; SILVA, A. C. L.; CARNIERI, C. Proposta de uma metodologia para um problema de roteamento no transporte de funcionários de uma empresa utilizando via principais de tráfego e distâncias reais. **Tendências em Matemática aplicada e computacional**, São Paulo, v. 1, n. 2, p. 351-360, 2000.

STEINER, M. T. A.; COSTA, D. M. B.; ZAMBONI, L. V. S.; SILVA, A. C. L.; CARNIERI, C. The vehicle routing problem in the school transportation. **Anais do Congresso Euro XV / Inform's XXXIV**, Barcelona, Espanha, 1997.

SVG - W3C SCALABLE VECTOR GRAPHICS. **History**. Disponível em: <<http://www.w3.org/Graphics/SVG/History>>. Acesso em: 23 ago. 2005.

SYSLO, M. M.; DEO N.; KOWALIK J. S. **Discrete optimization algorithms with Pascal algorithms**. New Jersey: Prentice-Hall, 1983.

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

TEIXEIRA, A.; MATIAS, L.; NOAL, R.; MORETTI, E. Qual a Melhor Definição de SIG. **Fator GIS – A Revista do Geoprocessamento**, ano 2, n. 11, p. 20-22, out./nov./dez. 1995.

TESIMA, R. M.; LAPOLLI, E. M. Localização de pontos de parada de ônibus. **Anais do GIS Brasil**, Curitiba, 1996.

TOTH, P.; VIGO, D. **Exact Solution of the Vehicle Routing Problem**. In: T.G. Crainic and G. Laporte (eds), *Fleet Management and Logistics*, Kluwer, Boston, p. 1-31, 1998.

WILSON, R. J. **Introduction to graph theory**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1985.

WREN, A. **Computers in Transport Planning and Operation**. Ian Allan, London, 1971.

WREN, A.; HOLLIDAY, A. Computer scheduling of vehicles from one or more depots to a number of delivery points. **Operations Research Quarterly**, v. 23, n. 3, p. 333-344, 1972.

ZHAN, F. B.; NOON, C. E. Shortest path algorithms: an evaluation using real road networks. **Transportation Science**, v. 32, n. 1, p. 65-73, fev. 1998.

Apêndice I

A seguir é apresentado o manual de utilização da aplicação, que aborda as interfaces exibidas aos usuários no *browser* Microsoft Internet Explorer, a cada iteração. O sistema pode ser acessado através do link [http://IP do servidor web:porta/transpas](http://IP_do_servidor_web:porta/transpas) (ex: <http://201.9.105.296:82/transpas>).

Iteração 1: A tela inicial do sistema pode apresentar uma de duas possíveis visualizações ao usuário:

Na primeira (Figura 33), o *browser web* do cliente não consegue carregar o mapa por não possuir o *plug-in SVG Viewer* instalado. Após sua instalação, deve-se recarregar a página (pressionar tecla de atalho F5) para que o mapa possa ser, enfim, construído e visualizado.

