

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM
COMPUTACIONAL

Programação de Veículos com Coleta e
Entrega: metodologia heurística baseada no
Recozimento Simulado

Ezequiel Gibbon Gautério

Rio Grande

2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM
COMPUTACIONAL

Programação de Veículos com Coleta e Entrega: metodologia heurística baseada no Recozimento Simulado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal do Rio Grande como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Modelagem Computacional, sob orientação da Prof^a. Dra. Elaine Corrêa Pereira.

Ezequiel Gibbon Gautério

Rio Grande, 2 de setembro de 2013

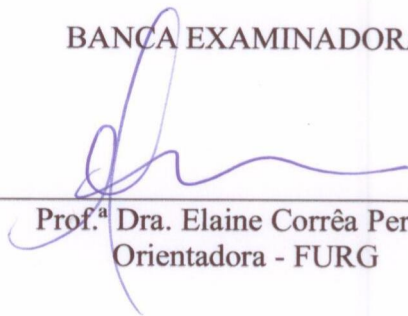
EZEQUIEL GIBBON GAUTÉRIO

“PROGRAMAÇÃO DE VEÍCULOS COM COLETA E ENTREGA: METODOLOGIA
HEURÍSTICA BASEADA NO RECOZIMENTO SIMULADO”.

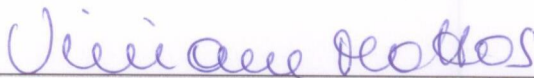
Dissertação apresentada ao Programa de Pós
Graduação em Modelagem Computacional da
Universidade Federal do Rio Grande -FURG,
como requisito parcial para obtenção do Grau
de Mestre. Área concentração: Modelagem
Computacional..

Aprovado em

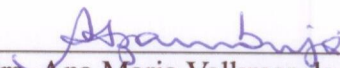
BANCA EXAMINADORA



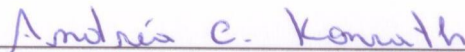
Prof.^a Dra. Elaine Corrêa Pereira
Orientadora - FURG



Prof.^a Dra. Viviane Leite Dias de Mattos
FURG



Prof.^a Dra. Ana Maria Volkmer de Azambuja
FURG



Prof.^a Dra. Andréa Cristina Konrath
UFSC

Rio Grande -RS
2013

Dedico aos meus pais,
Valcir e Juçara.

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço a DEUS, por ser o grande Mestre, iluminando-me e guiando-me pelos bons caminhos.

Aos meus pais Valcir e Juçara, exemplos de vida e por serem os primeiros professores, batalhadores e preocupados com minha educação e ao meu irmão Elisandro pelo apoio necessário. À minha namorada Natali pelo carinho, amor, compreensão e por ter me acompanhado em vários momentos, inclusive com sugestões na pesquisa. Obrigado pelo apoio e por compreenderem os momentos de minha ausência ou sobrecarga de estudo e trabalho. Aos familiares, por acompanharem meu crescimento pessoal e profissional.

Aos amigos Luciele, Rafael e Sandra que me propiciaram construir um ciclo de amizade durante a graduação e que será eterno e à amiga Natália pelo apoio e comprometimento nos projetos que participamos. Aos colegas do Mestrado pelos momentos de convívio e estudo. Aos bolsistas de Iniciação Científica do grupo de pesquisa que contribuíram com as implementações computacionais.

À minha orientadora Professora Elaine Corrêa Pereira por possibilitar-me os estudos na área de Pesquisa Operacional e aceitar minha orientação, acreditando em meu potencial. Agradeço por suas contribuições no trabalho e seu envolvimento.

Aos professores da Graduação e do Mestrado por me mostrarem o quanto esta profissão é magnífica e gratificante, além de me ensinarem os conhecimentos suficientes para um bom profissional e acreditarem no meu potencial. Em especial, agradeço à professora: Marília Dall'Asta.

À CAPES, pelo financiamento das bolsas e aos membros da Banca, por aceitarem o convite para avaliar o trabalho, sugerindo contribuições.

Resumo

Esta pesquisa apresenta o desenvolvimento de um aplicativo para análise da programação de veículos em problemas de roteamento com coleta e entrega. Inicialmente, foi feita uma revisão do estado da arte sobre Problemas de Roteamento de Veículos (PRV's) e suas aplicações, bem como, métodos de solução. Baseado em trabalhos da literatura, foi elaborada uma formulação matemática com restrições específicas, em que a função objetivo busca minimizar o custo de transporte no qual inclui a distância percorrida e tempos penalizados. A partir da formulação foi implementado um aplicativo computacional embasado na metaheurística Recozimento Simulado, tendo as heurísticas de Construção de Rotas e Programação de Horários para gerar a solução inicial e os movimentos de Reordenação, Realocação e Trocas para a estrutura de vizinhança e solução final. Além disso, foi considerado no aplicativo o cálculo de custos com Pernoites, Refeições, Tempo de Espera e Consumo que não estão na função objetivo. Para testar e validar a ferramenta desenvolvida foram utilizados dados de um problema real que trata da logística operacional de roteamento dos veículos que transportam servidores desde uma universidade federal até os polos de apoio presencial em diferentes municípios do Rio Grande do Sul. Foram realizados 15 testes considerando um cenário com 5 requisições para validar o aplicativo e comparar com o problema real. Os resultados encontrados nestes testes foram adequados para o cenário analisado, onde a função objetivo foi minimizada em vários testes e algumas rotas resultantes são viáveis de serem percorridas. Assim, os resultados da pesquisa foram considerados satisfatórios, visto que a formulação matemática e aplicativo desenvolvidos mostraram bons resultados quando comparados aos dados atuais do problema real.

Abstract

This research presents the development of an application for review of vehicle scheduling in routing problems with pickup and delivery. Initially, a review was made of the state of the art on Vehicle Routing Problem (VRP's) and their applications, as well as methods of solution. Based on literature, we present a mathematical formulation with specific restrictions, in which the objective function seeks to minimize the cost of transport by which includes the distance traveled and time penalized. From the formulation was implemented a software grounded in the Simulated Annealing metaheuristic, with heuristics Construction Schedule Routes and Schedules to generate the initial solution and moves reordering, Relocation and Exchanges for the neighborhood structure and the final solution. Furthermore, the application was considered in calculating costs Overnights Meal Timeout and consumption that are not in the objective function. To test and validate the developed tool we used data from a real problem dealing with operational logistics routing of vehicles carrying servers from a federal university to the poles supporting presence in different municipalities of Rio Grande do Sul 15 tests were performed considering a scenario with 5 requests to validate the application and compare with the real problem. The results of these tests were found suitable for the analyzed scenario, where the objective function was minimized in several tests and some resulting routes are feasible to be covered. Thus, the search results were considered satisfactory, since the mathematical formulation and application developed showed good results when COMPARED the current data of the real problem.

Lista de Tabelas

2.1	Analogia do processo termodinâmico com um problema de otimização . . .	27
6.1	Tabela de veículos e características	69
6.2	Parâmetros dos Tempos e Horários	70
6.3	Parâmetros das Penalizações dos 15 testes	71
6.4	Requisições do cenário analisado	72
6.5	Resultados do teste T1	73
6.6	Resultados dos 15 Testes	75
6.7	Resultado detalhado da Estrutura 3 do T6	76
6.8	Comparação de T6 com resultado empírico	78
6.9	Tempo de Execução dos Testes	81
A.1	Coordenadas geográficas dos pontos em graus decimais	99
A.2	Tabela de identificação das arestas com distâncias e tempos	101
A.3	Cadastro dos Servidores	103
A.4	Requisições dos Servidores	104
B.1	Resultados do Teste 1	105
B.2	Resultados do Teste 2	106
B.3	Resultados do Teste 3	106
B.4	Resultados do Teste 4	107
B.5	Resultados do Teste 5	107
B.6	Resultados do Teste 6	108
B.7	Resultados do Teste 7	108
B.8	Resultados do Teste 8	109
B.9	Resultados do Teste 9	109
B.10	Resultados do Teste 10	110

B.11 Resultados do Teste 11	110
B.12 Resultados do Teste 12	111
B.13 Resultados do Teste 13	111
B.14 Resultados do Teste 14	112
B.15 Resultados do Teste 15	112

Lista de Figuras

3.1	Esquema do Movimento Reordenar.	43
3.2	Esquema do Movimento Realocar	45
3.3	Esquema do Movimento Trocar	48
4.1	Tela inicial do aplicativo	51
4.2	Zoom das Opções da Tela inicial	52
4.3	Tela de inserção dos parâmetros	53
4.4	Tela para inserção das requisições de transporte	54
4.5	Tela dos movimentos	56
4.6	Representação das rotas resultantes	57
5.1	Grafo das ligações entre os vértices. Os pontos representados por X são os polos e os representados por Y são as demais cidades ou trevos de rodovias	62
5.2	Zoom do trecho da Laguna dos Patos	64
5.3	Representação da localização dos polos, cidades e trevos	65
6.1	Zoom da Tela de representação das rotas	68
A.1	Esquema do procedimento do Recozimento Simulado, Rodrigues (2012) . .	114

Lista de Siglas

PRV	Problema de Roteamento de Veículos
PRVCE	Problema de Roteamento de Veículos de Coleta e Entrega
PRVCEs	Problema de Roteamento de Veículos de Coleta e Entrega Simultâneas
DARP	<i>Dial-a-Ride Problem</i> (Problema “porta em porta”)
FURG	Universidade Federal do Rio Grande
EaD	Educação a Distância
UAB	Universidade Aberta do Brasil
SEaD	Secretaria de Educação a Distância
PROLIC	Pró-Licenciatura
IMEF	Instituto de Matemática, Estatística e Física
IE	Instituto de Educação
C3	Centro de Ciências Computacionais
ICHI	Instituto de Ciências Humanas e da Informação
PRVJT	Problema de Roteamento de Veículos com Janela de Tempo
GRASP	<i>Greedy Randomized Adaptive Search Procedure</i> (Procedimento de Busca Gulosa, Randomica e Adaptativa)
AG	Algoritmos Genéticos
SA	<i>Simulated Annealing</i> (Recozimento Simulado)
PD	Programação Dinâmica
LR	Lista de Requisições
SJN	São José do Norte
GISDK	<i>Geographic Information System Developer’s Kit</i> (Pacote para Desenvolvimento de Sistema de Informações Geográficas)
FO	Função Objetivo
HPH	Heurística de Programação de Horários

HCR	Heurística de Construção das Rotas
ANP	Agência Nacional do Petróleo
HE	Horário Estimado
HP	Horário Programado

Lista de Símbolos

$\bar{k}$	Número total de veículos
K	Conjunto de Veículos
V	Conjunto de locais
n	Número total de locais
G	Grafo não-direcionado
A	Conjunto de arestas
$\bar{n}$	Número total de requisições de transporte
Q_i	Quantidade de assentos ocupados no veículo no local i
Q_k''	Capacidade Máxima de cada veículo k
$(qE)_i$	Quantidade de pessoas que são entregues no local i
$(qC)_i$	Quantidade de pessoas que são coletadas no local i
T_k''	Tempo máximo de viagem permitido para o veículo k
t_{ij}	Tempo de viagem entre dois locais i e j
d_{ij}	Distância entre dois locais i e j
x_{ij}^k	Variável de decisão em relação aos veículos
s_i	Duração do intervalo de tempo de coleta ou entrega no local i
E_i	Horário de coleta da pessoa no local i
F_j	Horário de entrega num local j
Q_r^k	Quantidade de paradas do veículo para refeição
Q_p^k	Quantidade de paradas do veículo para pernoite
$(HE_1)_i$	Horário Estimado INICIAL no local i
$(HE_2)_j$	Horário Estimado FINAL no local j
$(HP_1)_i$	Horário Programado INICIAL no local i
$(HP_2)_j$	Horário Programado FINAL no local j
T_{vr}	Tempo de viagem necessário para que ocorra uma parada do veículo para refeição

t_d	Duração do tempo de viagem diário
T_{vk}	Tempo total de viagem do veículo k
d_p	Tempo de duração da parada do veículo numa pernoite das pessoas
d_r	Tempo de duração da parada do veículo para refeição das pessoas
H_p	Horário de parada do veículo para pernoite das pessoas
H_m	Horário permitido de saída da garagem para início da rota
HT_p	Horário de tolerância para pernoite
D_p	Valor da Diária da pernoite para uma pessoa
V_r	Valor da refeição para uma pessoa
D_j	Horário em que a pessoa está disponível para ser coletada, após sua entrega
w_i	Tempo da espera do veículo para realizar uma coleta num determinado local i
C_{ij}^k	Custo Total de combustível do veículo k para o percurso entre os locais i e j
P_{comb}	Preço do combustível utilizado pelo veículo
c_k	Consumo de combustível do veículo k
$CEsp$	Valor atribuído à pessoa como custo de ficar esperando a coleta de outra pessoa
$CTEsp$	Custo Total de espera das pessoas
$CRef$	Custo Total de refeição das pessoas
$CPer$	Custo Total de Pernoite das pessoas
$CTotal$	Soma dos custos totais
φ_1	Parâmetro que penaliza os horários iniciais
φ_2	Parâmetro que penaliza os horários finais
φ_3	Parâmetro que penaliza o tempo máximo de viagem
φ_4	Parâmetro que penaliza o tempo de espera do veículo
$\bar{m}$	Número total de rotas vazias
α	Razão de resfriamento do Recozimento Simulado
T_i	Temperatura inicial do Recozimento Simulado
T_c	Temperatura de congelamento do Recozimento Simulado
$SAMax$	Número máximo de iterações do Recozimento Simulado
$R1$	Rota 1 qualquer nos movimentos realocar e trocar
$R2$	Rota 2 qualquer nos movimentos realocar e trocar

Sumário

RESUMO	v
Abstract	vi
Lista de Tabelas	viii
Lista de Figuras	ix
Lista de Siglas	x
Lista de Símbolos	xii
1 Introdução	1
1.1 Considerações Iniciais	1
1.2 Importância do Trabalho	3
1.3 Objetivos do Trabalho	4
1.4 Organização do Trabalho	5
2 Revisão Bibliográfica	6
2.1 Problema de Roteamento de Veículos	6
2.2 Problema de Roteamento de Veículos com Janelas de Tempo (PRVJT) . .	8
2.2.1 Formulação Matemática	8
2.2.2 Trabalhos relacionados	10
2.3 Problema de Roteamento de Veículos com Coleta e Entrega (PRVCE) . .	11
2.3.1 Trabalhos relacionados	11
2.4 Problema de Roteamento de Veículos com Coleta e Entrega Simultâneas (PRVCES)	12
2.4.1 Formulação Matemática	13

2.4.2	Trabalhos relacionados	14
2.5	Problema de Roteamento de Veículos <i>Dial-a-Ride</i> (PRVDAR)	15
2.5.1	Formulação Matemática	16
2.5.2	Trabalhos relacionados	20
2.6	Métodos de Solução	22
2.6.1	Métodos Exatos	22
2.6.2	Métodos Heurísticos	23
2.6.3	Metaheurísticas	24
2.6.3.1	Algoritmos Genéticos	25
2.6.3.2	Busca Tabu	25
2.6.3.3	GRASP	26
2.6.3.4	Recozimento Simulado	27
2.7	Considerações	28
3	Modelagem do Problema	30
3.1	Formulação Matemática	30
3.1.1	Função Objetivo e Restrições	31
3.1.2	Penalizações	34
3.2	Custo Total	37
3.3	Descrição das Heurísticas	38
3.3.1	Heurísticas para Solução Inicial	38
3.3.2	Movimentos da Estrutura de Vizinhaça	42
3.4	Considerações	49
4	Operacionalização do Aplicativo	50
4.1	Inserção dos dados	51
4.2	Considerações	58
5	Contextualização do Problema Real	59
5.1	Breve Histórico da EaD	59
5.2	Características do Problema	60
5.3	Mapeamento Geográfico dos Pontos	64
5.4	Considerações	66

6	Análise dos Resultados	67
6.1	Dados utilizados nos testes	67
6.2	Resultados Obtidos e Análise	72
6.2.1	Resultados do Teste 1	73
6.2.2	Resultados dos 15 Testes	76
6.2.3	Análise Geral	79
6.3	Considerações	81
7	Conclusões e Trabalhos Futuros	82
7.1	Conclusões	82
7.2	Trabalhos Futuros	84
	Referências Bibliográficas	86
A	Tabelas de dados	99
B	Resultados dos Testes	105
A	ANEXOS	113
A.1	Algoritmo de FLOYD	113
A.2	Recozimento Simulado	113

Capítulo 1

Introdução

1.1 Considerações Iniciais

O interesse pela área de Pesquisa Operacional, especialmente no estudo de aplicações reais sobre os diversos problemas de roteamento de veículos, teve um considerável crescimento ao longo das últimas décadas. Autores de diversos países têm pesquisado as diferentes características desses problemas, principalmente os que envolvem o transporte e logística de cargas e/ou pessoas, analisando as possibilidades de resolvê-los desenvolvendo ferramentas computacionais que façam a programação dos veículos e encontrem soluções que minimizam os custos de transporte.

Estas ferramentas computacionais utilizam técnicas de otimização e, segundo Toth e Vigo (1987) *apud* Caires *et al.* (2010), o uso destas ferramentas em grandes proporções propiciou uma economia do custo com transporte entre 5% e 20%, na Europa e Estados Unidos, respectivamente.

No Brasil, o setor de transporte de cargas é responsável por movimentar cerca de 5% do Produto Interno Bruto e o índice de produtividade no setor é 4 vezes menor, comparado ao índice norte-americano (CAIRES *et al.*, 2010). Apesar disso, nos diferentes setores da indústria brasileira, o transporte de mercadorias teve um crescimento no faturamento da atividade em torno de 84% entre 2002 e 2005, em relação aos anos anteriores, segundo dados da pesquisa anual de serviços do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (LOPES, 2008).

Associado a este crescimento, nos últimos anos, ocorreu um significativo aumento dos custos com transporte rodoviário brasileiro influenciado, principalmente, pelo aumento

constante dos preços do combustível (ASSIS, 2007) e pela variação nas tarifas dos pedágios de rodovias federais ou estaduais. No Rio Grande do Sul, por exemplo, considerando os veículos de passeio de dois eixos, o valor nos pedágios da região metropolitana variou de R\$ 2,00 a R\$ 5,30 entre os anos de 2000 e 2007 e, atualmente é de R\$ 6,00 (DAER, 2011) por veículo. Além disso, considerando o transporte rodoviário de passageiros, segundo Pereira (2005), as tarifas intermunicipais e interestaduais têm sido reajustadas constantemente e, provavelmente, é devido aos impostos e variações no preço dos combustíveis e pedágios.

Tratando-se do transporte de passageiros, deve-se levar em consideração diversos fatores que avaliam o conforto e segurança dos mesmos. Estes fatores se referem a qualidade do serviço prestado pelas empresas, o tempo de viagem dos passageiros e a pontualidade, entre outros, (MAURI e LORENA, 2009) que influenciam também no aumento dos custos para as empresas que atendem estes clientes, como transporte escolar, transportes intermunicipal e interestadual, táxis, entre outros.