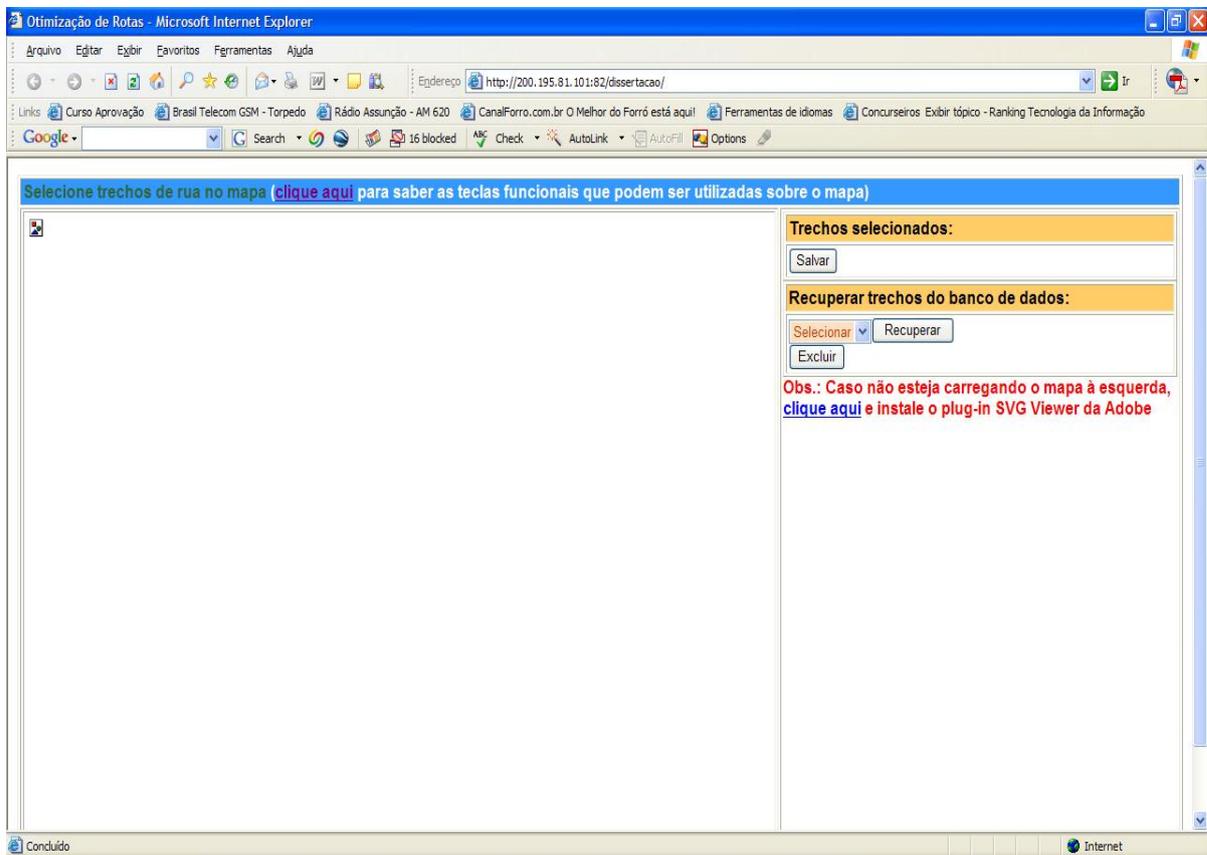


Figura 33 - Mapa não visualizado

Na segunda situação (Figura 34), o mapa é visualizado, já que o usuário possui o *plug-in* SVG instalado. Comandos funcionais, conforme mostrados na janela intitulada “Comandos funcionais”, que surge ao se clicar no link na parte superior da tela, podem ser aplicados sobre o mapa.

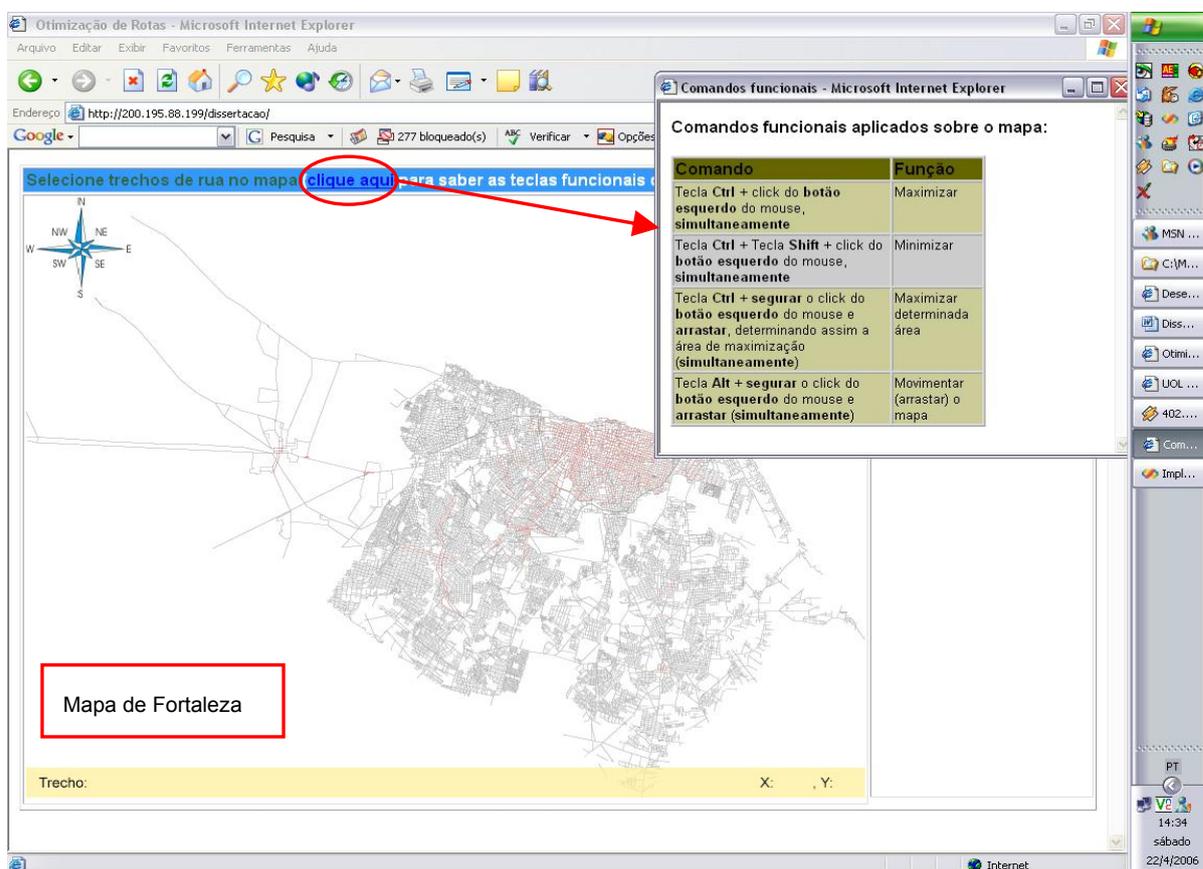


Figura 34 - Mapa da cidade de Fortaleza-CE e os comandos funcionais da aplicação

Iteração 2: Agora ocorre a seleção de pontos (trechos) no mapa que correspondem as residências das pessoas envolvidas no problema de localização e roteamento.

Para cada trecho selecionado é preciso confirmá-lo (Figura 35). Após a seleção dos pontos, clica-se no botão salvar (pontos não serão salvos no banco de dados). Caso se deseja selecionar pontos já armazenados no BD basta selecionar sua descrição no *listbox* e clicar em recuperar.