De uma forma geral, percebe-se o aumento gradativo nos custos com transporte tanto de produtos, quanto de passageiros nas diferentes regiões do país. Com isto, é necessário planejar e programar o percurso a ser realizado pelos veículos, de forma que possam atender as solicitações de entrega e/ou coleta no transporte de produtos, pessoas ou tarefas aleatórias, reduzindo os custos do transporte das empresas. O processo de planejamento ou programação pode ser realizado empiricamente por pessoas designadas para tal função ou através de ferramentas computacionais de roteirização e programação.

Estes processos que organizam o percurso de um determinado veículo estão relacionados ao Problema de Roteamento de Veículo (PRV) que, em geral, consiste em criar possíveis rotas de percurso que saiam de um ponto inicial (origem), realizem o trajeto necessário retornando ao mesmo ponto. Dentre estas possíveis rotas, o método define aquela que oferece o menor custo dada algumas condições impostas pelo problema.

Segundo Bodin *et al.* (1983), existem diferentes tipos de PRV's classificados de acordo com as características do problema real analisado. Dentre estes, aos quais serão comentados na revisão bibliográfica, existe um caso particular denominado de Problema de Roteamento de Veículos com Coleta e Entrega (PRVCE). Este problema vem sendo bastante estudado nos últimos anos (GOLDBARG e LUNA, 2000) e trata de situações em que os veículos entregam e coletam demandas de mercadorias ou pessoas.

Em relação ao transporte de mercadorias ou produtos, existem muitos trabalhos

na literatura de autores que apresentam as características, os métodos de solução e as ferramentas computacionais desenvolvidas que auxiliam as empresas na obtenção de soluções para a organização da logística de distribuição dos produtos. Quanto ao transporte de pessoas, o PRV é classificado como problema “porta-a-porta” do inglês *Dial-a-Ride Problem* (DARP) e, segundo Kaiser (2009), apesar de ser pouco conhecido, muitos pesquisadores têm concentrado esforços na resolução desse tipo de problema aplicando-o em situações reais.

Dados os tipos de PRV’s mencionados, desenvolveu-se esta pesquisa que trata o problema de coleta e entrega simultâneas com uma formulação matemática específica e o desenvolvimento de um aplicativo computacional baseado na metaheurística Recozimento Simulado (*Simulated Annealing*). Este aplicativo possibilita programar as requisições de transporte e os veículos, bem como analisar a minimização da função objetivo (FO). Esta FO considera a distância percorrida pelos veículos, a penalização dos horários estimados em relação aos programados das requisições e o tempo total de viagem em relação ao máximo permitido. Estão incluídos no aplicativo o cálculo dos custos de Pernoites, Refeição, Tempo de Espera e Combustível (todos estes custos fora da função objetivo), de forma que possibilitem a análise dos resultados para uma tomada de decisão.

Para testar e validar o aplicativo foram utilizados dados de um problema real contextualizado na Educação a Distância (EaD) da Universidade Federal do Rio Grande (FURG). Este problema trata da organização da logística operacional dos veículos para o transporte de professores, tutores e/ou palestrantes desde a Universidade até os respectivos polos de apoio presencial, situados em diferentes municípios do Rio Grande do Sul.

1.2 Importância do Trabalho

A relevância de realizar estudos sobre os PRV’s está no fato de que, tanto no transporte de mercadorias, quanto no transporte de pessoas, objetiva-se buscar a elaboração de métodos de solução robustos e flexíveis que possibilitem organizar a logística das empresas envolvidas, a fim de reduzir os custos com transporte. É importante ressaltar que devido ao crescimento no transporte rodoviário de passageiros, surgiram novas empresas que realizam o transporte de funcionários que trabalham em diferentes setores

e, no caso de Rio Grande (RS), percebe-se um crescimento importante no setor naval e na construção civil. Com isto, é necessário que se realize estudos relacionados à logística de transporte, buscando desenvolver métodos que proporcionem a solução desses problemas.

Muitos trabalhos da literatura utilizando a programação de veículos com coleta e entrega contribuíram de maneira significativa para solucionar problemas de logística em empresas como a Petrobrás, a Hidrelétrica de Itaipu, empresas de transporte de passageiros ou de idosos e no transporte escolar urbano e rural. Em todos estes casos, a importância estava em reduzir os custos e organizar a logística de transporte da melhor forma possível.

Em virtude do crescimento mencionado acima, é importante desenvolver pesquisas que auxiliem na análise de problemas de transporte, minimizando os custos. Desta forma, para uma empresa que realiza o transporte de cargas ou pessoas é fundamental otimizar as rotas de veículos desde o centro de distribuição até seus destinos.

Assim, esta pesquisa surge para contribuir com a programação de veículos em problemas de coleta e entrega, possibilitando organizar a logística de viagens e minimizar os custos de transporte. Além disso, o aplicativo desenvolvido pode contribuir para a literatura por ter características específicas e com flexibilidade de aplicação em outros problemas reais, além do que é analisado neste trabalho.

1.3 Objetivos do Trabalho

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver um aplicativo computacional que possibilite o planejamento operacional da frota de veículos em problemas de coleta e entrega de pessoas, minimizando os custos de transporte.

O objetivo geral pode ser subdividido nos seguintes objetivos específicos:

- i. Elaborar uma formulação matemática que inclui restrições específicas e penalizações de tempo e horários na função objetivo;
- ii. Desenvolver a estrutura do aplicativo, implementando-o com base em heurísticas desenvolvidas neste trabalho e na metaheurística Recozimento Simulado;
- iii. Avaliar a estrutura e desempenho do aplicativo desenvolvido, bem como sua capacidade de resposta imediata;

- iv. Testar e validar o aplicativo utilizando dados de um problema real;
- v. Apresentar o aplicativo como proposta de utilização para análise de outros problemas.

1.4 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado como descrito a seguir. Neste capítulo, estão a introdução do trabalho, a importância da pesquisa desenvolvida e os objetivos. No capítulo 2 encontra-se a revisão bibliográfica com o estado da arte sobre os problemas de roteamento de veículos, especialmente os problemas de coleta e entrega, com a descrição de vários trabalhos de autores que estudaram estes problemas com as características específicas, seus modelos matemáticos e alguns métodos de solução.

No Capítulo 3 apresenta-se a formulação matemática com a função objetivo, restrições, custos do problema e heurísticas desenvolvidas para a solução inicial do Reconhecimento Simulado, bem como os movimentos Reordenar, Realocar e Trocar. No Capítulo 4 está descrito a operacionalização do aplicativo com a estrutura desenvolvida, os dados de entrada necessários, o *layout* das principais telas de execução e como são apresentados os resultados.

No Capítulo 5 encontra-se a contextualização do problema real que foi utilizado para validar o aplicativo com a descrição das características. Logo a seguir, no Capítulo 6 estão os dados utilizados, os testes realizados e a análise dos resultados para o cenário testado.

Finalmente, no capítulo 7 estão as conclusões finais desta pesquisa com análise geral do aplicativo e da formulação para o problema de roteamento com coleta e entrega simultânea. Além disso, apresenta-se propostas para trabalhos futuros e continuidade dos estudos.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura sobre os problemas de roteamento de veículos e suas variantes, assim como, seus modelos matemáticos e métodos de solução desses problemas. Além disso, também são referenciados trabalhos que envolvem os tipos de problemas de roteamento de veículos e suas aplicações.

2.1 Problema de Roteamento de Veículos

Os estudos sobre problemas de roteamento de veículos (PRV), segundo Netto (2006), começaram a serem explorados por dois grandes matemáticos: Euler em 1736 e Hamilton em 1859, quando estudaram, respectivamente, o Problema das Sete Pontes de Königsberg e o Problema do Caixeiro Viajante. Aproximadamente um século depois, o problema de roteamento de veículos foi aplicado em uma situação prática por Dantzig e Ramser (1959) apud Bodin *et al.* (1983).

A partir de 1959, outros autores realizaram pesquisas e aplicações em problemas reais, dentre eles: Clark e Wright (1964) introduziram os critérios de economia, Beltrami e Bodin (1974) abordaram o problema do recolhimento do lixo, Golden e Magnanti (1977) trataram a distribuição de jornais, Ball *et al.* (1983) estudaram a distribuição de produtos químicos, Golden e Wasil (1987) abordaram a distribuição de bebidas, Daskin (1987) tratou os serviços de emergência e Eglese (1991) a limpeza de ruas com veículos vassoura.

Segundo Goldberg e Luna (2000), o PRV é um problema presente na maioria das empresas de transporte, logística e distribuição, sendo também aplicada no tráfego aéreo e na rede rodoviária de grandes metrópoles. Resumidamente, o principal objetivo do PRV

é determinar dentre as possíveis rotas, qual representa o menor custo, ou seja, uma boa solução, que necessariamente não precisa ser a ótima.

De acordo com Netto (2006), resolver o PRV significa procurar uma maneira de distribuir a um ou mais veículos uma lista de entrega, coleta ou execução de algum serviço devendo os mesmos retornar ao ponto de origem ao término do trabalho. Uma revisão do estado da arte sobre roteamento de veículos encontra-se em Bodin (1983), Costa (2005) e Assis (2007).

Ainda, segundo Martins *et al.* (2007), o PRV pode ser definido como um conjunto de clientes geograficamente dispersos com localização conhecida e demanda por determinado produto. Esta demanda deve ser suprida a partir de um depósito central, por uma frota de veículos com capacidades conhecidas utilizando rotas que minimizem os custos de transporte.

Os trabalhos encontrados na literatura apresentam problemas relacionados aos vários tipos de PRV. Segundo Bodin (1983), podem ser classificados em: Problema do Caixeiro Viajante (PCV), Problema dos Múltiplos Caixeiros Viajantes (PCVM), Problema do Carteiro Chinês (PCC), Problema do Carteiro Chinês Capacitado (PCCC), Problema de Roteamento com Depósito Único e Múltiplos Veículos (PRDMV), Problema de Roteamento com Múltiplos Depósitos e Múltiplos Veículos (PRMDMV), Problema de Roteamento de Veículos com Janela de Tempo (PRVJT), Problema de Roteamento de Veículos com Coleta e Entrega (PRVCE), Problema de Roteamento de Veículos com Coleta e Entrega Simultâneas (PRVCES). Quaisquer destes problemas citados podem apresentar muitas restrições e, segundo Goldbarg e Luna (2000), são classificadas em:

- Restrições de Janelas de Tempo: refere-se ao tempo total de viagem e/ou tempo de espera do veículo e/ou tempo de permanência da pessoa no veículo e/ou tempo de atendimento nos clientes;
- Restrições de Capacidade do Veículo: diz respeito ao limite da capacidade de cada veículo;
- Restrições de Unicidade: significa que um único veículo deve ser utilizado para cada rota ou que um local deve ser visitado por um único veículo;
- Restrição de Frota: a frota pode ser do tipo homogênea ou heterogênea em relação a capacidade;

- Restrições de Combustível: depende do tamanho do tanque de combustível, do consumo médio dos veículos e da velocidade média dos veículos nas rodovias.

Os tipos de PRV citados anteriormente são aplicados em vários problemas reais. Estes podem ser encontrados nos trabalhos de Pelizaro (2000), que propôs uma avaliação do desempenho do *software* comercial *Delivery*, utilizando dados da literatura e dados reais de uma empresa transportadora de produtos em geral; Brasileiro (2008), que desenvolveu um *software* de roteirização para coleta de resíduos domiciliares e Costa (2005), que utilizou técnicas de pesquisa operacional para agrupar os clientes de uma concessionária de energia melhorando o atendimento pelas equipes disponíveis.

Além destes, encontrou-se na literatura estudada aplicações do PRV no transporte de idosos ou pessoas com alguma deficiência motora, no transporte escolar urbano ou rural, na entrega de correspondências dos correios, entre outros (Znamensky e Cunha, 1999; Haidemann, 2007; Prata, 2009). Estas aplicações têm características específicas e restrições a serem respeitadas visando alcançar seus objetivos para solução do problema.

2.2 Problema de Roteamento de Veículos com Janelas de Tempo (PRVJT)

O PRVJT é uma generalização do PRV. Este problema trata as janelas de tempo de atendimento dos clientes, considerando os tempos de percurso das rotas e os intervalos desde o início até o final da rota.

2.2.1 Formulação Matemática

Esta formulação foi desenvolvida por Tan *et al.* (2001) e utilizada por Júnior *et al.* (2005) em seu trabalho. Nesta formulação, considera-se um conjunto de K veículos de frota heterogênea e $\{0, 1, 2, \dots, n\}$ o conjunto dos $n + 1$ clientes.

Além disso, define-se os seguintes dados de entrada: c_{ij} - custo do percurso entre os clientes i e j ; d_{ij} - distância euclidiana entre o cliente i e o cliente j ; t_{ij} - tempo de viagem entre os clientes i e j ; m_i - demanda do cliente i ; q_k - capacidade do veículo k ; e_i - início da janela de tempo do cliente i ; l_i - término da janela de tempo do cliente i ; f_i - duração do tempo de serviço no cliente i ; r_k - tempo máximo da rota permitido para

cada veículo k .

As variáveis de decisão são descritas como: t_i - hora de chegada no cliente i ; w_i - tempo de espera no cliente i ; x_{ij}^k - variável binária, onde $x_{ij}^k = 1$, se o veículo k faz o percurso entre i e j ou $x_{ij}^k = 0$, caso contrário.

Assim, tem-se a seguinte formulação:

$$\text{Min} \sum_{i=0}^n \sum_{j=0; j \neq i}^n \sum_{k=1}^K c_{ij} x_{ij}^k \quad (2.1)$$

Sujeita a:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^n x_{ij}^k \leq K \quad \text{para } i = 0 \quad (2.2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij}^k = \sum_{j=1}^n x_{ji}^k \leq 1 \quad \text{para } i = 0, \forall k \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (2.3)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=0, j \neq i}^n x_{ij}^k = 1 \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (2.4)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=0, i \neq j}^n x_{ij}^k = 1 \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (2.5)$$

$$\sum_{i=1}^n m_i \sum_{j=0, j \neq i}^n x_{ij}^k \leq q_k, \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (2.6)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0, j \neq i}^n x_{ij}^k (t_{ij} + f_i + w_i) \leq r_k, \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (2.7)$$

$$t_0 = w_0 = f_0 = 0 \quad (2.8)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=0, i \neq j}^n x_{ij}^k (t_i + w_i + f_i + t_{ij}) \leq t_j, \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (2.9)$$

$$e_i \leq (t_i + w_i) \leq l_i, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (2.10)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in \{1, 2, \dots, n\}, \forall k \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (2.11)$$

A expressão (2.1) é a função objetivo do problema e visa minimizar o custo de transporte e as demais equações são as restrições, sendo que a equação (2.2) especifica que existe no máximo K rotas saindo do depósito. A restrição (2.3) determina que todas as rotas iniciam e terminam no depósito. As restrições (2.4) e (2.5) definem que todo nó

cliente pode ser visitado somente uma vez por um veículo. A restrição (2.6) assegura que a capacidade de cada veículo será respeitada e a (2.7) limita o tempo máximo de viagem. As restrições (2.8), (2.9) e (2.10) asseguram o respeito às janelas de tempo. Finalmente, a restrição (2.11) indica a bivalência da variável de decisão.

2.2.2 Trabalhos relacionados

Júnior *et al.* (2005) abordam um algoritmo denominado de SA-RAI baseado no Recozimento Simulado (*Simulated Annealing*) para tratar o PRVJT com frota homogênea. O algoritmo proposto utiliza mecanismos auto-adaptativos para determinar a temperatura inicial e procedimentos de busca local sempre que uma nova melhor solução é gerada. Nos testes realizados com 168 problemas da literatura, foram encontrados 13 novos melhores resultados.

Oliveira *et al.* (2004) trataram o PRVJT através de uma alteração no algoritmo genético clássico. No trabalho eles utilizaram a heurística de inserção *Push-Forward* para construção da população inicial do Algoritmo Genético (AG) e como resultados, mesmo sem aplicação dos operadores de cruzamento, o AG foi capaz de encontrar bons resultados comparados com instâncias da literatura.

Costa (2005) abordou o PRVJT e apresentou quatro metodologias baseadas nas metaheurísticas *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP) e Busca Tabu, a fim de encontrar bons resultados. Nas metodologias desenvolvidas foram utilizadas heurísticas gulosas e o procedimento de *Clark* e *Wright*, sendo testadas com instâncias clássicas da literatura. Os resultados mostraram soluções finais com qualidade e melhores que os conhecidos em 12 instâncias das 168 testadas.

Vieira (2009) implementou o Algoritmo Genético para o PRVJT. Foram analisados os procedimentos de cruzamento, mutação e *Hill-Climbing*, sendo que os testes são baseados em 56 problemas da literatura, com 100 clientes cada. Como resultado, a comparação entre o algoritmo implementado pela autora e algumas metaheurísticas da literatura, foi observado a qualidade do algoritmo desenvolvido que apresentou soluções próximas àsquelas obtidas pelas demais metaheurísticas.

2.3 Problema de Roteamento de Veículos com Coleta e Entrega (PRVCE)

O PRVCE é um problema onde o transporte de cargas é realizado entre clientes que solicitam pedidos de coleta e entrega. Basicamente as entregas são realizadas a partir de um depósito e as coletas são conduzidas dos clientes até o depósito.

De acordo com Lima (2009), o PRVCE pode ser formulado como um grafo completo e não orientado $C = (V, A)$, onde $V = \{0, 1, \dots, N\}$ é o conjunto de vértices, sendo que o vértice 0 representa o depósito e os demais vértices representam os clientes. Os arcos são definidos como $A = \{(i, j) : i, j \in V; i \neq j\}$ e cada arco $(i, j) \in A$ tem um custo c_{ij} não-negativo associado que corresponde à duração da viagem. O conjunto $H = \{1, \dots, p\}$ representa as mercadorias a serem transportadas e cada vértice, incluindo o depósito, pode necessitar de uma demanda para cada tipo de mercadoria. A matriz $D = (d_{hi})$ representa os tipos de mercadorias, sendo que d_{hi} (positivo) refere-se à quantidade de mercadoria h que sai para o vértice i e $-d_{hi}$ (negativo) é a quantidade de mercadoria h requerida pelo vértice i .

No caso de transporte de passageiros é mais comum falar em pedido em vez de mercadoria, mas do ponto de vista de modelagem matemática não há diferença. Assume-se que $\sum_{i \in V} d_{ih} = 0 : h \in H$, ou seja, deve haver um equilíbrio entre coleta e entrega de cada mercadoria. $K = \{1, \dots, m\}$ é o conjunto de veículos disponíveis com capacidade Q . Uma rota é um circuito com alguns vértices, começando e terminando no depósito. Os PRVCEs consistem em construir rotas com m veículos tais que:

- Todos as coletas e entregas sejam satisfeitas;
- A carga de um veículo não exceda a sua capacidade;
- A soma dos custos das rotas seja minimizada;
- Em uma rota válida um veículo começa e termina seu trajeto no depósito.

2.3.1 Trabalhos relacionados

Nanry e Barnes (2000) desenvolveram seu trabalho utilizando a metaheurística Busca Tabu Reativa. Na abordagem feita pelos autores, utilizaram veículos homogêneos

e depósito único. Os testes foram feitos com grupos de 25, 50 e 100 clientes. Em todos os testes foram encontradas soluções ótimas, sendo que para grupos de 50 clientes, dos 15 testes realizados, foram encontradas 14 soluções ótimas e nos grupos de 100 clientes, 8 soluções ótimas de 9 testes aplicados. Segundo Assis (2007), esta foi a primeira aplicação do algoritmo de Busca Tabu Reativa para resolução do PRVCE que apresentou bons resultados.

Júnior (2003) propôs a utilização do Algoritmo Genético para resolução do problema dinâmico de Coleta e Entrega. Os resultados mostraram que o modelo proposto apresentou uma convergência em busca de uma solução satisfatória.

Montané (2006) descreve um algoritmo de Busca Tabu Adaptativo para resolver o PRVCE. O algoritmo foi testado utilizando dois conjuntos de dados da literatura, totalizando 640 testes com 50 ou 100 clientes. Nestes testes, os resultados do algoritmo desenvolvido pelo autor foram comparados com resultados do Busca Tabu e Busca Tabu Não-Adaptativo. Como resultado, o Busca Tabu Adaptativo apresentou melhores soluções e mostrou ser mais eficaz que estes outros dois métodos.

Lu e Dessouky (2006) apresentam uma heurística construtiva baseada em inserção aplicada ao PRVCE com Janela de Tempo. O procedimento consiste em inserir novos vértices em rotas previamente existentes até que isso não seja possível. Quando isto ocorrer, uma nova rota é construída e o processo continua. Para escolha do vértice e lugar a ser inserido na rota, as heurísticas de inserção usam critérios de economia na distância. Assim, os autores propõem como alternativa de melhorar as soluções, inserir um novo critério que avalia o grau de liberdade para futuras inserções com janelas de tempo.

Além destes, outros trabalhos podem ser encontrados em Lima (2009), onde o mesmo apresenta uma revisão bibliográfica com aplicações e métodos de solução para o PRVCE.

2.4 Problema de Roteamento de Veículos com Coleta e Entrega Simultâneas (PRVCES)

O PRVCES é uma variação do PRVCE. A diferença deste problema é que na realização do serviço de coleta também é realizado um serviço de entrega. Desta forma,

os custos de ambas atividades são reduzidos.

2.4.1 Formulação Matemática

A formulação descrita a seguir foi proposta por Montané e Galvão (2006), onde utilizaram uma restrição de distância máxima a ser percorrida nas rotas. Então, define-se $K = \{1, 2, \dots, \bar{k}\}$ o conjunto de $\bar{k}$ veículos da frota homogênea com capacidade Q , $V = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ o conjunto dos n clientes e $V_0 = V \cup \{0\}$ o conjunto dos clientes incluindo o depósito (cliente 0).

Além disso, define-se os seguintes parâmetros: c_{ij} - distância entre os clientes i e j ; p_j - demanda de coleta do cliente j , $j = 1, 2, \dots, n$; d_j - demanda de entrega do cliente j , $j = 1, 2, \dots, n$; MD - distância máxima permitida para cada rota.

As variáveis de decisão são descritas como: x_{ij}^k - variável binária, onde $x_{ij}^k = 1$, se o veículo k faz o percurso entre i e j ou $x_{ij}^k = 0$, caso contrário; y_{ij} - demanda de coleta nos clientes da rota até o vértice i (inclusive o vértice i) e transportadas no arco (i, j) ; z_{ij} - demanda de entrega nos clientes da rota após o vértice i e transportadas no arco (i, j) .

Desta forma, a função objetivo é dada por:

$$\text{Min} \sum_{k=1}^{\bar{k}} \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij} x_{ij}^k \quad (2.12)$$

Sujeita a:

$$\sum_{k=1}^{\bar{k}} \sum_{i=0}^n x_{ij}^k = 1 \quad \forall j \in V, \forall k \in K \quad (2.13)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ij}^k - \sum_{j=0}^n x_{ji}^k = 0 \quad \forall j \in V_0, \forall k \in K \quad (2.14)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{0j}^k \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (2.15)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij} x_{ij}^k \leq MD \quad k = 1, \dots, \bar{k} \quad (2.16)$$

$$\sum_{i=0}^n y_{ji} - \sum_{i=0}^n y_{ij} = p_j \quad \forall j \neq 0 \quad (2.17)$$

$$\sum_{i=0}^n z_{ij} - \sum_{i=0}^n z_{ji} = d_j \quad \forall j \neq 0 \quad (2.18)$$

$$y_{ij} + z_{ij} \leq Q \sum_{k=1}^{\bar{k}} x_{ij}^k \quad \forall i, j \in V_0 \quad (2.19)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in V_0 \quad (2.20)$$

$$y_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \in V_0 \quad (2.21)$$

$$z_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \in V_0 \quad (2.22)$$

A função objetivo é dada pela equação (2.12) e visa minimizar a distância total percorrida pelos veículos. A restrição (2.13) assegura que cada cliente é visitado por um único veículo e a (2.14) garante que o veículo que atende o cliente é o mesmo que sai, ou seja, conservação do fluxo e continuidade da rota. A restrição (2.15) admite que no máximo $\bar{k}$ veículos podem ser utilizados e a (2.16) limita a distância máxima permitida para a rota. As restrições (2.17) e (2.18) permitem que as demandas de coleta e entrega, respectivamente, sejam satisfeitas para cada cliente e a (2.19) permite o transporte das demandas nos arcos impondo o limite máximo de cargas a serem transportadas por cada veículo. A restrição (2.20) garante a validade da variável x e as restrições (2.21) e (2.22) garantem que as variáveis y e z não sejam negativas, respectivamente, para as demandas de coleta e entrega.

2.4.2 Trabalhos relacionados

O PRVCES foi primeiramente estudado por Min (1989), aplicando-o no sistema de distribuição de bibliotecas públicas com veículos de capacidades iguais. Posteriormente, Halse (1992) tratou o PRVCES utilizando uma heurística que, primeiramente, associa os clientes aos veículos e, em seguida, gera as rotas pelo procedimento baseado na busca local *3-opt*.

Vural (2003) estudou duas versões do Algoritmo Genético proposto por Goldberg (1989). A primeira codifica os indivíduos através de chaves aleatórias, desenvolvidas por Bean (1994), e a segunda versão utiliza uma heurística de refinamento baseada no trabalho de Topcuoglu e Sevilimis (2002). É relevante destacar que, segundo os autores, este foi o primeiro trabalho a utilizar uma metaheurística para resolver o PRVCES.

Montané e Galvão (2006) utilizaram o algoritmo Busca Tabu para a solução do PRVCES. Os autores consideraram quatro tipos de estruturas de vizinhança e estas, utilizam movimentos de realocação, troca e cruzamento. Para gerar uma solução vizinha foram desenvolvidas duas estratégias: a primeira considera o primeiro movimento viável e a segunda, o melhor movimento viável. Os resultados computacionais foram implementados para um conjunto de 87 problemas entre 50 e 400 clientes. Os resultados foram melhores em relação aos da literatura.

Assis (2007) utilizou a formulação matemática apresentada anteriormente, porém descartou a restrição (2.16) que se refere a limitação da distância máxima percorrida. Neste trabalho, a autora utilizou 5 heurísticas construtivas realizando comparação entre elas e propôs 3 novas heurísticas, para posterior implementação do GRASP. Os resultados mostraram que as heurísticas propostas foram melhores em 90% dos testes realizados. As 4 melhores heurísticas foram utilizadas na fase de construção do GRASP mostrando que, em 64% das instâncias analisadas houve redução na distância total trafegada.

Além destes, existem outros autores na literatura que exploraram o PRVCES. Uma boa revisão sobre o problema pode ser encontrada em Parragh *et al.* (2006).

2.5 Problema de Roteamento de Veículos *Dial-a-Ride* (PRVDAR)

O PRVDAR é um caso particular dos problemas de Coleta e Entrega. Este problema é originado do termo inglês *Dial-a-Ride Problem* (DARP) e consiste no desenvolvimento de rotas e escalas de veículos para transportar diversos usuários, os quais especificam requisições de embarque e desembarque (coleta e entrega) entre locais de origem e destino específicos (MAURI e LORENA, 2009).

Seu principal objetivo é determinar um conjunto de rotas otimizadas para os veículos, que sejam capazes de transportar o maior número de pessoas entre os locais de origem e destino, obedecendo a algumas restrições impostas pelo problema, considerando a qualidade do serviço e a minimização dos custos operacionais. Normalmente, este problema é aplicado no transporte urbano, escolar ou rural, no transporte de idosos ou deficientes físicos, no transporte de funcionários de empresas, entre outras.

O PRVDAR pode ser classificado em estático ou dinâmico. No caso estático, a

demanda das pessoas a ser atendida é conhecida com antecedência, antes do início do planejamento a ser feito para atender as solicitações do serviço. Para o caso dinâmico a demanda de serviço é imediata, sendo que o roteamento e programação dos veículos ocorrem no momento da solicitação de serviço, adaptando o roteiro definido previamente, de forma que atenda esta nova solicitação.

Segundo Mauri e Lorena (2009), o PRVDAR é bastante comum em problemas reais, mas com pouca abordagem dentro da Pesquisa Operacional devido a sua complexidade de solução. Como envolve o transporte de pessoas é necessário considerar fatores que avaliam a satisfação destas (a qualidade do serviço, pontualidade, tempo de espera) e os custos operacionais (a duração das rotas, o número de veículos e o tempo de viagem). No entanto, surgiram muitas pesquisas nos últimos anos com aplicações reais do PRVDAR e métodos de solução do problema (MAURI e LORENA, 2009).

2.5.1 Formulação Matemática

Uma formulação matemática para o PRVDAR foi proposta por Mauri e Lorena (2009), onde os autores adaptaram o modelo de Cordeau (2006). Esta formulação trata o PRVDAR através de uma função multiobjetivo e várias restrições com múltiplos veículos, frota heterogênea e garagens múltiplas.

Para a formulação assumem-se n requisições de transporte (clientes) que serão atendidas por $\bar{k}$ veículos, sendo que cada cliente especifica um local de embarque i e um de desembarque $n + i$. Sejam $K = \{1, 2, \dots, \bar{k}\}$ o conjunto de veículos disponíveis; G^- o conjunto das garagens de origem; G^+ o conjunto das garagens de destino; $P = \{1, 2, \dots, n\}$ o conjunto dos locais de embarque; $U = \{n + 1, n + 2, \dots, 2n\}$ o conjunto dos locais de desembarque e $N = G^- \cup P \cup U \cup G^+$ o conjunto de todos os locais.

Neste modelo são utilizados os seguintes parâmetros: q_i - carga no veículo para o cliente i , ou seja, número de assentos que o cliente irá ocupar. Esta carga será um valor positivo nos locais de embarque e o mesmo valor, porém negativo, nos locais de desembarque; s_i - representa a duração do serviço de embarque ou desembarque de um cliente em um local; T_k'' - indica o tempo máximo da rota associado ao veículo k ; Q_k'' - capacidade máxima de cada veículo k ; $[e_i, l_i]$ - intervalo de tempo de embarque do cliente na sua origem; $[e_{n+i}, l_{n+i}]$ - intervalo de tempo de desembarque do cliente em seu destino; R_i'' - representa o tempo máximo em que cada cliente poderá permanecer no veículo antes

de seu desembarque; W_i'' - representa o tempo máximo que o veículo espera para início do serviço no local i .

Dados os locais referentes às garagens e pontos pertencentes as requisições, tem-se $t_{i,j}$ que representa o tempo de viagem e $d_{i,j}$ que representa a distância entre os pontos i e j , $\forall i, j \in N, i \neq j$. Além destes parâmetros, são considerados alguns requisitos essenciais para que se obtenha uma solução válida para o problema, sendo eles: a duração da rota para cada veículo k não deve exceder o tempo máximo permitido T_k'' ; o tempo de viagem do cliente i não deve exceder o tempo máximo de viagem permitido R_i'' ; o tempo de espera no local i não deve exceder o tempo máximo de espera permitido W_i'' ; a capacidade Q_k'' dos veículos não pode ser excedida em nenhum local; O início do serviço em todos os locais deve estar dentro dos intervalos pré-definidos.

A partir destas informações, são definidas as variáveis de decisão desta formulação, conforme segue: A_i - é o horário de chegada do veículo no local i , tal que: $A_i = 0$, se $i \in \{G^-\}$ e $A_i = D_{i-1} + t_{i-1,i}$, se $i \in \{P \cup U \cup G^+\}$; D_i - é o horário de saída do veículo do local i , tal que: $D_i = 0$, se $i \in G^+$ e $D_i = B_i + s_i$ se $i \in \{P \cup U\}$ e $D_i = B_i$ se $i \in \{G^-\}$; B_i - é o horário de início do serviço de embarque ou desembarque no local i , tal que: $B_i = D_i$ se $i \in \{G^-\}$ e $B_i = \max\{e_i, A_i\}$ se $i \in \{P \cup U \cup G^+\}$; Q_i - é a quantidade de assentos ocupados no veículo que atende o local i , tal que: $Q_i = 0$, se $i \in \{G^- \cup G^+\}$ e $Q_i = Q_{i-1} + q_i$ se $i \in \{P \cup U\}$; R_i - é o tempo total de viagem em que cada cliente permanece dentro do veículo antes do desembarque, tal que: $R_i = B_{n+i} - D_i$; W_i - é o tempo total em que os veículos ficam esperando para iniciar o embarque ou desembarque dos clientes no local i , sendo: $W_i = 0$ se $i \in \{G^-\}$ e $W_i = B_i - A_i$ se $i \in \{P \cup U \cup G^+\}$; $x_{i,j}^k$ - variável binária, onde $x_{i,j}^k = 1$, se o veículo k faz o percurso entre os pontos i e j ou $x_{i,j}^k = 0$, caso contrário;

Desta forma, tem-se a seguinte formulação matemática, conforme Mauri e Lorena (2009):

Min

$$\omega_0 \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N; j \neq i} (d_{i,j} x_{i,j}^k) + \omega_1 \sum_{k \in K} \sum_{j \in P} x_{g_k^-, j}^k + \omega_2 \sum_{k \in K} (B_{g_k^+} - D_{g_k^-}) + \omega_3 \sum_{i \in P} R_i + \omega_4 \sum_{i \in \{P \cup U\}} W_i + \quad (2.23)$$

$$\beta_0 \sum_{k \in K} \max\{0, (B_{g_k^+} - D_{g_k^-}) - T_k''\} + \beta_1 \sum_{k \in K} \max\{0, R_i - R_i''\} + \beta_2 \sum_{i \in \{P \cup U\}} \max\{0, W_i - W_i''\} + \quad (2.24)$$

$$\beta_3 \sum_{k \in K} \max\{0, \left(Q_i \sum_{i \in \{PUU\}} \sum_{j \in \{PUU\}; j \neq i; j \neq n-i} x_{i,j}^k \right) - Q_k''\} + \beta_4 \sum_{i \in N} \max\{0, e_i - B_i\} + \max\{0, B_i - l_i\} \quad (2.25)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in \{PU\{g_k^+\}\}} x_{g_k^-, j}^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (2.26)$$

$$\sum_{i \in \{UU\{g_k^-\}\}} x_{i, g_k^+}^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (2.27)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in \{PUU\}; j \neq i} x_{i,j}^k = 1 \quad \forall i \in P \quad (2.28)$$

$$\sum_{j \in \{PUU\}; j \neq i} x_{i,j}^k - \sum_{j \in \{PUUU\{g_k^+\}\}; j \neq i; j \neq n+i} x_{n+i,j}^k = 0 \quad \forall k \in K; \forall i \in P \quad (2.29)$$

$$\sum_{j \in \{PUUU\{g_k^-\}\}; j \neq i; j \neq n+i} x_{j,i}^k - \sum_{j \in \{PUU\}; j \neq i} x_{i,j}^k = 0 \quad \forall k \in K; \forall i \in P \quad (2.30)$$

$$\sum_{j \in \{PUU\}; j \neq i} x_{j,i}^k - \sum_{j \in \{PUUU\{g_k^+\}\}; j \neq i; j \neq n-i} x_{i,j}^k = 0 \quad \forall k \in K; \forall i \in U \quad (2.31)$$

$$B_j = (B_i + s_i + t_{i,j} + W_j) \sum_{k \in K} x_{i,j}^k \quad \forall i, j \in N; i \neq j \quad (2.32)$$

$$Q_j = (Q_i + q_i) \sum_{k \in K} x_{i,j}^k \quad \forall i, j \in N; i \neq j \quad (2.33)$$

$$A_i = B_i - W_i \quad \forall i \in \{P \cup U \cup G^+\} \quad (2.34)$$

$$D_i = B_i + s_i \quad \forall i \in \{P \cup U \cup G^-\} \quad (2.35)$$

$$R_i = B_{n+i} - D_i \quad \forall i \in P \quad (2.36)$$

$$A_{g_k^-} = D_{g_k^+} = Q_{g_k^-} = Q_{g_k^+} = W_{g_k^-} = 0 \quad \forall k \in K \quad (2.37)$$

$$A_i, B_i, W_i, D_i, Q_i \quad \text{irrestritas} \quad \forall i \in N \quad (2.38)$$

$$R_i \quad \text{irrestritas} \quad \forall i \in P \quad (2.39)$$

$$x_{i,j}^k \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in N; \forall k \in K; i \neq j \quad (2.40)$$

Nesta formulação, o termo *irrestritas* nas equações (2.38) e (2.39) significa que estas variáveis podem assumir quaisquer valores positivos. Além disso, a função objetivo

está dividida em duas partes, sendo o termo (2.23) que visa minimizar os requisitos não-essenciais do problema e os termos (2.24) e (2.25) que minimizam os requisitos essenciais.

Os requisitos não-essenciais estão relacionados na equação (2.23) e representam, respectivamente: a distância total percorrida para cada veículo; o número de veículos utilizados nas rotas; o tempo total de duração das rotas; o tempo total de viagem de cada pessoa nas rotas desde o embarque até o desembarque e o tempo total de espera dos veículos em cada local. Enquanto que os requisitos essenciais nas expressões (2.24) e (2.25) representam, respectivamente: o tempo que viola o tempo máximo de duração das rotas para cada veículo; o tempo total que excede o tempo máximo de viagem permitido para os clientes; o tempo total que excede o tempo máximo de espera permitido para os veículos em cada local; o excesso na capacidade de cada veículo e o total de tempo que excede as janelas de tempo.

Além disso, estes requisitos são penalizados por dois vetores de números inteiros de forma que seja possível determinar a “importância” de cada requisito da função na solução do problema. Os requisitos não-essenciais são penalizados pelo vetor de inteiros positivos $\omega = [\omega_0, \omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4]$ e os requisitos essenciais por outro vetor semelhante $\beta = [\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4]$ a fim de não encontrar soluções inválidas para o problema.

De acordo com a formulação, tem-se que as restrições (2.26) e (2.27) asseguram, respectivamente, que cada veículo deve sair da garagem de origem e chegar à garagem destino uma única vez. A restrição (2.28) garante que cada cliente é atendido uma única vez e a restrição (2.29) garante que um local de embarque estará sempre na mesma rota de seu local de desembarque. As restrições (2.30) e (2.31) garantem a contenção do fluxo nos veículos, ou seja, o número de clientes que entram é igual ao número que sai dos veículos.