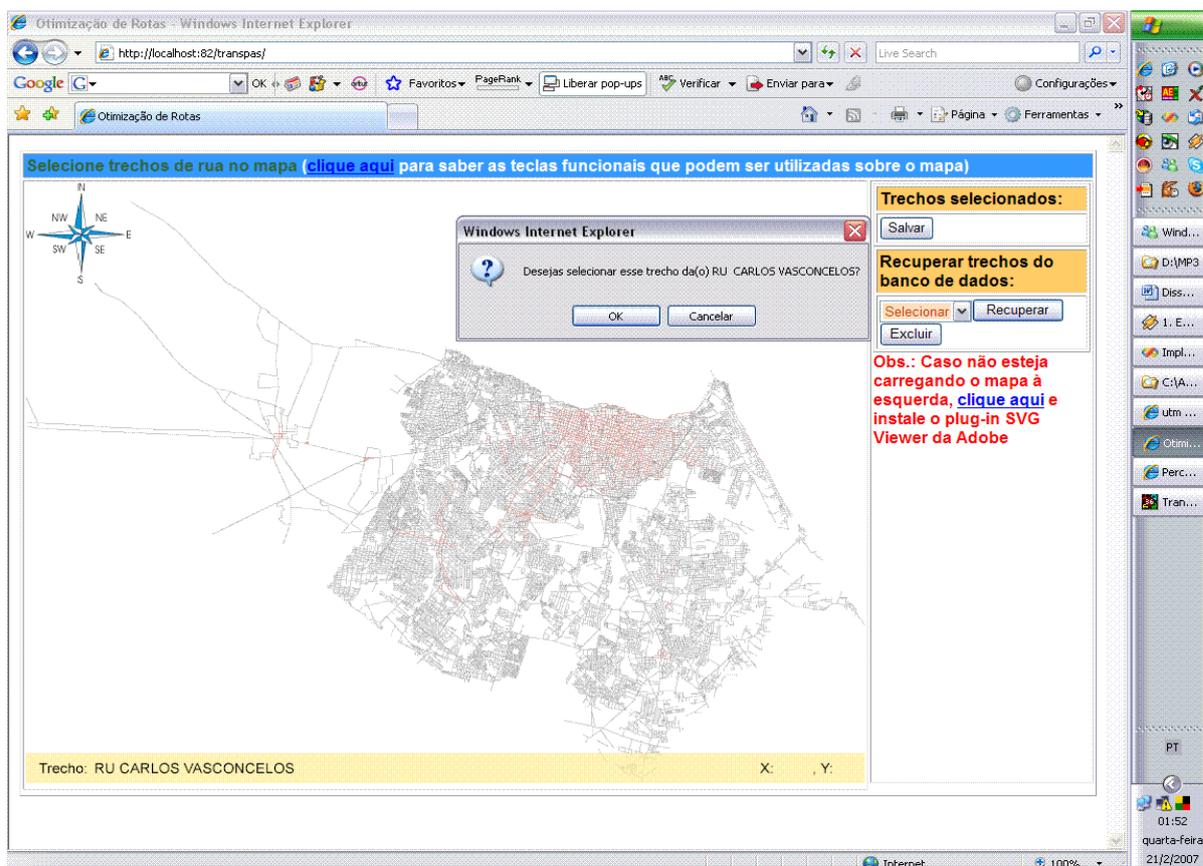


Figura 35 - Seleção de localidade no mapa

Iteração 3: Após salvar os pontos selecionados ou recuperar da base de dados, a tela visualizada na Figura 36 é apresentada. Nesse momento, uma série de opções é disponibilizada ao usuário:

1) Possibilidade de seleção de novos pontos ou exclusão de outros anteriormente selecionados. Após a seleção dos novos pontos é necessário clicar no botão salvar (os pontos são apenas adicionados ao *listbox* dos trechos selecionados, não sendo salvos no banco);

2) Salvar os novos pontos selecionados juntamente com os anteriormente indicados, que estão presentes no *listbox* de “trechos selecionados”, no banco de dados. É necessário informar a descrição (identificação) do conjunto de pontos a serem salvos.

3) Recuperar pontos armazenados no BD, selecionando a identificação dos pontos no *listbox* e clicando no botão “Recuperar”; ou inserir novos valores a uma

descrição cadastrada no banco e escolhida no *listbox*, com o click no botão “Atualizar BD”;

4) Selecionar os pontos de origem e destino aonde todos os veículos iniciam e finalizam, respectivamente, as rotas;

5) Selecionar a estratégia para solucionar o problema de localização e roteamento.