Além destas, a restrição (2.32) representa o horário de início do atendimento em cada local, o tempo de espera do veículo e o veículo que atende o local e a restrição (2.33) determina, para cada local, a quantidade de clientes que devem entrar ou sair do veículo. As restrições (2.34) e (2.35) asseguram, respectivamente, o cálculo dos horários de chegada e saída nos locais atendidos. O tempo máximo de viagem permitido para cada cliente nos veículos é definido pela restrição (2.36) e a restrição (2.37) inicializa as variáveis referentes às garagens de origem e destino. A restrição (2.38) garante a existência e que seja binária a variável de decisão x que define se o veículo faz o percurso entre os pontos i e j . A

garantia de que as demais variáveis sejam irrestritas é definida pelas restrições (2.39) e (2.40).

Esta formulação pode ser utilizada para representar diversos problemas, sendo que a função multiobjetivo pode ser adaptada conforme necessidade. Por ser um modelo novo sua abordagem é bastante interessante de ser investigada (MAURI e LORENA, 2009).

2.5.2 Trabalhos relacionados

Os trabalhos da literatura apontam que os estudos sobre o PRVDAR iniciaram com Psaraftis (1980) que desenvolveu um algoritmo para solucionar os problemas *dial-a-ride* sem janelas de tempo. Em seguida, Psaraftis (1983) complementou o estudo anterior resolvendo o problema com janelas de tempo, ainda para um único veículo. A partir de então, novos estudos foram surgindo e melhorias complementaram os métodos desenvolvidos anteriormente. Em Haidemann (2007), encontra-se a descrição deste algoritmo de Psaraftis e exemplos práticos.

Znamensky e Cunha (1999) aplicam o DARP para tratar o problema de transporte de idosos e deficientes do serviço ATENDE, existente na cidade de São Paulo, desenvolvido pela empresa São Paulo Transporte S/A. O transporte é realizado por veículos de capacidades pequenas, sujeito a algumas restrições operacionais e temporais. O objetivo é determinar roteiros que atendam ao conjunto de clientes, respeitando as restrições impostas pelo problema e a estratégia para solução utilizada foi uma heurística de inserção paralela seguida de uma etapa de melhoria das rotas, utilizando métodos de busca local.

Cordeau (2006) abordou em seu trabalho a utilização do algoritmo de *Brand-and-Cut* para solução do DARP. Nessa abordagem, o problema foi tratado de forma estática, com frota homogênea e depósito único utilizando algumas restrições que tratam os intervalos de realização do serviço em cada ponto da rota e os intervalos de tempo em que a pessoa permanece no veículo antes de chegar ao destino.

Rodrigues (2007) analisou o transporte dos funcionários da usina de Itaipu Binacional em Foz do Iguaçu, no estado do Paraná. Para obtenção dos resultados foi utilizado o algoritmo das p-Mediana de Teitz e Bart para determinar o número de veículos a serem utilizados; posteriormente, foi aplicado o algoritmo de designação de Gillet e Johnson para determinar os pontos de parada dos veículos e, por fim, a otimização por Colônia de Formigas aplicado ao Caixeiro Viajante para determinar a ordem de visita dos pontos.

Os resultados obtidos foram melhores que os utilizados pela empresa.

Haidemann (2007) apresenta um estudo sobre o transporte escolar na cidade de Joinville em Santa Catarina, aplicando um algoritmo matemático baseado na técnica de Programação Dinâmica utilizado para resolver problemas que se caracterizam como DARP. O principal objetivo do trabalho foi construir roteiros que atendessem a todos os pontos de entrega e coleta dentro dos horários pré-determinados pela escola com custo mínimo.

No trabalho de Prata (2009), pode-se encontrar um problema de roteirização do transporte escolar rural nos municípios de São Carlos e Olímpia, em São Paulo. O principal objetivo foi desenvolver um algoritmo que se adaptasse às características do problema apresentado utilizando um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Como ferramenta para desenvolver o algoritmo foi utilizado o SIG-T TransCAD desenvolvido por Caliper (1996), baseado na linguagem de programação que é um pacote para desenvolvimento de sistema de informações geográficas GISDK (*Geographic Information System Developer's Kit*). Os resultados obtidos mostraram que o algoritmo desenvolvido pode ser utilizado como um sistema de apoio à decisão para a definição das rotas do transporte escolar rural.

Faria *et al.* (2010) apresentam um modelo do DARP para o transporte de pessoas com deficiência na cidade de São José dos Campos, São Paulo. Os autores utilizaram a Heurística de Inserção Paralela e implementaram o programa usando a planilha eletrônica do *Excel* e o *Visual Basic* para uma simulação real utilizando 260 requisições iniciais. Como resultados, obtiveram a inserção de 56% dessas requisições durante o período de 1h58min de execução do programa, reduzindo o tempo de roteamento feito de forma manual com um mapa e planilha de cálculos.

Rodrigues (2011) desenvolveu um estudo sobre o transporte público de cadeirantes na cidade de Vitória, no Espírito Santo. Foi utilizado a Programação Linear Inteira Mista para solucionar o DARP com janelas de tempo. Os dados reais foram executados no *software* CPLEX (ILOG, 2006) e testados para cenários de 10, 15 e 20 requisições de atendimento. Como resultados do trabalho é possível obter uma otimalidade para cenários com até 20 requisições analisando, também, a frota utilizada.

Assim, o DARP pode ser aplicado a diferentes problemas de forma que sejam analisadas as rotas, buscando minimizar os custos operacionais e/ou a insatisfação dos passageiros de sua origem até o destino.

2.6 Métodos de Solução

Existem muitas estratégias de solução para os PRV. Segundo Laporte (1992), estas estratégias se dividem em dois grupos denominados de Métodos Exatos e Métodos Heurísticos, os quais permitem obter soluções, respectivamente, ótimas ou aproximadas. No entanto, a busca por soluções aproximadas para os PRV's têm sido intensificada nos últimos anos e, atualmente, existem muitas estratégias de solução.

Em termos de complexidade computacional para encontrar a solução, os diferentes tipos de PRV são classificados como NP-Completo, ou seja, o esforço computacional para obter a solução do problema cresce exponencialmente de acordo com o tamanho do problema (GOLDBARG e LUNA, 2000; CORMEN *et al.*, 2002).

2.6.1 Métodos Exatos

Segundo Arakaki (1998), os Métodos Exatos são normalmente aplicados no Problema do Caixeiro Viajante e possibilitam a obtenção das soluções ótimas para problemas reais com quantidades pequenas de vértices. Como exemplos destes métodos, têm-se: a Programação Dinâmica, o método *Branch-and-Bound* e o método *Branch-and-Cut* (PRESTES, 2006).

Segundo o trabalho de Mauri (2006), os primeiros registros sobre o método da Programação Dinâmica (PD) está em Psaraftis (1980). A PD, de acordo com Haidemann (2007), visa resolver problemas que exigem refazer os cálculos de diversos sub-problemas. Além disso, ela exige uma tomada de decisão em cada estágio e pode ser classificada quanto à sua natureza em: Programação Dinâmica Determinística ou Programação Dinâmica Probabilística. Na primeira classificação, o estado no estágio posterior é determinado pelo estado e decisão no estágio atual. Na PD Probabilística, o estado no estágio posterior é determinado seguindo uma distribuição de probabilidade.

O método *Branch-and-Bound*, segundo Prestes (2006), basicamente é um processo que procura definir os limites superiores e inferiores em um esquema de numeração. Para um problema de minimização, os limites superiores podem ser obtidos por heurísticas eficientes que produzem soluções de boa qualidade num curto intervalo de tempo e os limites inferiores são obtidos pela relaxação do problema através da remoção de uma ou mais restrições. De acordo com Goldbarg e Luna (2000), o termo *branch* significa que o

método efetua partições no espaço de soluções, enquanto que o termo *bound* reforça que os limites encontrados ao longo da enumeração servem para provar a otimalidade da solução.

Para o método *Branch-and-Cut* quando é encontrada uma solução ótima inviável associada à relaxação linear, deve-se resolver um novo problema de separação buscando identificar uma ou mais restrições violadas pela relaxação corrente, de acordo com Prestes (2006). Este novo problema é resolvido via programação linear e o processo é repetido até que nenhuma outra violação seja encontrada.

2.6.2 Métodos Heurísticos

Os métodos heurísticos são frequentemente utilizados para obter as soluções aproximadas de problemas de roteamento que possuem grande quantidade de vértices, com maior rapidez. Estes métodos utilizam critérios de economia e inserção nas rotas para resolução do problema, bem como, algum critério pré-definido para inicialização do método. Como exemplos têm-se as seguintes heurísticas: Clark e Wright (1964), Mole e Jameson (1976), Inserção do Vizinho mais Próximo e Heurística de Inserção Paralela, ambas podem ser encontradas em Goldbarg e Luna (2000).

A heurística de Clark e Wright (1964) foi um dos métodos pioneiros propostos para solucionar os problemas de roteamento de veículos e, segundo Prata (2009), baseia-se no conceito de ganho. Como solução inicial considera-se a situação em que um veículo sai do depósito para atender somente um cliente e retorna ao depósito. A partir desta solução, procura-se agrupar outros clientes para serem visitados na mesma rota. Neste agrupamento, basicamente é utilizado um critério de economia para avaliar a possibilidade da inserção destes novos clientes na rota atual, considerando as restrições incorporadas ao problema. Uma descrição mais detalhada desta heurística pode ser encontrada em Heinen (2005).

A heurística de Mole e Jameson (1976) é mais sofisticada do que a anterior e utiliza alguns critérios para obtenção das soluções aproximadas. A inserção do vértice nas rotas é realizada sob dois critérios: Proximidade e Economia. Segundo Heinen (2005), o Critério de Proximidade seleciona o vértice que está mais próximo da rota atual a ser inserido e o critério de Economia seleciona o melhor local na rota para que o vértice seja inserido. Além disso, utiliza-se algum critério pré-definido para inicializar o procedimento. No trabalho de Heinen (2005), para inicialização das rotas foi utilizado o critério de selecionar o vértice

livre mais próximo do depósito. O procedimento foi realizado repetidas vezes até que não fosse possível inserir mais vértices na rota desejada.

Segundo Assis (2007), a heurística de Inserção do Vizinho Mais Próximo pode ser considerada como método guloso e é muito utilizada em diversos problemas reais por ser bastante simples e rápida. Os clientes são inseridos na rota de acordo com o seu vizinho mais próximo, ou seja, a cada passo é adicionado na rota o vizinho mais próximo do último cliente inserido na mesma. De acordo com o trabalho de Gonçalves *et al.* (2005) esta heurística possui três níveis de decisão envolvidos: a escolha do vértice a ser inserido na solução, a posição de inserção do novo vértice e a decisão de um ciclo inicial.

Kaiser (2009) referencia autores que abordaram a Heurística de Inserção Paralela. Dentre eles, têm-se o trabalho proposto por Jaw *et al.* (1986) que trata o problema de roteamento com múltiplos veículos e com restrições de janelas de tempo, sendo que a ideia principal da heurística era ordenar as solicitações de atendimento por um critério de horário e inseri-las (segundo a ordenação adotada) nas rotas que resultassem em menor acréscimo de custo. A heurística foi testada, com sucesso, para aproximadamente 2600 clientes e 20 veículos para vários dias de operação, sendo que nem todos os clientes solicitavam atendimento no mesmo dia.

Toth e Vigo (1987) utilizaram a Heurística de Inserção Paralela para o PRVJT usando procedimentos de busca local que são divididos em: trocas intra-rotas e trocas inter-rotas. O primeiro corresponde a tentativas de melhoria das rotas modificando a sequência dos locais visitados dentro de cada rota, enquanto que o segundo considera a possibilidade de trocar as requisições de transporte entre rotas distintas. A heurística foi testada num conjunto de aproximadamente 1500 solicitações provenientes de uma situação real.

Pode-se perceber que vários trabalhos da literatura referenciam ou utilizam procedimentos heurísticos para obtenção de soluções ótimas para problemas reais. Algumas destas heurísticas podem ser aprimoradas ou implementadas juntamente com as metaheurísticas, que são descritas a seguir.

2.6.3 Metaheurísticas

As metaheurísticas também fornecem soluções aproximadas para os problemas, mas são métodos mais inteligentes que as heurísticas, pois possuem flexibilidade e fogem

de mínimos locais. Muitos destes métodos, tais como: os Algoritmos Genéticos (AG), a Busca Tabu, o GRASP e o Recozimento Simulado (*Simulated Annealing*) foram utilizados por diversos pesquisadores para resolver problemas reais.

2.6.3.1 Algoritmos Genéticos

De acordo com Heinen (2006), os AG são metaheurísticas criadas por Holland (1975) e foram baseadas na Teoria da Evolução Natural das Espécies de Darwin. Estas metaheurísticas utilizam uma população de indivíduos (cromossomos) que são gerados aleatoriamente ou utilizando alguma heurística pré-definida.

A partir da solução inicial, em cada iteração do processo, estes indivíduos ou parte deles passam por operações de cruzamento e mutação gerando uma nova população. Os indivíduos de cada geração são avaliados segundo uma função de aptidão (função de avaliação ou função objetivo).

A cada geração são selecionados indivíduos para o cruzamento, o que pode ser feito através do método da roleta, torneio, entre outros. Pode também ser utilizado o elitismo, ou seja, um número muito pequeno de indivíduos melhor adaptados passam imediatamente para a população seguinte, geralmente apenas um único indivíduo. Maiores detalhes pode ser encontrado em Soares (1997), Taufer (2012).

O principal objetivo dos AG's é melhorar o conjunto de soluções a cada geração de indivíduos, até encontrar a melhor solução, condicionado a um critério de parada. Um estudo sobre aplicação do Algoritmo Genético para os problema de coleta e entrega com janelas de tempo pode ser encontrado em Jih *et al.* (2002).

2.6.3.2 Busca Tabu

A metaheurística Busca Tabu começou a ser abordada por Glover (1986) e foi aplicada ao problema de roteamento de veículos por Willard em 1989, cujo objetivo principal é guiar um procedimento de busca local na exploração do espaço de soluções de um problema combinatório para escapar de um ponto ótimo local (GONÇALVES *et al.*, 2005).

O procedimento da metaheurística começa a partir de uma solução inicial e a cada iteração ou sequência de movimentos é gerada uma vizinhança da solução atual, pesquisando-se nesta vizinhança uma solução vizinha com melhores características que

a solução inicial e armazenando esta nova solução utilizando estratégias de memórias adaptativas (de curta duração). Estas memórias permitem a criação de uma lista, denominada Lista Tabu que armazena o histórico das soluções já visitadas evitando que o procedimento forme ciclos e guie o mesmo para regiões ainda não visitadas no espaço de busca (GLOVER e LAGUNA, 1997).

De acordo com Gonçalves *et al.* (2005), normalmente o algoritmo termina quando encontra um critério de parada que pode ser definido de duas maneiras: uma quantidade pré-definida de iterações no procedimento ou, após encontrar uma solução melhor, definir um número de iterações sem alteração nessa melhor solução encontrada.

Diversos autores aplicaram o procedimento para solucionar problemas de roteamento para situações reais. Montané (2006) apresenta o Busca Tabu com alguns procedimentos para gerar a solução inicial e quatro movimentos para gerar a estrutura de vizinhança.

2.6.3.3 GRASP

Esta metaheurística foi introduzida por Feo e Resende (1995), sendo um procedimento de busca gulosa, randômica e adaptativa (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* - GRASP). Este procedimento é iterativo, onde cada iteração consiste em duas fases, uma fase de construção e uma fase de busca local.

Na primeira fase, uma solução inicial viável é gerada, elemento a elemento, de forma iterativa e cria-se uma lista de possíveis candidatos a melhores soluções. Além de iterativa, esta fase é adaptativa, randômica e pode ser gulosa. É adaptativa porque os benefícios associados a cada elemento são carregados de uma iteração para outra e é gulosa porque a cada iteração a inserção dos elementos candidatos é feita, segundo algum critério, a partir de uma lista restrita que possui os melhores candidatos (TORTELLY e OCHI, 2006).

Na segunda fase, a solução gerada na fase de construção sofre alterações, ou seja, é analisada a vizinhança da solução inicial para executar os melhores movimentos, a fim de melhorar a função objetivo (ASSIS, 2007).

2.6.3.4 Recozimento Simulado

O Recozimento Simulado (*Simulated Annealing* - SA) é um método iterativo que combina técnicas de busca local e randomização que aplicado num problema de otimização aceita soluções de pior custo através de uma função probabilística para evitar a parada prematura em um ótimo local. A técnica de busca local consiste num processo iterativo que vai de uma solução para outra no espaço de soluções pesquisando a melhor solução através de movimentos predefinidos e que podem ser restritos por alguma condição. A cada iteração, o custo da nova solução vizinha gerada é avaliado em relação a melhor solução obtida anteriormente (IZQUIERDO, 2000).

O SA foi proposto inicialmente por Kirkpatrick (1983) e se fundamenta na termodinâmica onde procura simular o processo de recozimento físico em que um sólido é aquecido a altas temperaturas (acima do seu ponto de fusão) e, logo em seguida é realizado um processo lento e gradativo de resfriamento, até que o ponto de solidificação seja atingido. De acordo com Kaiser (2009), durante o recozimento o material passa por vários estados possíveis e se o resfriamento for suficientemente lento obtêm-se uma estrutura cristalina livre de imperfeições (estado de mínima energia). Fazendo uma analogia do processo termodinâmico descrito anteriormente com um problema de otimização combinatória (GOMES, 2003), pode-se montar a tabela (2.1):

Tabela 2.1: Analogia do processo termodinâmico com um problema de otimização

Termodinâmica	Otimização
Nível de energia	Função Objetivo
Temperatura	Parâmetro de Controle
Estados do sistema	Possíveis soluções viáveis (ótimos locais)
Estado de mínima energia	Melhor solução para o problema (ótimo global)

Basicamente, o SA inicia a busca por soluções ótimas utilizando uma temperatura T elevada e a partir de uma solução inicial gerada aleatoriamente ou por alguma heurística pré-definida. Posteriormente, são geradas novas soluções através de uma estrutura de vizinhança, sendo necessária uma função objetivo para ser avaliada no procedimento. Então, supondo S a solução inicial, a cada iteração é gerado um único vizinho S' da solução anterior e a partir desta solução vizinha o valor na variação da função objetivo é testado, analisando a alteração do custo desta função, ou seja, $\Delta = f(S') - f(S)$ (MAURI e LORENA, 2009).

Durante o procedimento, a temperatura é diminuída gradativamente por uma razão de resfriamento α e o SA aceita movimentos que pioram a solução, a fim de escapar de ótimos locais, através de uma função probabilística $p = e^{-\Delta/T}$. Nestas condições, quanto maior a temperatura, maior a probabilidade de aceitação da solução de pior custo (GOMES, 2003). O processo pode ser parado a qualquer momento por uma das seguintes opções:

- definindo um tempo máximo de processamento;
- fixando um número máximo de iterações no processo;
- quando é encontrada uma solução s com $f(s)$ menor que uma pré-definida;
- quando ocorre um número máximo de iterações sem alcançar melhoras na solução.

Por ser uma metaheurística sofisticada, o Recozimento Simulado é encontrado na literatura para solucionar diversos problemas. No trabalho de Mauri e Lorena (2009) foi aplicado para resolver o problema de roteamento do tipo *dial-a-ride*, em Rodrigues (2012) foi utilizado para solucionar o problema de alocação de berços no Porto de Rio Grande, no estado do Rio Grande do Sul e em Júnior *et al.* (2005) o Recozimento foi aplicado para resolver o problema de roteamento de veículos com Janela de Tempo.