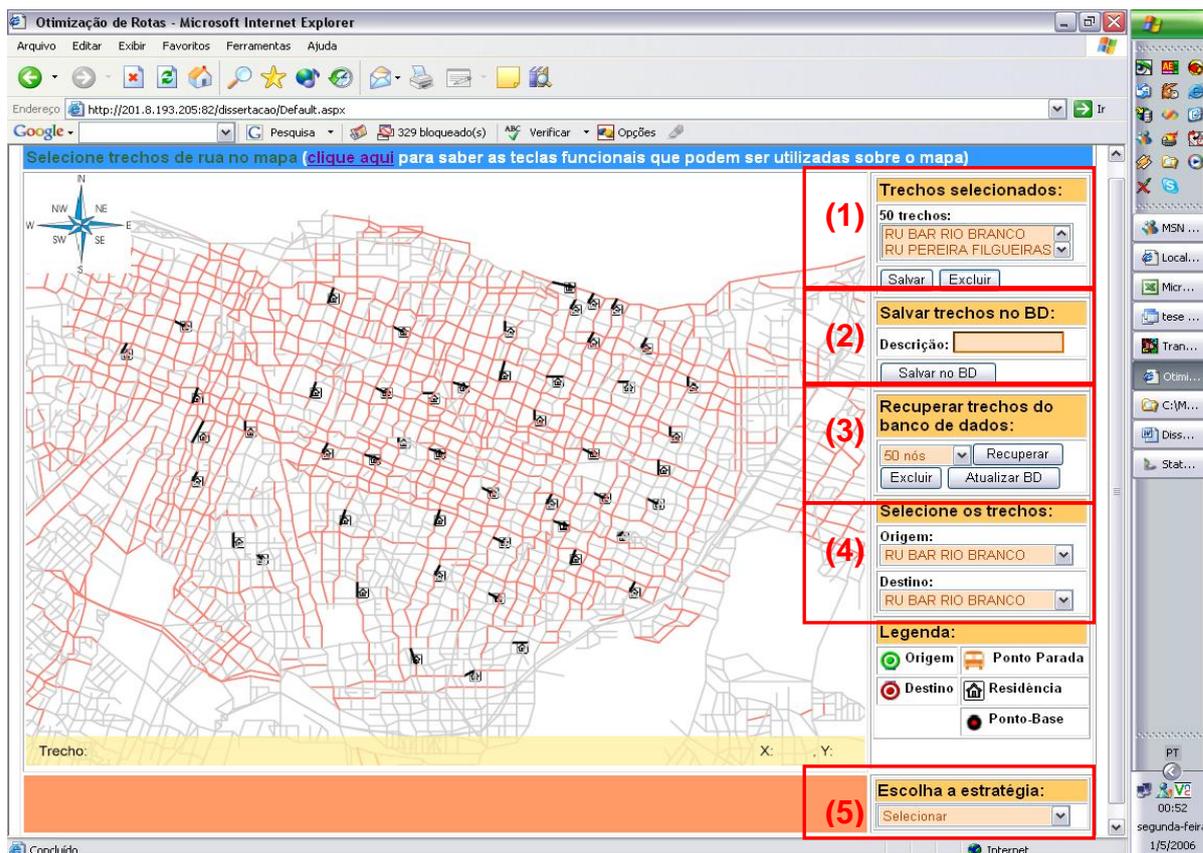


Figura 36 - Mapa com zoom aumentado, exibindo pontos recuperados do BD

Iteração 4: Após a seleção de alguma das três estratégias, a página é recarregada e as etapas que a envolvem são apresentadas para que o usuário possa escolhê-la. Com o objetivo de diminuir o processamento nesse momento, o mapa não é recarregado.

Com a escolha da etapa, a página é novamente recarregada e restrições relacionadas a este passo são exibidas para que o usuário possa configurar a aplicação à sua necessidade (Figura 37). Informada as restrições clica-se no botão “Executar”.