O procedimento da funcionalidade do Recozimento Simulado pode ser compreendido através de um fluxograma adaptado e do pseudocódigo, segundo Rodrigues (2012), apresentados nos anexos.

2.7 Considerações

Neste capítulo, foi feita uma revisão bibliográfica dos tipos de problemas de roteamento de veículos, assim como suas definições, formulações matemáticas e métodos de solução. Na literatura estudada encontrou-se autores que pesquisaram estes problemas com suas características específicas, aplicações e abordagens diferenciadas de solução. Salientou-se a metaheurística Recozimento Simulado que dará suporte ao desenvolvimento da modelagem do problema proposto neste trabalho.

No próximo capítulo apresenta-se a modelagem do problema proposto, a formulação matemática genérica do PRV com coleta e entrega abordado nesta pesquisa,

as heurísticas desenvolvidas para tratar o problema e procedimentos necessários para o Recozimento Simulado.

Capítulo 3

Modelagem do Problema

Para dar suporte ao desenvolvimento do aplicativo, neste capítulo apresenta-se a formulação matemática do PRVCES. Na implementação computacional utilizou-se a metaheurística Recozimento Simulado e houve a necessidade de utilizar outros métodos para funcionalidade da metaheurística implementada. Então, foram desenvolvidas duas heurísticas para geração da solução inicial, denominadas Heurística de Construção das Rotas e Heurística de Programação de Horários.

Nas seções deste capítulo, encontra-se os detalhes da formulação matemática, a descrição das heurísticas com o pseudocódigo e os passos dos movimentos utilizados para o Recozimento Simulado.

3.1 Formulação Matemática

A formulação matemática apresentada a seguir é baseada em formulações de alguns autores, tais como Mauri e Lorena (2009) e Júnior (2005) e trata o PRV com coleta e entrega simultânea em que as requisições de transporte são pré-determinadas. Além disso, utiliza-se uma frota heterogênea de veículos, com garagem única e janelas de tempo. Para maior clareza da modelagem apresentada, entende-se a Coleta como embarque de pessoas e a Entrega como desembarque de pessoas em um determinado local.

Então, considera-se um grafo $G = (V, A)$, onde $V = \{0, 1, 2, \dots, n\}$ é o conjunto de n locais, sendo 0 a garagem e A é o conjunto de arestas que ligam dois locais quaisquer. Assume-se $\bar{n}$ requisições de transporte que serão atendidas por até $\bar{k}$ veículos, sendo que a cada requisição está associada uma coleta, uma entrega ou uma coleta mais entrega de

pessoas e seja $K = \{1, 2, \dots, \bar{k}\}$ o conjunto de veículos disponíveis na frota.

3.1.1 Função Objetivo e Restrições

Desta forma, tem-se a Função Objetivo (FO) que busca minimizar o custo de transporte nas rotas. Este custo é descrito como a soma de três equações a seguir, sendo na 1ª equação (3.1) o somatório das distâncias percorridas pelos veículos, na 2ª equação (3.2) o somatório dos horários penalizados em relação aos horários das requisições e na 3ª equação (3.3) o somatório dos tempos de viagem entre os locais e o somatório da penalização do tempo total de viagem ocorrido em relação ao tempo máximo permitido para cada veículo. Então, a Função Objetivo é dada por:

Minimizar

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0; j \neq i}^n \sum_{k=1}^{\bar{k}} d_{ij} x_{ij}^k + \quad (3.1)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0; j \neq i}^n (\varphi_1 |(HE_1)_i - (HP_1)_i| + \varphi_2 |(HE_2)_j - (HP_2)_j|) + \quad (3.2)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0; j \neq i}^n \sum_{k=1}^{\bar{k}} t_{ij} x_{ij}^k + \varphi_3 \sum_{k=1}^{\bar{k}} (\max\{0, T_{vk} - T_k''\}) \quad (3.3)$$

Onde:

Na equação (3.1), o parâmetro d_{ij} representa a distância percorrida entre dois locais i e j e a variável binária x_{ij}^k refere-se aos veículos, tal que $x_{ij}^k = 1$ se o veículo k faz o percurso entre i e j ou $x_{ij}^k = 0$, caso contrário.

Na equação (3.2), tem-se que $(HE_1)_i$ é o Horário Estimado INICIAL e significa o horário previsto da coleta de uma pessoa num determinado local i , o termo $(HE_2)_j$ é o Horário Estimado FINAL, significando o horário previsto de entrega de uma pessoa num local j , $(HP_1)_i$ é o Horário Programado INICIAL e determina o horário definitivo em que a pessoa será coletada no local i e $(HP_2)_j$ é o Horário Programado FINAL que determina o horário definitivo em que a pessoa será entregue no local j . Nesta equação (3.2), a primeira parcela verifica a diferença de tempo entre os Horários Estimado e Programado num local de coleta e a segunda parcela calcula a diferença de tempo entre os Horários Estimado e Programado num local de entrega. Para que o horário previsto seja respeitado e próximo do horário programado, faz-se uma penalização conforme o tipo de requisição

solicitada. Esta penalização é atribuída ao parâmetro φ_1 que penaliza os horários da coleta e ao parâmetro φ_2 que penaliza os horários da entrega.

Na equação (3.3), tem-se na primeira parcela o parâmetro t_{ij} que representa o tempo de viagem entre dois locais i e j e na segunda parcela, tem-se a variável T_{vk} que representa o tempo total de viagem do veículo k e o parâmetro pré-determinado T_k'' que indica o tempo máximo de viagem permitido para o veículo k . Esta segunda parcela calcula o tempo excedido em relação ao máximo permitido e para que esse tempo máximo de viagem seja obedecido, usa-se o parâmetro de penalização φ_3 .

A Função Objetivo representada pelas equações (3.1), (3.2) e (3.3) está sujeita as restrições que seguem.

O veículo realizará a entrega de uma pessoa num determinado local e poderá retornar a este local para realizar a coleta desta pessoa. A capacidade de cada veículo deve ser respeitada, ou seja, a quantidade de pessoas que são entregues ou coletadas pelo veículo será menor que sua capacidade máxima, de acordo com a restrição (3.4).

$$(Q_i - qE_i + qC_i) \sum_{i=0}^n \sum_{j=0; j \neq i}^n x_{ij}^k \leq Q_k'' \quad \forall i, j \in V, \forall k \in K \quad (3.4)$$

Nesta restrição (3.4), tem-se que $(qE)_i$ representa a quantidade de pessoas que são entregues no local i , $(qC)_i$ representa quantidade de pessoas que são coletadas no local i , Q_i é a quantidade de assentos ocupados no veículo no local i e Q_k'' representa a capacidade máxima de cada veículo k ;

Além disso, tem-se janelas de tempo que devem ser respeitadas, onde o tempo máximo de viagem para cada veículo k é definido pela restrição (3.5). Esta restrição é utilizada somente numa programação inicial das rotas, considerando apenas os tempos de viagem (t_{ij}) entre os locais i e j e a duração dos intervalos de tempo de coleta ou entrega, representados pelo parâmetro s_i .

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0; j \neq i}^n x_{ij}^k (t_{ij} + s_i) \leq T_k'', \quad \forall i, j \in V, \forall k \in K \quad (3.5)$$

Após a programação inicial a ser realizada pela Heurística de Construção das Rotas (HCR), utiliza-se a Heurística de Programação de Horários (HPH) que será descrita na próxima seção e considera-se os intervalos de tempo de parada dos veículos para refeição

e pernoite de pessoas, a quantidade destas paradas em cada rota e o tempo de espera do veículo, necessário em cada coleta para que os horários sejam atualizados adequadamente. Desta forma, a restrição (3.5) que limita o tempo máximo de viagem do veículo será redefinida pela restrição (3.6).

$$(Q_r^k d_r + Q_p^k d_p) + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0, j \neq i}^n x_{ij}^k (t_{ij} + s_i + \varphi_4 w_i) \leq T_k'', \quad \forall k \in K \quad (3.6)$$

Nesta restrição (3.6), tem-se os seguintes parâmetros: d_r que representa o tempo de duração da parada do veículo para refeição das pessoas, d_p que é o tempo de duração da parada do veículo numa pernoite das pessoas e w_i que é um tempo de espera do veículo (quando necessário) para realizar uma coleta num determinado local i . Isto ocorre quando o veículo chega no local da coleta antes do horário desta coleta e a pessoa ainda não está disponível para ser coletada. Para que este tempo de espera seja mínimo, utiliza-se uma penalização representada pelo parâmetro φ_4 .

Para a restrição (3.6) também é necessário o valor de Q_r^k que representa a quantidade de paradas do veículo para refeição das pessoas e o valor de Q_p^k representando a quantidade de paradas do veículo para pernoites. Desta forma, Q_r^k é obtido através da equação (3.7) e Q_p^k é dado pela equação (3.8). Convém salientar que deve-se considerar a parte inteira dos resultados para Q_r^k e Q_p^k .

$$Q_r^k = \frac{T_{vk}}{T_{vr}} \quad (3.7)$$

$$Q_p^k = \frac{T_{vk}}{t_d} \quad (3.8)$$

Na equação (3.7), o parâmetro T_{vr} representa o tempo de viagem necessário para que ocorra uma parada do veículo para refeição e na equação (3.8) o parâmetro t_d representa a duração do tempo de viagem diário. Nestas duas equações, tem-se o tempo total de viagem (T_{vk}) do veículo k que é calculado como:

$$T_{vk} = (HP_2)_0 - (HP_1)_0 \quad (3.9)$$

Onde $(HP_1)_0$ é o Horário Programado INICIAL definitivo de saída do veículo da garagem e $(HP_2)_0$ é o Horário Programado FINAL definitivo em que este veículo chega

novamente na garagem. Quando são calculados estes dois horários, inclui-se os tempos de viagem entre os locais, os tempos das refeições, os tempos das pernoites, os tempos de embarque e desembarque e os tempos de espera (quando houver).

Quanto aos horários de coleta e entrega das pessoas, tem-se a equação (3.10) que determina (E_i) que é o horário de coleta da pessoa no local i , limitada pela restrição (3.11). A equação (3.12) determina (F_j) que é o horário da entrega num local j . O horário de coleta é utilizado apenas numa programação inicial, ou seja, é um Horário Estimado INICIAL $((HE_1)_i)$ calculado a partir da requisição solicitada e atualizado, posteriormente, pela Heurística de Programação de Horários (HPH).

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0, i \neq j}^n x_{ij}^k (F_j - t_{ij} - s_i) = E_i \quad \forall i, j \in V \quad (3.10)$$

$$E_i < F_j \quad (3.11)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0, i \neq j}^n x_{ij}^k (E_i + s_i + t_{ij}) = F_j, \quad \forall i, j \in V \quad (3.12)$$

A seguir, tem-se a descrição dos parâmetros e penalizações utilizadas nessa formulação.

3.1.2 Penalizações

O objetivo da inserção de penalizações na FO e restrições para esta modelagem é possibilitar que os Horários Programados de coleta e entrega sejam próximos dos Horários Estimados (previstos), de forma que as pessoas sejam entregues ou coletadas nos horários desejados. De acordo com as situações descritas a seguir e para viabilizar um melhor entendimento na estrutura do aplicativo implementado, as penalizações utilizadas foram identificadas por números de 1 a 13.

Desta forma, os parâmetros destas penalizações que devem ser inseridos na FO se darão de formas distintas respeitando três situações, como segue:

- φ_1 : faz com que seja respeitado o horário de coleta de uma pessoa no horário estimado ou próximo deste horário;
- φ_2 : faz com que seja respeitado o horário de entrega de uma pessoa no horário estimado ou próximo deste horário;

- φ_3 : faz com que seja respeitado o limite do Tempo Máximo de viagem do veículo;

Então, para o parâmetro φ_1 são utilizadas as penalizações 1, 2, 6, 9 e 10. Destas, a penalização 6 refere-se a requisições de coleta, 1 e 2 referem-se a entregas com embarque na garagem e 9 e 10, entregas com embarque fora da garagem. As penalizações 1 e 9, tem a propriedade $((HE_1)_i > (HP_1)_i)$ e significam que a pessoa embarcou no veículo no local i antes do Horário Estimado INICIAL previsto para embarque, considerando que o Horário Programado é o definitivo. As penalizações 2, 6 e 10 tem a propriedade $((HE_1)_i < (HP_1)_i)$ que indica o embarque da pessoa depois do Horário Estimado INICIAL.

Quanto ao parâmetro φ_2 , são utilizadas as penalizações 3, 4, 7, 8, 11 e 12. Destas, as penalizações 7 e 8 referem-se a requisições de coleta, 3 e 4 referem-se a entregas com embarque na garagem e 11 e 12, entregas com local de embarque fora da garagem. Para este parâmetro as penalizações 3, 7 e 11 têm a propriedade $((HE_2)_j > (HP_2)_j)$ e para 3 e 7 significa que a pessoa desembarcou no local j antes do Horário Estimado FINAL previsto para entrega. Porém, para a penalização 11 como considera-se o tipo de entrega com embarque fora da garagem, então significará que a pessoa embarca antes do Horário Estimado previsto para embarque. As penalizações 4, 8 e 12 tem a propriedade $((HE_2)_j < (HP_2)_j)$ e para 4 e 8 significa que a pessoa desembarcou depois do Horário Estimado FINAL. Para a penalização 12, a pessoa embarca depois do Horário Estimado INICIAL.

As equações para obter os valores de $(HE_1)_i$ e $(HE_2)_j$ em cada tipo de requisição considerada para as penalizações, ou seja, coleta, entregas com embarque na garagem e entregas com embarque fora da garagem será exposto logo a seguir.

Em relação ao parâmetro φ_3 utiliza-se a penalização 13 que apresenta a propriedade $T_{vk} > T_k''$ significando que o tempo total de viagem do veículo k excedeu o seu Tempo Máximo permitido. Então, a penalização possibilita o controle deste excesso no tempo de viagem.

O parâmetro (φ_4) que é inserido na restrição (3.6) e utilizado apenas nas coletas, permite reduzir o tempo de espera do veículo. Para isto, utiliza-se a penalização 5.

Diante do exposto sobre as penalizações para cada parâmetro, tem-se o cálculo dos Horários Estimados INICIAL e FINAL para cada tipo de requisição. Neste contexto, considera-se para uma requisição de ENTREGA com embarque na garagem, a equação (3.13) que representa o Horário Estimado FINAL (previsto) para o veículo estar no local da entrega e a equação (3.14) é o Horário Estimado INICIAL previsto para embarque da

pessoa na garagem. Considera-se s_0 como a duração do tempo de embarque da pessoa na garagem.

$$(HE_2)_j = F_j - s_j \quad (3.13)$$

$$(HE_1)_i = (HE_2)_j - t_{0j} - s_0 \quad (3.14)$$

De outra forma, quando houver uma requisição de COLETA somente (sem entrega anterior), então a equação (3.15) representará o Horário Estimado INICIAL de coleta e a equação (3.16) representará o Horário Estimado FINAL de entrega na garagem.

$$(HE_1)_i = E_i \quad (3.15)$$

$$(HE_2)_0 = (HE_1)_i + s_i + t_{i0} + s_0 \quad (3.16)$$

Para o caso de uma requisição de COLETA de uma entrega anterior, então a equação (3.17) representa o Horário Estimado INICIAL que é o horário em que a pessoa pode ser coletada no local j , representado pelo parâmetro (D_j) e que deve ser informado na requisição de entrega + coleta. A equação (3.18) representa o Horário Estimado FINAL de entrega da pessoa coletada, na garagem.

$$(HE_1)_j = D_j \quad (3.17)$$

$$(HE_2)_0 = (HE_1)_j + s_j + t_{j0} + s_0 \quad (3.18)$$

Numa requisição de ENTREGA com EMBARQUE em local fora da garagem, tem-se a equação (3.19) que representa o Horário Estimado FINAL. Neste caso, o veículo sai da garagem para posterior embarque da pessoa e entrega, por isso o Horário Estimado FINAL a ser considerado é o próprio horário do embarque. Além disso, a equação (3.20) representa o Horário Estimado INICIAL, que será o horário previsto em que o veículo deve sair da garagem.

$$(HE_2)_j = E_i \quad (3.19)$$

$$(HE_1)_i = (HE_2)_j - t_{0i} - s_0 \quad (3.20)$$

3.2 Custo Total

Como possibilidades de análise de custos que não estão incluídos na FO foram utilizados na implementação do aplicativo para esta modelagem o custo de combustível dos veículos, os custos de pernoite e refeição das pessoas e o custo por pessoa associado ao tempo de espera dos veículos para coleta.

Na determinação do custo total de combustível do veículo dado pela equação (3.21), tem-se os parâmetros C_{ij}^k que representa o custo do combustível do veículo k para um percurso entre os locais i e j , P_{comb} que representa o preço do combustível utilizado e c_k que é o consumo de combustível do veículo k . Este consumo refere-se a quantidade de quilômetros rodados a cada litro de combustível consumido pelo veículo k .

$$C_{ij}^k = \frac{d_{ij} \cdot P_{comb}}{c_k} \quad (3.21)$$

Para o custo total de pernoite das pessoas considera-se a equação (3.22), onde $CPer$ representa o custo de pernoite a ser calculado, D_p é o valor da diária da pernoite por pessoa e os demais termos foram descritos anteriormente.

$$CPer = Q_p^k \cdot Q_i \cdot D_p \quad (3.22)$$

Para o custo total de refeição considera-se a equação (3.23), onde $CRef$ representa o custo de refeição a ser calculado, V_r é o valor da refeição por pessoa. Os demais termos foram descritos nas seções anteriores.

$$CRef = Q_r^k \cdot Q_i \cdot V_r \quad (3.23)$$

Para o custo total do tempo de espera das pessoas, associa-se este custo por hora para as pessoas que estão no veículo durante o tempo da espera para coleta de outra pessoa no local i . Considera-se a equação (3.24), onde $CTEsp$ representa o custo total de espera a ser calculado, C_{esp} é o valor atribuído à pessoa como custo de ficar esperando a coleta de outra pessoa. Os demais termos foram descritos nas seções anteriores.

$$CTEsp = w_i \cdot Q_i \cdot C_{esp} \quad (3.24)$$

A partir dos custos anteriores, tem-se o Custo Total ($CTotal$) dado pela equação (3.25) que é a soma dos custos mencionados nas equações (3.21), (3.22), (3.23) e (3.24). Estes custos são dados em unidades monetárias (reais).

$$CTotal = C_{ij}^k + CPer + CRef + CTEsp \quad (3.25)$$

Este cálculo do Custo Total separado da função objetivo tem a finalidade de auxiliar na tomada de decisão sobre os resultados de um problema real modelado por esta formulação matemática apresentada. No momento da implementação do aplicativo, os termos que representam estes custos foram modificados para facilitar a análise dos resultados.

3.3 Descrição das Heurísticas

Para possibilitar a resolução do modelo proposto obedecendo a Função Objetivo e restrições, foi utilizado o procedimento da metaheurística Recozimento Simulado. Entretanto, conforme descrito no capítulo 2, este procedimento necessita de métodos para geração da solução inicial e da estrutura de vizinhança, além da função objetivo. Estes métodos são executados através de heurísticas desenvolvidas, descritas a seguir.

3.3.1 Heurísticas para Solução Inicial

A partir da necessidade de métodos para gerar a solução inicial da metaheurística, foram desenvolvidas duas heurísticas denominadas “Heurística de Construção das Rotas” (HCR) e “Heurística de Programação de Horários” (HPH). A primeira é responsável por criar a lista de requisições de transporte das pessoas, escolher os veículos e construir as rotas vazias com uma sequência de requisições aleatórias a serem atendidas por cada veículo, de acordo com sua capacidade.

A segunda heurística realizará a programação de horários nas rotas considerando os tempos de deslocamento dos veículos entre os locais de atendimento, as janelas de tempo de parada dos veículos para refeições e pernoites das pessoas, as janelas de tempo de coleta e entrega destas pessoas, os horários das requisições e as restrições do problema.

Para a HCR é necessário informar uma lista de requisições (LR) das pessoas, em

que consta os locais de coleta e entrega, a data e o horário de entrega, a data e horário limites em que permanecerá no local da entrega para que possa ser coletada novamente e um código de identificação de cada pessoa que faz a requisição. Além disso, é necessário criar um número fixo $\bar{m}$ de rotas, conforme a quantidade de veículos disponíveis.

Os passos da *HCR* estão descritos a seguir pelo pseudocódigo do Algoritmo (1). Na execução desta heurística, deve ser inserido nas rotas um local de referência de acordo com o tipo de requisição solicitada por uma pessoa, de forma que todos os horários da rota sejam programados e atualizados a partir do horário deste local de referência.

Algoritmo 1: Heurística de Construção das Rotas (HCR)

CRIAR (uma lista LR de requisições de transporte das pessoas);
EXECUTAR (as 6 estruturas criadas com características diferentes);
PARA (cada estrutura) FAÇA
 CRIAR ($\bar{m}$ rotas vazias de acordo com as capacidades dos veículos escolhidos);
 PARA (cada rota) FAÇA
 SELECIONAR (aleatoriamente uma requisição de LR);
 PARA (cada requisição selecionada) FAÇA
 INSERIR (na rota, o local de referência conforme o tipo de requisição);
 FIM-PARA
 REMOVER (a requisição selecionada de LR)
 INSERIR (a garagem de origem e destino do veículo k);
 FIM-PARA
FIM-PARA

As requisições da LR são classificadas da seguinte forma:

1. **Requisição de Entrega com embarque na Garagem:** nesta requisição, o local de referência a ser adicionado na rota deve ser aquele em que a pessoa vai ser entregue;
2. **Requisição de Entrega com embarque em local fora da Garagem:** são considerados os dois locais como referência, ou seja, adiciona-se primeiramente o local do Embarque e, logo após, o local da Entrega da pessoa;
3. **Requisição de Coleta:** neste caso, a pessoa é coletada em um local qualquer e vai

para a garagem, então adiciona-se na rota o local de Embarque da pessoa;

4. **Requisição de Coleta com entrega anterior:** para a entrega, conforme o local em que a pessoa embarcou (garagem ou local qualquer), pode-se adicionar até dois locais, seguindo as condições dos itens um ou dois. Na Coleta, deve-se utilizar como local de referência, aquele em que a pessoa deverá ser entregue após ser coletada.

Após construídas as rotas com a sequência de locais a serem visitados e com as requisições inseridas, deve-se fazer a programação dos horários de visita dos veículos utilizando a *HPH*, descrita a seguir pelo pseudocódigo do Algoritmo (2).

Algoritmo 2: Heurística de Programação de Horários (HPH)

PARA (cada estrutura) FAÇA

PARA (cada rota) FAÇA

SELECIONAR (o local de referência)

PROGRAMAR (os horários antes e depois do horário do local de referência)

CALCULAR (a quantidade de refeições na rota)

ATUALIZAR (os horários antes e depois do horário do local de referência);

CALCULAR (a quantidade de pernoites na rota antes do local de referência);

ATUALIZAR (o horário de saída da garagem);

SE ($T_{vk} > t_d$) ENTÃO

REPROGRAMAR (para cada local)

INSERIR (refeição)

INSERIR (pernoite)

INSERIR (tempo de espera)

FIM-REPROGRAMAR

FIM-SE

FIM-PARA

FIM-PARA

Nesta heurística (*HPH*), para cada rota tem-se o “local de referência” selecionado, que deve ser aquele da última Entrega (em rotas que contenham requisições de entrega) ou o local da primeira Coleta (nas rotas que possuem somente requisições de coleta). Além

disso, ao programar os horários anteriores e posteriores ao horário do local de referência da rota, considera-se apenas os tempos de viagem entre os locais e duração dos intervalos de tempo de coleta e entrega das pessoas nestes locais.

Após esta programação inicial com os horários atualizados em relação ao horário do local de referência, tem-se os Horários Programados INICIAL e FINAL da rota. Então, estima-se a quantidade de paradas do veículo para refeições das pessoas na rota utilizando a equação (3.7), em função dos horários programados de saída da garagem (INICIAL) e chegada novamente na garagem (FINAL), ou seja, tempo total de viagem estimado da rota.

Tendo esta quantidade de paradas para refeições, faz-se a atualização dos horários antes e depois do local de referência da rota. Assim, tem-se os horários programados de saída e de chegada em que foram incluídas as refeições. A partir daí, calcula-se a quantidade de paradas do veículo para pernoites das pessoas na rota utilizando a equação (3.8) e considerando apenas as pernoites antes do local de referência atualiza-se o Horário Programado INICIAL $(HP_1)_0$ de saída da garagem. De acordo com seu valor, este horário sofrerá um ajuste da seguinte forma:

- Se o $(HP_1)_0$ ocorreu entre o horário de parada do dia para pernoite H_p (pré-definido) até a meia noite, então tem-se $(HP_1)_0 = H_p - t_d$, sendo que este será o Horário Programado INICIAL definitivo. Pode-se aceitar um horário de tolerância HT_p (pré-definido) para o H_p substituindo-o nesta equação do $(HP_1)_0$.
- Se o $(HP_1)_0$ ocorreu antes do horário permitido do dia para saída da garagem e início da rota H_m (pré-definido), então ele é ajustado para o dia antecedente, conforme item anterior.

Para os casos em que o Tempo total de viagem de um veículo k é menor que o tempo de viagem diário ($T_{vk} < t_d$), então não se calcula a inclusão de pernoites nem mesmo os ajustes descritos anteriormente. Caso contrário, tem-se o Horário Programado INICIAL e em função dele faz-se uma reprogramação dos horários na rota inserindo as paradas para refeições e pernoites das pessoas e as janelas de tempo de espera dos veículos (quando necessária) nos locais em que ocorre as coletas. Além disso, um horário fim de pernoite, na continuidade da viagem, é referência para determinar novos horários de refeições que ocorram posteriormente.

3.3.2 Movimentos da Estrutura de Vizinhaça

A partir da solução inicial gerada pelas heurísticas descritas na seção anterior, é necessário executar métodos para a obtenção da estrutura de vizinhaça (novas soluções temporárias) do Recozimento Simulado e avaliação da Função Objetivo. Neste trabalho, os métodos para esta vizinhaça de soluções são compostos por três movimentos: Reordenar, Realocar e Trocar.

O movimento de **Reordenar** consiste basicamente em trocar posições de locais que tenham requisições de entrega ou coleta numa rota, ou seja, sortear uma rota qualquer da solução, sortear um local com uma requisição nessa rota, sortear uma nova posição e trocar a posição deste local para a nova posição selecionada. É relevante destacar que se o local da requisição selecionado na rota estiver na garagem, então o movimento sempre será proibido, pois a mesma é fixa em todas as rotas e sua posição não sofre alteração.

Como é selecionado apenas um local, a requisição deste pode ser de coleta ou entrega e o movimento será realizado conforme as permissões descritas nos 3 casos abaixo. Então se o local selecionado for:

- **1º Caso (local de coleta de uma entrega):** o movimento é permitido somente se o(s) local(s) de entrega desta coleta estiver(em) após a nova posição deste local selecionado;
- **2º Caso (local de entrega com embarque fora da garagem):** permitido, somente se o local de embarque estiver antes da nova posição deste local de entrega selecionado;
- **3º Caso (local de entrega com embarque na garagem):** permitido sempre, fazendo-se necessário a inclusão de um novo local de embarque para uma entrega qualquer da rota, quando o local selecionado (neste 3º caso) durante o movimento ficar na posição de um local de embarque, mas não é o local de embarque da requisição de entrega qualquer.

Estes três casos de permissões podem ser entendidos observando o esquema ilustrado pela figura (3.1), onde a posição 0 representa a garagem, as demais posições de 1 a 9 representam a sequência de locais das requisições a serem atendidas, onde $(C1, C2, C3, C4, C5)$ são os locais com requisições de coleta e $(E1, E2, E3, E4, E5)$ re-

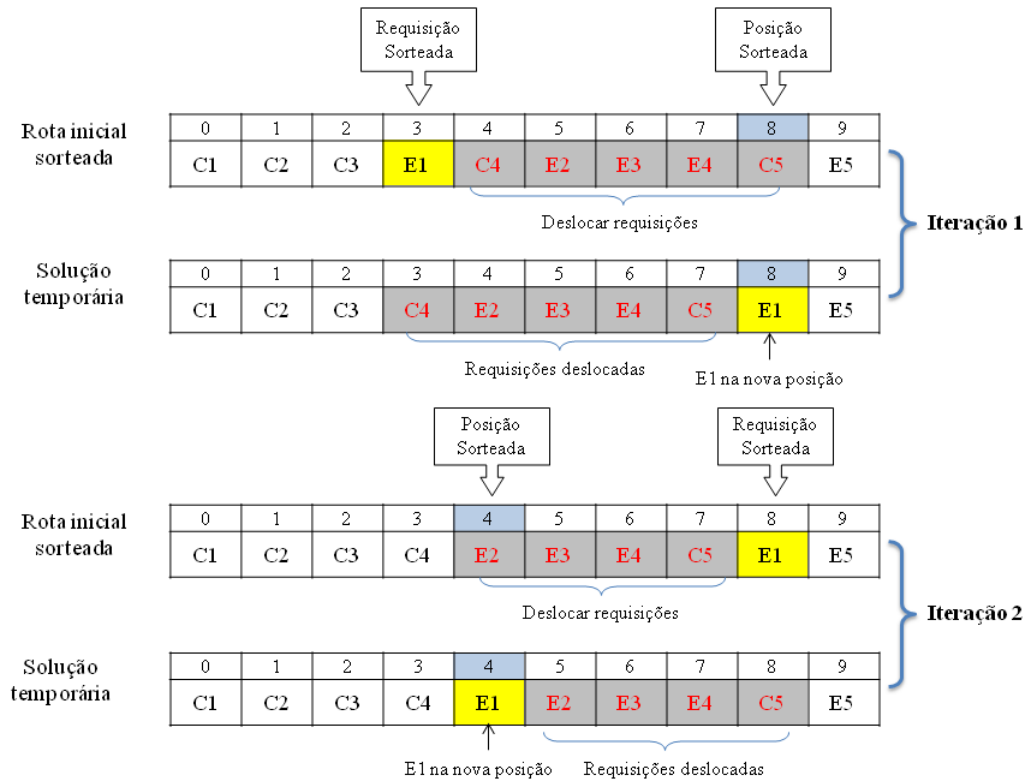


Figura 3.1: Esquema do Movimento Reordenar.

presentam os locais onde são feitas as entregas das requisições de coleta. Nesta figura, estão ilustradas duas iterações com movimentos permitidos do Reordenar Rota.

Assim, tem-se que os quadrados hachurados em amarelo representam os locais com requisições sorteadas (nesta ilustração, apenas requisição de entrega), os quadrados hachurados em azul representam as posições sorteadas, os quadrados hachurados em cinza, são locais com requisições que mudarão de posição (serão deslocadas) e os demais quadrados indicam locais com requisições que não sofrerão alteração de posição na iteração corrente. Na 1ª iteração ilustrada, foi sorteada uma rota inicial qualquer, onde na posição três tem-se um local com requisição de entrega sorteada ($E1$) e na posição oito, a posição sorteada, ambas aleatoriamente. Pelo procedimento da heurística, o local da requisição ($E1$) é transferido para a posição oito e os demais locais são deslocados para a esquerda, conforme ilustração da solução temporária desta 1ª iteração.

Na 2ª iteração ocorre o mesmo processo, mas os locais são deslocados para a direita na sequência de locais de requisições atendidas na rota. Resumidamente, o movimento Reordenar Rota é realizado através dos seguintes passos:

1. Sorteio randômico de uma rota da estrutura:

2. **Sortear randomicamente um dos locais da rota sorteada:** se na rota houver somente um local de coleta ou entrega com embarque na garagem, o movimento Reordenar é proibido;
3. **Sortear randomicamente uma posição onde o local sorteado ficará,** até que esta posição seja diferente da posição em que este local sorteado está;
4. **Transfere para uma solução temporária a rota sorteada com o local sorteado em sua nova posição;**
5. **Verifica se na nova distribuição da rota há necessidade de se incluir um local de coleta:** se for necessário a inclusão deste local, o movimento reordenar é proibido;
6. **Verifica numa requisição de entrega fora da garagem, se o local da coleta estiver após o seu local da entrega:** se isto ocorrer, então o movimento é proibido;
7. **Verifica numa requisição de entrega + coleta, se o local da coleta estiver antes do local da entrega:** se isto acontecer, o movimento é proibido;
8. **Faz a programação da rota (todas as variáveis são calculadas conforme a solução inicial):** apenas na rota de interesse;
9. **Verifica em cada local da rota programada se não excedeu a capacidade do veículo:** se houver excesso na capacidade, o movimento é proibido;
10. **Caso o movimento resulte numa melhora da melhor função objetivo:** atualiza-se a melhor solução.

O movimento **Realocar** consiste em sortear duas rotas quaisquer da solução inicial, por exemplo, $R1$ e $R2$. Posteriormente, selecionar um local com uma requisição qualquer na rota $R1$, selecionar uma posição qualquer na rota $R2$ e realocar o local da requisição selecionada na rota $R1$ para a posição selecionada na rota $R2$. Este movimento está representado na Figura (3.2) e será realizado conforme as permissões descritas nos 3 casos a seguir:

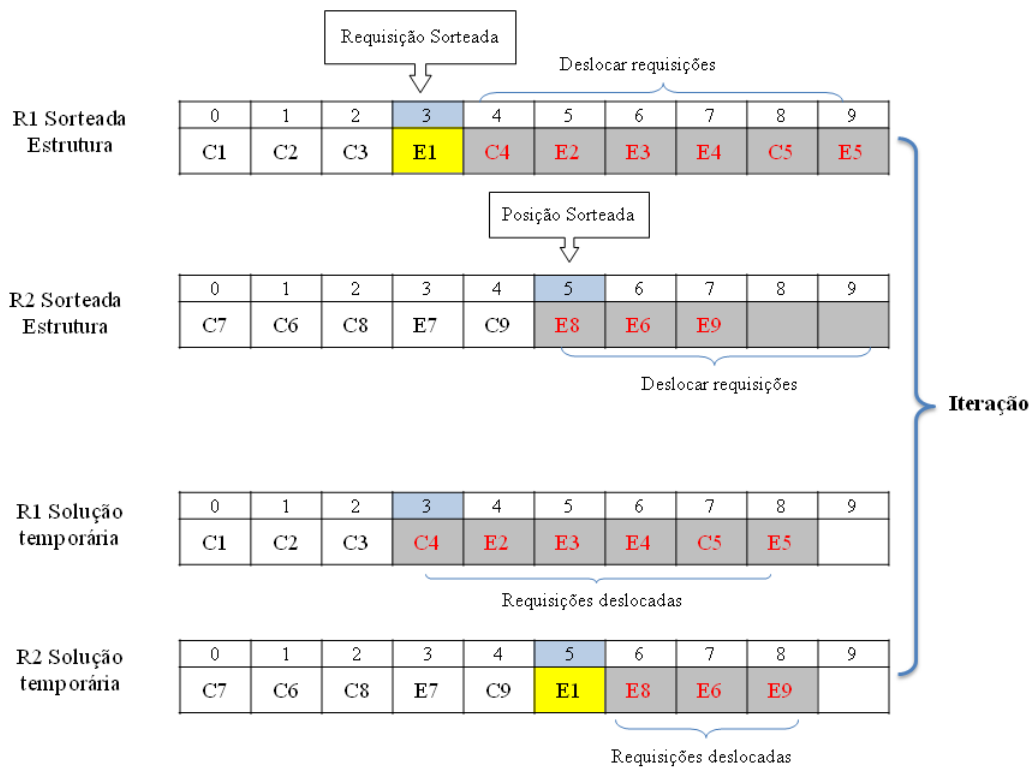


Figura 3.2: Esquema do Movimento Realocar

- **1º Caso (local de coleta de uma entrega):** permitido somente se o(s) local(s) de entrega desta coleta estiver(em) após a nova posição deste local, assim a posição do local em que embarcava esta entrega é eliminada;
- **2º Caso (local de Entrega com embarque na Garagem):** permitido sempre, fazendo-se necessário a inclusão de um novo local de embarque para uma entrega qualquer, quando este local sorteado estiver na posição que era de embarque de uma entrega qualquer;
- **3º Caso (local de Entrega com embarque fora da Garagem):** movimento é permitido desde que este local de entrega ao ser realocado na nova rota, tenha o seu local de embarque realocado imediatamente antes de sua posição na nova rota. Deve-se verificar se já existe o local de embarque na nova rota, anterior à nova posição.

Estas permissões podem ser entendidas observando o esquema ilustrado pela figura (3.2), onde a posição 0 representa a garagem, as demais posições de 1 a 9 representam a sequência de locais com requisições a serem atendidas, $(C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9)$ representam os locais das requisições de coleta e $(E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7, E8, E9)$ são

os locais das entregas correspondente às requisições de coleta. Nesta figura, está ilustrada uma iteração com 2 rotas e movimentos permitidos do Realocar Rota.

Assim, tem-se que os quadrados hachurados em amarelo representam os locais de requisições sorteadas (nesta ilustração, apenas requisição de entrega), os quadrados hachurados em azul representam as posições sorteadas, os quadrados hachurados em cinza são locais de requisições que mudarão de posição (serão deslocadas) para direita ou para esquerda e os demais quadrados indicam locais de requisições que não sofrerão alteração de posição na iteração corrente. Na iteração ilustrada, os locais de requisições da rota $R1$ são diferentes da rota $R2$, justamente, pois o movimento exige rotas diferentes. Desta forma, o local com requisição de entrega $E1$ foi sorteado na rota $R1$, estando localizado na posição três e a nova posição para $E1$ foi sorteada na rota $R2$, sendo a posição cinco.

Após realizar o movimento da realocação, tem-se a solução temporária para $R1$ e $R2$. Estas soluções temporárias foram obtidas da seguinte forma: na $R1$ temporária os locais de requisições que estão nas posições de três a oito, foram deslocados para a esquerda na rota original e ficaram numa posição anterior em relação a $R1$ original; na $R2$ temporária os locais que estão nas posições de seis a oito foram deslocados para a direita e ficaram localizados em posições posteriores em relação a rota $R2$ original. Pode-se observar que na solução temporária da rota $R2$ há necessidade de inclusão de um local de coleta para o local de entrega da requisição $E1$.