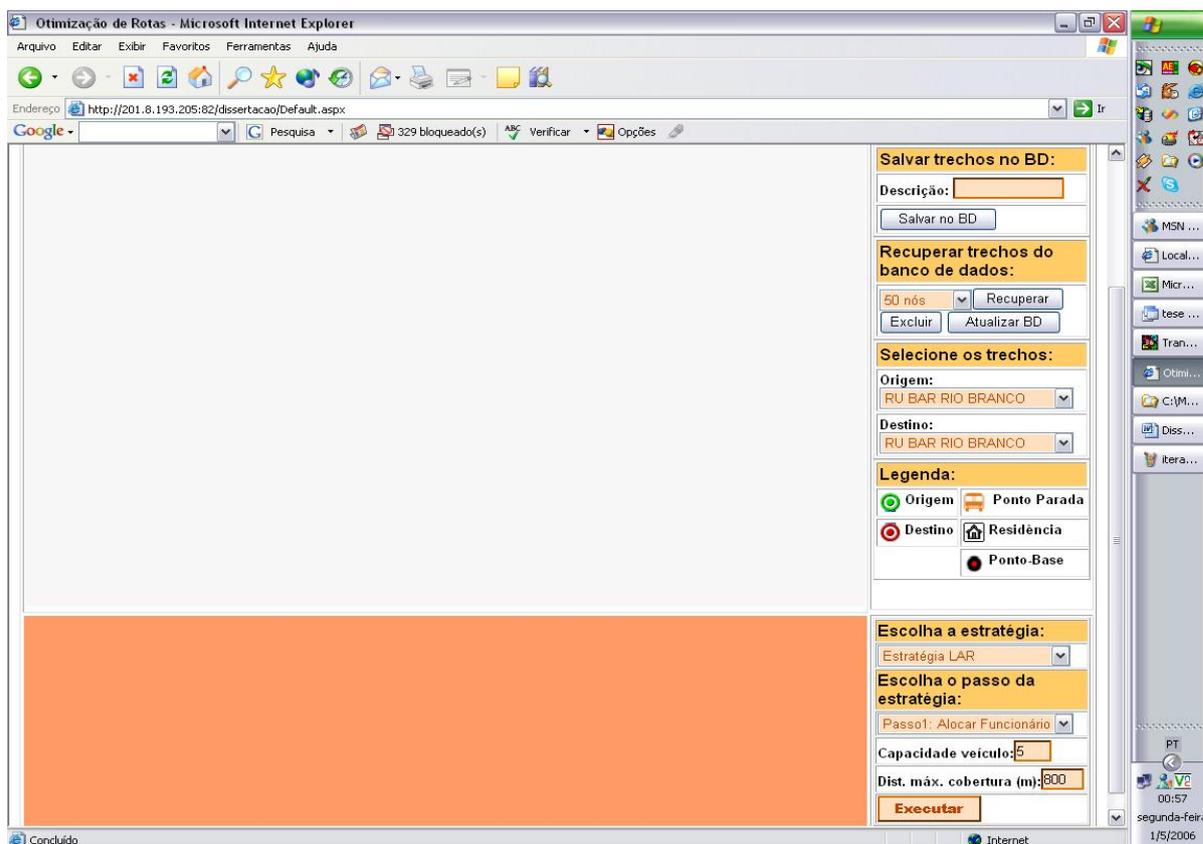


Figura 37 - Restrições da etapa escolhida da estratégia

Iteração 5: A requisição é enviada ao servidor e, posteriormente, a página (Figura 38) é recarregada apresentando os resultados em duas maneiras: expostos desenhados no mapa e em forma de relatórios. Os relatórios podem ser visualizados aos clicar nos *links*. Ainda pode-se restringir no mapa a visualização de determinadas informações, que são escolhidas nos *checkboxs* e, em seguida, clicando-se no botão visualizar.