Desta forma, o movimento Realocar Rota, é realizado através dos seguintes passos:

1. **Sorteio randômico de uma rota $R1$ da estrutura:** o movimento é proibido se há somente uma rota na estrutura, somente um local com coleta na garagem nesta rota sorteada ou se houver apenas um local de entrega com coleta fora da garagem.
2. **Sorteio randômico de uma rota diferente $R2$ na mesma estrutura;**
3. **Sortear um local da rota $R1$;**
4. **Sortear uma posição onde este local sorteado ficará, na rota $R2$;**
5. **Transfere para uma solução temporária as duas rotas $R1$ e $R2$ com a alteração realizada;**
6. **Verifica se na nova distribuição de cada rota há necessidade de se incluir um local de coleta:** incluir o local de coleta quando necessário;

7. **Verifica (nas duas rotas) em requisições de entrega fora da garagem se o local de embarque desta entrega estiver após o local da entrega:** se isto ocorrer, o movimento é proibido;
8. **Verifica (nas duas rotas) numa requisição de entrega + coleta, se a coleta estiver antes da entrega:** se isto ocorrer, o movimento é proibido;
9. **Faz a programação das rotas (todas as variáveis são calculadas conforme a solução inicial):** apenas nas rotas de interesse;
10. **Verifica em cada local da rota programada se não excedeu a capacidade do veículo:** se exceder a capacidade do veículo, o movimento é proibido;
11. **Caso o movimento resulte numa melhora da melhor função objetivo:** deve-se atualizar a melhor solução.

O movimento **Trocar** consiste em sortear duas rotas quaisquer $R1$ e $R2$, sortear um local com uma requisição em cada uma das duas rotas sorteadas e trocar estes locais entre as rotas, ou seja, o local da rota $R1$ é trocado para a posição do local da rota $R2$ e o local de $R2$ é inserido na posição da rota $R1$. O movimento está representado na figura (3.3) e também terá 3 casos de permissões do movimento.

- **1º Caso (local de coleta de uma entrega):** permitido somente se um local de entrega desta coleta, na nova rota, estiver após a nova posição deste local. Assim, a posição do local que coletava esta entrega é eliminada;
- **2º Caso (local de entrega com embarque na garagem):** permitido sempre, fazendo-se necessário a inclusão de um novo local de embarque para uma entrega qualquer, quando este local não estiver mais na posição de um embarque desta entrega qualquer;
- **3º Caso (local de entrega com embarque fora da garagem):** movimento é permitido desde que este local de entrega ao ser trocado para a nova rota, tenha o seu local de embarque inserido imediatamente antes de sua posição na nova rota. Deve-se verificar se já existe o local de embarque na nova rota, anterior à nova posição.

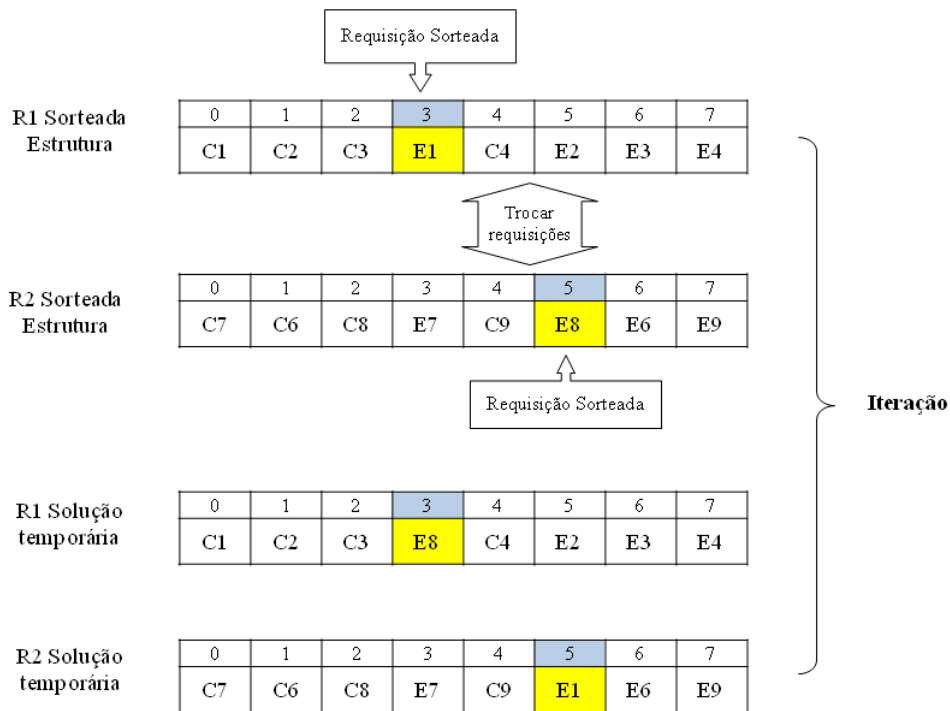


Figura 3.3: Esquema do Movimento Trocar

A figura (3.3) representa o movimento, onde foram sorteadas as rotas $R1$ e $R2$. Na rota $R1$ foi sorteado o local com requisição de entrega $E1$ que está na posição três e na rota $R2$ foi sorteado o local com requisição de entrega $E8$ que está na posição cinco. Estes dois locais sorteados são trocados, sendo que o local que estava na posição três foi inserido na outra rota ocupando a posição oito e o local que estava na posição oito foi inserido na posição três.

O movimento Trocar Rota, resumidamente é realizado nos seguintes passos:

1. O movimento é proibido se há somente uma rota na estrutura;
2. Sortear uma rota da estrutura;
3. Sortear uma rota diferente da estrutura;
4. Sortear um dos locais da primeira rota;
5. Sortear um dos locais da segunda rota;
6. Transfere para uma solução temporária as duas rotas com a troca realizada;

7. **Verifica se na nova distribuição de cada rota há necessidade de se incluir um local de embarque:** se houver necessidade, inclui-se este local;
8. **Faz a programação das rotas (todas as variáveis são calculadas conforme a solução inicial):** apenas nas rotas de interesse;
9. **Verifica em cada local da rota programada se não excedeu a capacidade do veículo:** se exceder a capacidade, o movimento é proibido;
10. **Caso o movimento apresente uma melhora da melhor função objetivo:** atualiza-se a melhor solução.

A partir dos métodos descritos anteriormente, através da geração da solução inicial e dos movimentos da estrutura de vizinhança, o Recozimento Simulado pode ser executado utilizando o esquema apresentado nos anexos.

3.4 Considerações

Neste capítulo, foi apresentada uma formulação matemática para o problema de coleta e entrega, com restrições específicas e penalizações nas janelas de tempo. Além disso, apresentou-se as heurísticas desenvolvidas para funcionalidade do Recozimento Simulado que será utilizado na implementação do aplicativo.

No próximo capítulo apresenta-se a descrição da operacionalização do aplicativo, as telas de execução e a interface para dar condições ao usuário de interagir no processo de inserção de dados e análise dos resultados gerados.

Capítulo 4

Operacionalização do Aplicativo

Este capítulo apresenta um detalhamento das características do aplicativo desenvolvido, sendo descritos os procedimentos de carregamento do banco de dados, de inserção dos parâmetros e das requisições, dos movimentos para as soluções vizinhas e como são gerados os resultados de cada estrutura implementada.

O aplicativo¹ foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação *Delphi*, pois possibilita incluir diversas facilidades em seu *layout* criando um *design* interativo. Sua interface com o usuário possibilita a visualização das simulações e dos resultados que vão sendo obtidos ao longo dos testes.

Neste aplicativo foram implementadas seis estruturas de programação com características diferentes para a escolha dos veículos e comparação dos custos da função objetivo entre as estruturas. Estas estão comentadas a seguir, sendo que nas duas primeiras, se dois ou mais veículos tiverem capacidades iguais, então escolhe-se sempre o mais econômico, através da equação (3.21). Nas demais, os veículos devem ser selecionados segundo algum critério ou escolhidos aleatoriamente.

- **Estrutura 1:** são escolhidos os veículos de maior capacidade, preferencialmente, com capacidade imediatamente superior ou igual ao número de requisições de transporte, de forma a utilizar o menor número de veículos;
- **Estrutura 2:** são escolhidos os veículos de menor capacidade para atender as requisições da LR ;

¹Aplicativo desenvolvido com a colaboração do aluno Tiago Buchweitz Klug integrante do projeto de iniciação científica Grafos e Algoritmos

- **Estrutura 3:** os veículos devem ser ordenados conforme interesse pelo tipo de veículo, disponibilidade ou consumo destes veículos;
- **Estruturas 4, 5 e 6:** os veículos são escolhidos aleatoriamente de forma randômica para atender a LR . Estas estruturas são iguais, mas são implementadas para comparar os custos gerados na Função Objetivo, mesmo com a aleatoriedade da escolha dos veículos.

4.1 Inserção dos dados

O aplicativo tem em seu *layout* várias janelas de execução e permite alterar informações do banco de dados conforme necessidade do usuário. Na tela inicial (figura 4.1), localizados no canto superior esquerdo da tela estão os botões principais (figura 4.2), os quais são utilizados para carregar os arquivos do banco de dados.

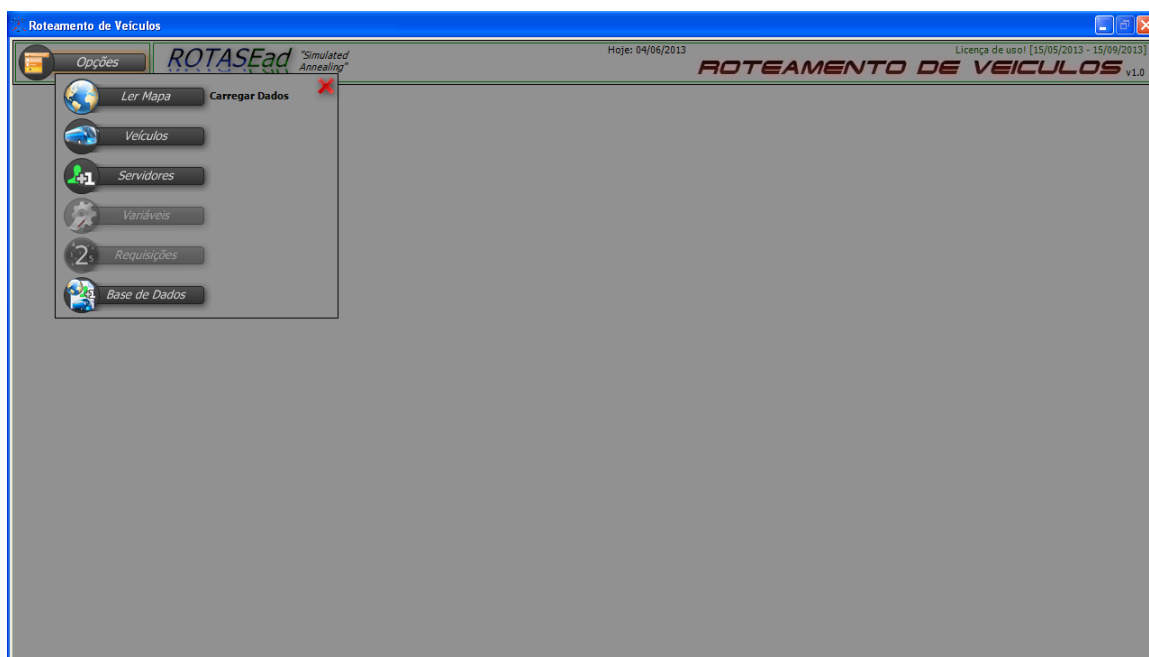


Figura 4.1: Tela inicial do aplicativo

Nesta figura (4.2), o botão “Ler Mapa” serve para carregar os arquivos no formato de planilhas *excel* que armazenam as coordenadas geográficas (em graus decimais) dos locais para geração do mapa, bem como as distâncias (km) e tempos de viagem (minutos) entre estes locais. Para o cálculo da menor distância entre dois locais quaisquer é utilizado o algoritmo de *Floyd*, descrito nos anexos.



Figura 4.2: Zoom das Opções da Tela inicial

O botão “Veículos” (figura 4.2) carrega as informações referentes aos tipos de veículos a serem utilizados na simulação. Na implementação deste aplicativo foi utilizado como parâmetro um número máximo de 20 veículos que podem ser cadastrados. Deve-se utilizar informações tabeladas contendo o modelo do veículo, a capacidade de cada veículo, a capacidade do tanque de combustível e consumo por quilômetro rodado, o tipo de combustível utilizado e o preço médio do combustível.

No botão “Servidores” (figura 4.2) são carregados os dados das pessoas que poderão solicitar uma requisição de entrega ou coleta. O aplicativo aceita o número máximo de 50 pessoas a serem cadastradas e as informações necessárias são: nome, setor em que está vinculada numa empresa e código de identificação.

Após carregada a lista de pessoas, é necessário que o usuário insira os valores dos parâmetros que serão utilizados na execução dos testes, através do botão “Variáveis” (figura 4.2). Este botão exibe uma nova janela (figura 4.3), onde primeiramente são inseridos todos os parâmetros relacionados às janelas de tempo e horários e, posteriormente, insere-se os parâmetros do Recozimento Simulado, das penalizações e dos custos individuais por hora por pessoa que referem-se aos custos de refeição, pernoite e tempo de espera.

Em relação aos parâmetros das janelas de tempo e horários (coluna mais a esquerda da figura 4.3), tem-se: a duração dos tempos de refeição e pernoite (tempos em que o veículo fica parado), a duração dos tempos de embarque e desembarque, o tempo de

Figura 4.3: Tela de inserção dos parâmetros

viagem diário permitido para cada veículo, o horário mínimo de saída (começo da rota) permitido para cada veículo, o horário de parada para pernoitar (horário em que o veículo deve parar), horário tolerado para pernoitar (o veículo tem uma tolerância para sua parada), tempo de viagem para refeição (tempo de duração da viagem do veículo para que ele possa parar), tempo tolerado para a refeição e tempo máximo de viagem para cada veículo. Todos estes tempos e horários são utilizados no formato horas, minutos e segundos.

Observa-se na figura (4.3) os parâmetros a serem utilizados pelo Recozimento Simulado (*Simulated Annealing*) que são: a temperatura inicial (T_i), a temperatura de congelamento (T_c), o número máximo de iterações ($SAMax$) e a razão de resfriamento (α). Além disso, também visualiza-se de que forma são inseridos os parâmetros das penalizações necessárias para a Função Objetivo. Nesta figura (4.3), *HE* significa Horário Estimado e *HP* Horário Programado.

Para estas penalizações, considerou-se quatro grupos subdivididos da seguinte forma: **Entregas** (refere-se a requisições de entrega com embarque na garagem), **Embarque Fora da Garagem** (refere-se as requisições de entrega em que houve embarque fora da garagem), **Coletas** (refere-se a requisições de coleta de uma entrega anterior) e definiu-se **Outras** como sendo a penalização do tempo máximo de viagem, pois não está relacionado com entrega ou coleta.

Após inserção das penalizações, na figura (4.3) localizadas no canto superior direito da figura, o usuário pode escolher qual a forma de minimização do problema. As opções inseridas nesta implementação possibilitam minimizar a Função Objetivo, a Distância Percorrida, o Tempo de Viagem ou o Custo de Viagem, em que estão incluídos os custos de combustível, pernoite, refeição e tempo de espera. Outra facilidade nesta tela é definir um local para a garagem na determinação das rotas. Esta garagem pode ser inserida também durante a inserção das requisições, onde para os casos de entrega, o embarque pode ser na garagem ou não e para os casos de coleta, a entrega será obrigatoriamente na garagem. Após a inserção dos parâmetros, o usuário deve confirmar através do botão “Aceitar”.

A janela da figura (4.3) será fechada e o usuário retorna para a tela da figura (4.2), onde deverá utilizar o botão “Requisições” para inserção das requisições de transporte das pessoas. Ao clicar neste botão, será aberta uma nova janela, conforme figura (4.4). O usuário insere o nome da pessoa em “Nome do Servidor”, seleciona os locais de embarque e desembarque, o horário de desembarque e a data deste desembarque, a data e o horário que termina a permanência no local de desembarque da pessoa que desembarcou. A partir do horário e data do desembarque o aplicativo estima o horário e data do embarque da pessoa, utilizando a equação (3.10). Seleciona-se o tipo desta requisição se é Coleta, Entrega ou ambas e clica-se em inserir para que as informações sejam armazenadas na lista de requisições (*LR*).

Figura 4.4: Tela para inserção das requisições de transporte

Neste aplicativo é permitido a inserção de no máximo 20 requisições de transporte.

Cada *LR* inserida pode ser armazenada no banco de dados utilizando o botão “Salvar” para ser utilizada a qualquer momento em outras simulações, conforme necessidade. Se as requisições estiverem em uma *LR* armazenada, então o usuário pode utilizá-la através do botão “Carregar”. Nesta tela da figura (4.4), também é possível ordenar os veículos a serem utilizados na estrutura de programação identificada como “Estrutura 3” (capítulo anterior), ou seja, o usuário tem a opção (lado direito da tela) de ordenar os veículos por tipo, consumo ou disponibilidade do veículo, conforme interesse. Após inserir as requisições de transporte e ordenação dos veículos para a estrutura mencionada, clique no botão “Calcular” para que o aplicativo execute as estruturas de programação e movimentos.

Ao clicar no botão “Calcular” será aberta uma nova janela do aplicativo, conforme figura (4.5), onde são executadas simultaneamente as estruturas de programação desenvolvidas, conforme descritas no capítulo 3. Nestas estruturas, são geradas as soluções iniciais, as soluções vizinhas após os movimentos e as soluções finais obtidas com o término das iterações do Recozimento Simulado.

Para cada estrutura, observando as informações mostradas na tela da figura (4.5) é possível identificar a quantidade de rotas geradas e qual veículo foi utilizado em cada rota. Além disso, tem-se o Tempo de Viagem total da estrutura, os resultados da Função Objetivo (FO) Inicial e Final, o valor percentual de melhora da FO Final em relação a FO inicial e a quantidade de Reordenações, Realocações e Trocas realizadas. O aplicativo apresenta também qual é a melhor estrutura, ou seja, aquela que obteve a melhor FO Final.

Nesta tela da figura (4.5) também é possível identificar os horários de início e término de um teste indicado na parte inferior da figura, bem como tem-se as opções de “Imprimir” e “Rotas”. Clicando na opção de imprimir, será criado um relatório geral e completo em arquivo do tipo .pdf armazenado no banco de dados do aplicativo. Este relatório contém as informações sobre todos os dados utilizados: parâmetros, requisições, penalizações, pessoas e veículos cadastrados, coordenadas geográficas dos locais para gerar o mapa.

[illegible]

Figura 4.5: Tela dos movimentos

Além disso, apresenta o detalhamento de cada estrutura e rotas geradas, com os locais de entrega e coleta, horários e capacidades dos veículos, horários das pernoites e refeições, informações da FO e custos calculados, entre outras informações. Ao final do relatório, como solução resumida das rotas geradas, tem-se a sequência de locais a serem visitados pelo veículo em cada rota, para cada estrutura.