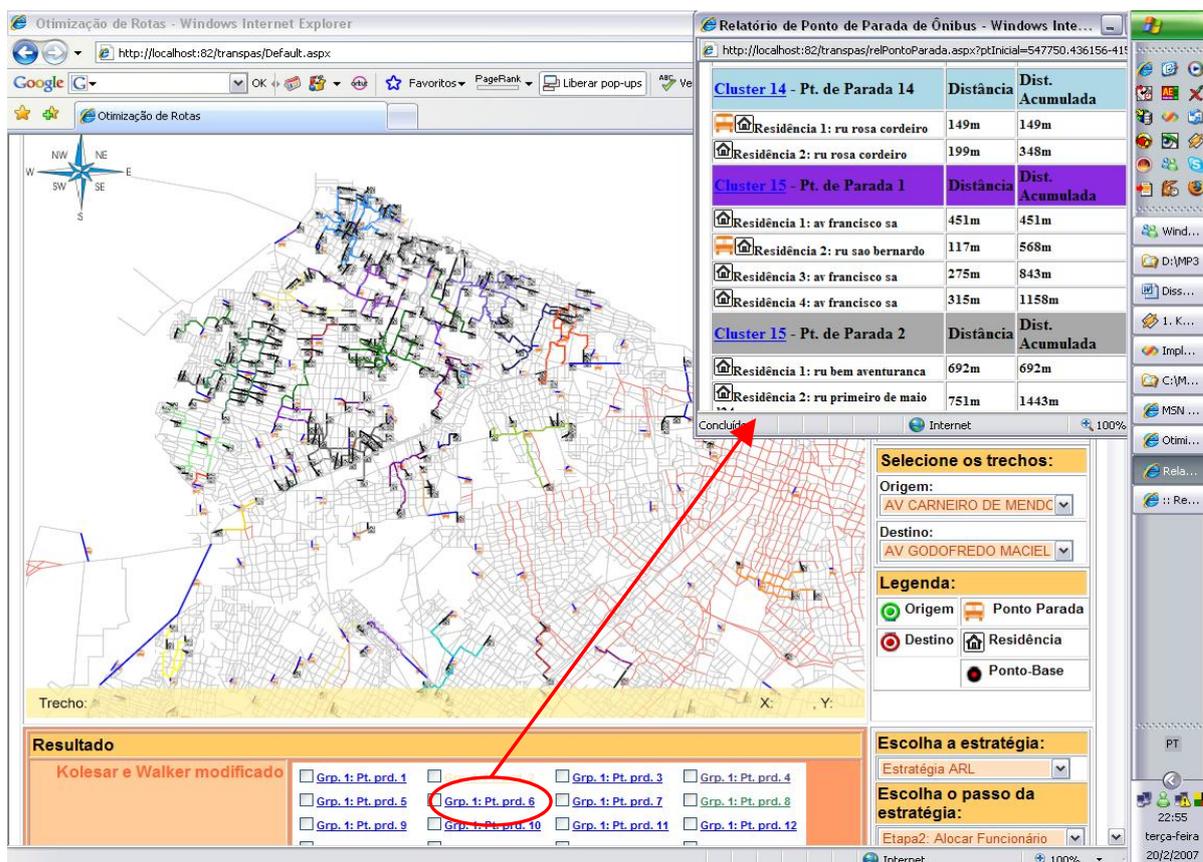


Figura 38 - Resultados apresentados no mapa e nos relatórios

As próximas iterações são conseqüências da repetição das iterações 4 e 5, modificando apenas as etapas, que estão presentes em cada estratégia, e suas respectivas restrições.

Para algumas etapas da solução do PLR, existem mais de uma opção a ser escolhida, mas não há necessidade da execução de todas. A execução de mais de uma opção, para uma mesma etapa, é sugerida caso deseje-se comparar heurísticas diferentes aplicadas na etapa. Por fim, a escolha das etapas deve ser realizada de forma incremental (ex.: etapa1, etapa2 ...).

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)