A fim de comparar os resultados e possibilitar uma tomada de decisão, optou-se em calcular separado da FO alguns custos nas rotas geradas. Assim, tem-se em cada estrutura os valores dos custos finais totais de Refeição, Pernoite, Tempo de Espera e Combustível, ou seja, inclui-se todas as rotas da estrutura. A soma destes quatro custos resulta no valor do Custo Total, de forma a tornar a análise dos dados mais objetiva.

Ao clicar na opção “Rotas”, o aplicativo abre a tela do mapa com a opção “Visualização das Rotas”, conforme figura (4.6). Nesta visualização é possível mostrar as rotas de cada estrutura individualmente, de forma que se tenha uma representação do percurso do veículo para cada rota. Então, na janela de visualização deve-se clicar sobre uma rota (em amarelo) e a mesma será mostrada no mapa à direita da tela na figura mencionada.

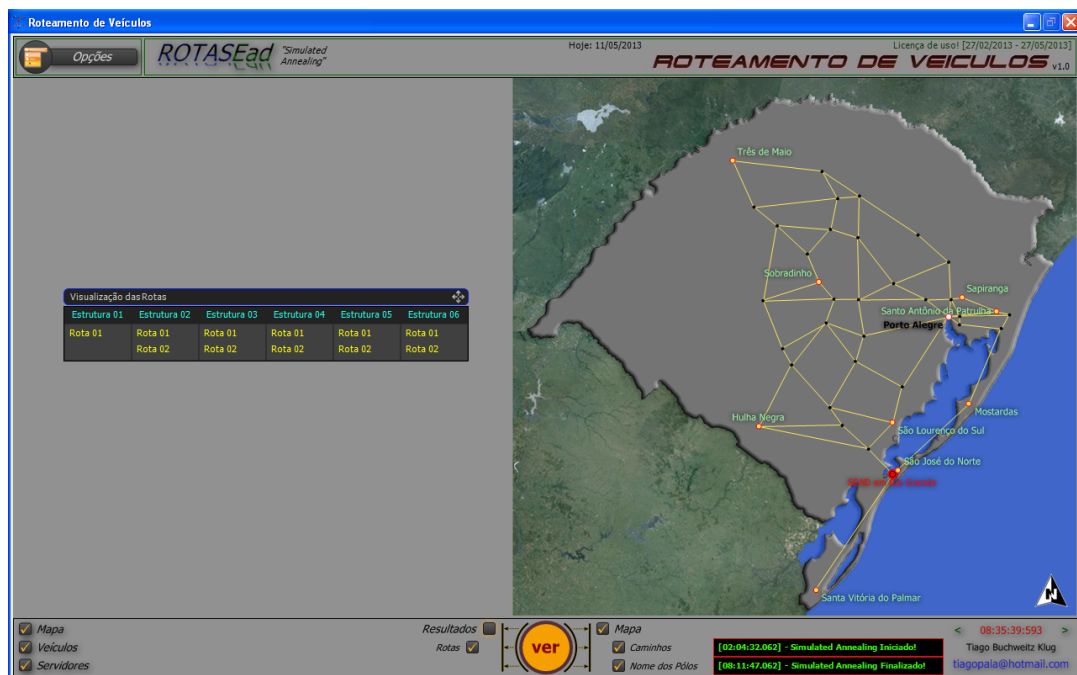


Figura 4.6: Representação das rotas resultantes

Durante a execução de um teste, o usuário pode interromper este teste a qualquer momento, clicando no botão “Aceitar”, localizado na parte inferior da tela na figura (4.5) e armazenar os resultados gerados até o momento da interrupção do teste. Porém, não é

possível continuar o teste a partir do ponto em que foi interrompido.

Por fim, cabe salientar que as informações de dados contidos nas telas representadas neste capítulo, tais como valores de parâmetros, requisições ou rotas nos movimentos, são ilustrativos e correspondem a algum teste realizado. As imagens destas telas foram apresentadas para indicar e melhor entender as funcionalidades do aplicativo.

4.2 Considerações

Neste capítulo foi apresentado o *layout* do aplicativo desenvolvido com as características de um PRV de coleta e entrega, obedecendo as restrições descritas no capítulo 3. Além disso, foram descritos os procedimentos para inserção dos dados necessários para execução do aplicativo e como são apresentados os resultados gerados.

No próximo capítulo, serão apresentados os dados de um problema real de coleta e entrega de pessoas que serão utilizados para testar e validar o aplicativo desenvolvido. Para este problema real, considera-se sua contextualização, características e representação dos locais onde ocorre as entregas e coletas.

Capítulo 5

Contextualização do Problema Real

Neste capítulo, é descrito um problema real de coleta e entrega com suas características peculiares. Inicialmente apresenta-se uma contextualização através de um breve histórico e, posteriormente, as características e o mapeamento dos locais onde ocorrem entregas e/ou coletas de pessoas.

Este problema real trata-se da logística operacional de veículos que são utilizados para o deslocamento de servidores que atuam na Educação à Distância da FURG, onde são organizados roteiros de viagens para que servidores (professores, tutores, coordenadores de curso ou membros da equipe) da Secretaria de Educação à Distância (SEaD) sejam transportados desde a instituição de ensino até os polos de apoio presencial. Neste contexto, os servidores podem ser coletados na garagem e entregues nos polos, coletados nos polos e entregues na garagem ou coletado em algum polo e entregue em outro polo.

5.1 Breve Histórico da EaD

Segundo Gonzalez (2005) esta modalidade de ensino foi oficializada no Brasil em 1996, pela Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (Lei nº 9394 de 20 de dezembro de 1996) e, a partir desta data, houve um progresso significativo em todo país. Em 1997, havia apenas um curso de graduação aprovado pelo Ministério da Educação (MEC) na Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. A partir de 1998, novos cursos tiveram a certificação do MEC em diferentes instituições de Ensino Superior e em 2006, foi instituída a Universidade Aberta do Brasil (UAB) pelo decreto 5.800 de 08 de junho de 2006 do Governo Federal (BRASIL, 2006).

A EaD na FURG se consolidou em 2007 com a criação da SEaD pela resolução nº 034/2007 (CONSUN, 2007), inicialmente oferecendo cursos pelo programa UAB, sendo 02 cursos de graduação e 03 de especialização contemplando a demanda de 270 estudantes (relatório de Gestão/Exercício 2008) matriculados em 05 polos de apoio presencial. A partir do final de 2008 a SEaD melhorou sua estrutura, aumentou seus recursos humanos e, assim, passou a atender também 01 curso de graduação pelo Programa Pró-Licenciatura¹ (PROLIC II), aumentando a quantidade de polos presenciais para 08 e o número de estudantes matriculados para 360.

Em 2011, a SEaD ofertava pela UAB: 02 cursos de graduação, 08 de especialização, 02 de aperfeiçoamento, 01 curso de extensão e pelo PROLIC, 01 curso de graduação, em diferentes polos presenciais. Além destes, ainda são ofertados cursos pelo Programa de Formação Continuada Mídias na Educação². Todos os cursos supracitados contemplam uma demanda de aproximadamente 1330 estudantes matriculados.

Atualmente, a SEaD tem parceria para oferta de cursos em 14 municípios do Rio Grande do Sul atendendo a uma demanda de aproximadamente 1400 alunos matriculados. São ofertados 4 cursos de graduação, 6 de especialização e 1 de aperfeiçoamento, sendo que outros 2 cursos estão em processo de análise para implantação.

5.2 Características do Problema

Diante do exposto na seção anterior, de acordo com as normas estabelecidas pelo projeto pedagógico de cada curso da EaD na FURG e a legislação vigente pelo decreto nº 5.622 (BRASIL, 2005) existe a necessidade e obrigatoriedade da realização de momentos presenciais nos polos, ou seja, encontros com as coordenações de cada curso, professores e estudantes³. Para que estes encontros sejam realizados, é fundamental organizar uma logística operacional que possibilite a elaboração dos roteiros de viagem para o transporte dos servidores aos polos presenciais, de forma que as viagens ocorram dentro dos

¹É o Programa de Formação Inicial para Professores dos Ensinos Fundamental e Médio promovido pelo Ministério da Educação, voltado para professores que atuam nos sistemas públicos de ensino, nos anos/séries finais do Ensino Fundamental e/ou no Ensino Médio e não têm habilitação legal para o exercício da função (licenciatura), visando a atender a Resolução FNDE/CD/Nº 34, de 9 de agosto de 2005.

²O programa oferta o curso de especialização para professores da educação básica da rede pública de ensino.

³É relevante destacar que na FURG, os encontros presenciais são realizados para todos os cursos nos diferentes polos presenciais.

horários pré-determinados pela coordenação de cada curso e num limite de tempo máximo permitido.

Atualmente, os roteiros de viagem aos polos são elaborados pelos secretários, juntamente com a equipe de gestão e logística da SEaD, de forma empírica. As coordenações de curso, individualmente, entregam aos secretários uma relação de datas dos encontros presenciais, horários, locais e quantidade de servidores que irão aos polos. Os secretários repassam estas informações à equipe de gestão que avalia a disponibilidade de veículos para transportar os servidores na data solicitada.

A equipe de gestão organiza as informações em tabelas, manualmente, considerando a data e os horários em que ocorrem os encontros presenciais, os polos em que ocorrerão os encontros, a duração destes encontros, o tempo de duração da viagem até os polos, a necessidade de pernoite nos polos e a quantidade de servidores que irão participar do encontro presencial. Após a organização destas informações, faz-se a reserva do veículo junto ao setor de viaturas da FURG, vinculado à Unidade de Transportes, que também define os motoristas.

Neste contexto, devido as solicitações dos cursos separadamente, pode ocorrer a realização de várias viagens num mesmo dia para polos distintos, mas próximos entre si e utilizando veículos distintos, conseqüentemente, aumentando o custo de transporte. Desta forma, o problema de logística operacional na Educação a Distância da FURG, possui as seguintes características:

- A rede viária do problema é representada por um grafo $G = (V, A)$ não-direcionado na figura (5.1), onde V é o conjunto de locais e A é o conjunto de arestas que representam as rodovias possíveis entre dois locais mapeados;

A partir deste grafo da figura (5.1), utilizando os dados do *Google Earth Free* foi possível obter a distância real aproximada e respectivos tempos de viagem entre os pontos, bem como suas coordenadas geográficas.

- Os locais para embarque e desembarque dos servidores são a SEaD e os polos;
- Os deslocamentos dos servidores aos polos ocorrem, em sua maioria, durante os fins de semana de acordo com cronograma pré-estabelecido por cada coordenação de curso;

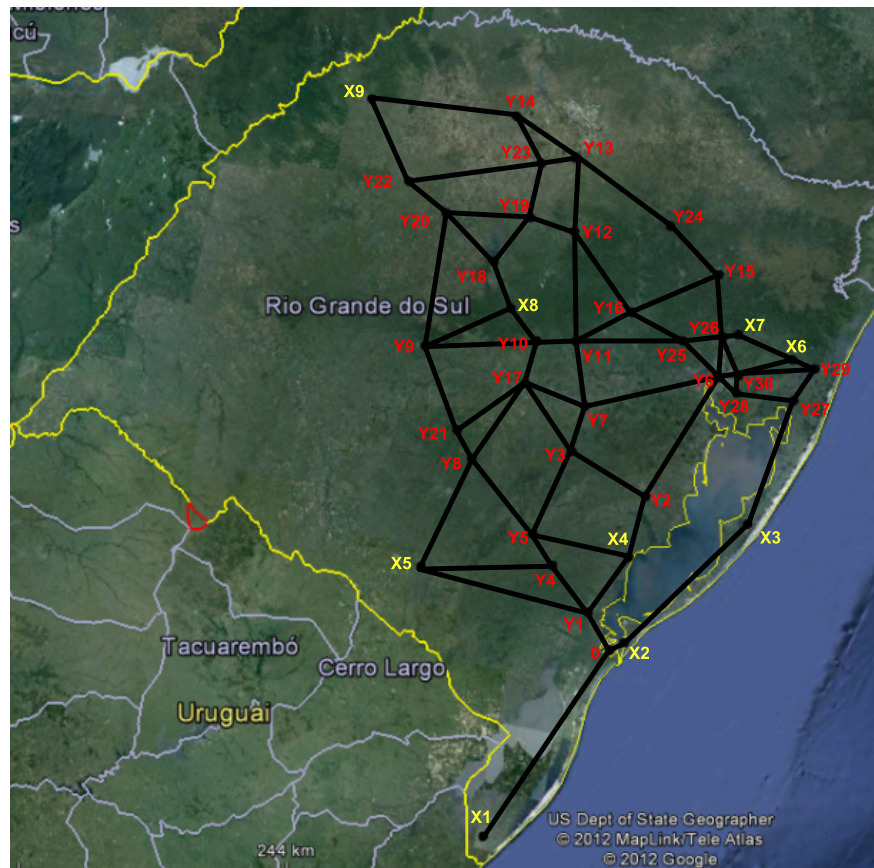


Figura 5.1: Grafo das ligações entre os vértices. Os pontos representados por X são os polos e os representados por Y são as demais cidades ou trevos de rodovias

- Os trechos de rodovias entre dois vértices da figura (5.1) são federais, estaduais ou municipais;
- As requisições de viagens aos polos são solicitadas pelas coordenações de curso através de tabelas em que constam os seguintes itens: os horários e datas dos encontros presenciais, locais de embarque dos servidores que irão aos encontros, polos onde ocorrerão os encontros e que devem desembarcar servidores, o nome do servidor que irá ao polo, qual setor da universidade está vinculado e informação da necessidade de hospedagem para os servidores;
- A frota de veículos é heterogênea em relação à capacidade;
- Os condutores dos veículos são motoristas da unidade de transportes da FURG.
- De acordo com a legislação federal, para os polos mais distantes da SEaD, são realizadas paradas do veículo ao longo da viagem, para refeições e descanso do condutor e servidores. Além disso, quando necessário, faz-se a parada do veículo

para pernoite dos servidores e condutor;

- Os veículos saem da SEaD, realizam as visitas aos polos para que os servidores desenvolvam suas atividades nos polos, esperam estes servidores e retornam para a SEaD;
- Existe um tempo de duração dos intervalos de embarque e desembarque na SEaD ou nos polos;
- Não existe um tempo máximo permitido de duração de cada rota, considerando ida e volta, ou seja, as rotas podem ser realizadas num mesmo dia ou durarem mais de dois dias consecutivos, de acordo com a necessidade;
- Os veículos são alocados em cada rota atendendo as solicitações de viagem, de forma que a capacidade do veículo não seja violada;
- Cada rota é executada por apenas um veículo e pode ocorrer de um mesmo polo ser visitado por 2 veículos;
- O horário de chegada do veículo nos polos para desembarque dos servidores ocorre sempre antes do horário dos encontros presenciais;
- O horário de saída dos servidores dos polos ocorre sempre após o término da permanência destes servidores. Neste tempo de permanência, estão incluídos o tempo de duração do encontro (aula, reunião) e pernoite, quando necessária;
- Os veículos circulam das 06h da manhã às 00h e, eventualmente, podem circular após às 00h quando estão retornando para a SEaD e estão próximos do término da viagem.
- Destaca-se que alguns municípios onde estão localizados os polos e a SEaD, são banhados pela Laguna dos Patos. Assim, no trecho entre a SEaD e o polo de São José do Norte (figura 5.2) existe o transporte hidroviário que é feito através de balsa para veículos e lanchas para passageiros. A travessia de balsa tem duração de 45min e a de lancha, 30min. Atualmente, para os encontros presenciais no polo de São José do Norte, os servidores se deslocam de lancha (devido a proximidade e facilidade).

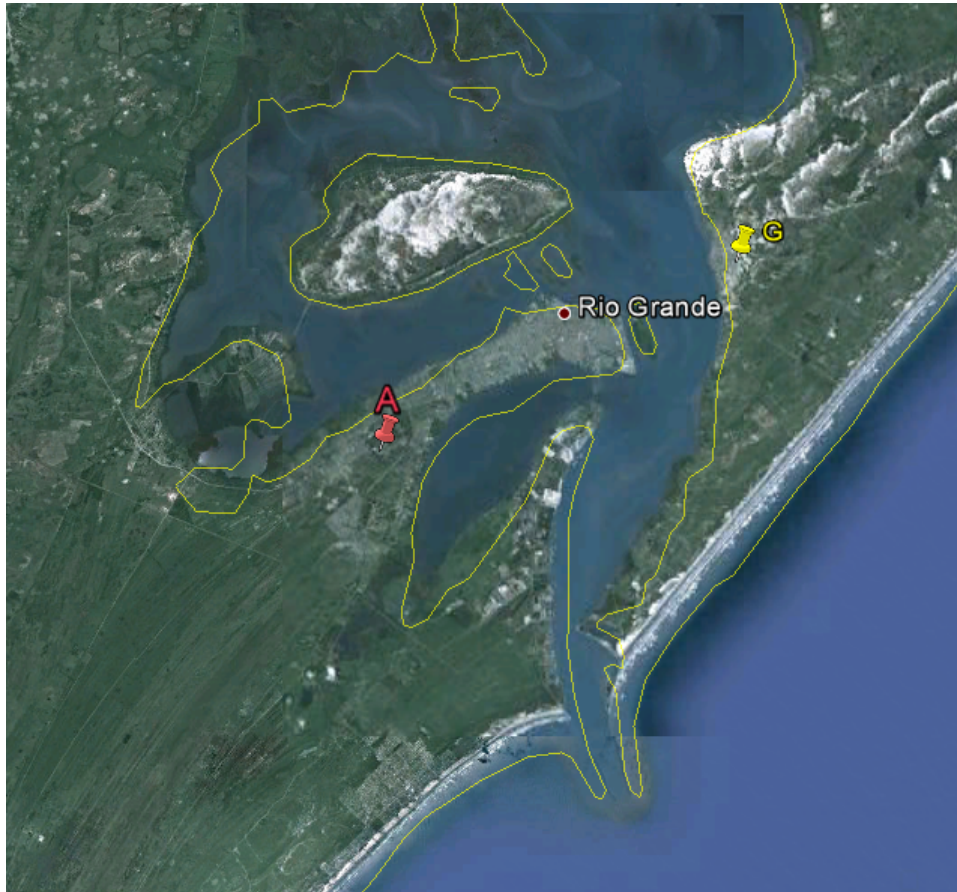


Figura 5.2: Zoom do trecho da Laguna dos Patos

5.3 Mapeamento Geográfico dos Pontos

A partir de informações da SEaD, foi possível mapear os 09 polos presenciais localizados em diferentes municípios do Rio Grande do Sul. Além destes, foram mapeados alguns trevos de acesso em rodovias e algumas cidades próximas dos polos ou que estão localizadas ao longo do percurso nas rodovias.

Para a representação dos pontos no mapeamento, foi utilizado o *Google Earth Free* que é um aplicativo que combina os recursos de pesquisa do *google*, onde contém os mapas, terrenos e edificações em 3D para disponibilizar informações geográficas de qualquer ponto do mundo para qualquer pessoa (HAIDEMANN, 2007). Este aplicativo também permite calcular a distância aproximada entre dois pontos quaisquer, bem como o tempo de viagem a ser percorrido no trajeto entre os dois pontos utilizados.

Observa-se os pontos mapeados na figura (5.3) que representam:

- a sede (O - SEaD na FURG);
- os polos presenciais (X1 - Santa Vitória do Palmar, X2 - São José do Norte, X3 -

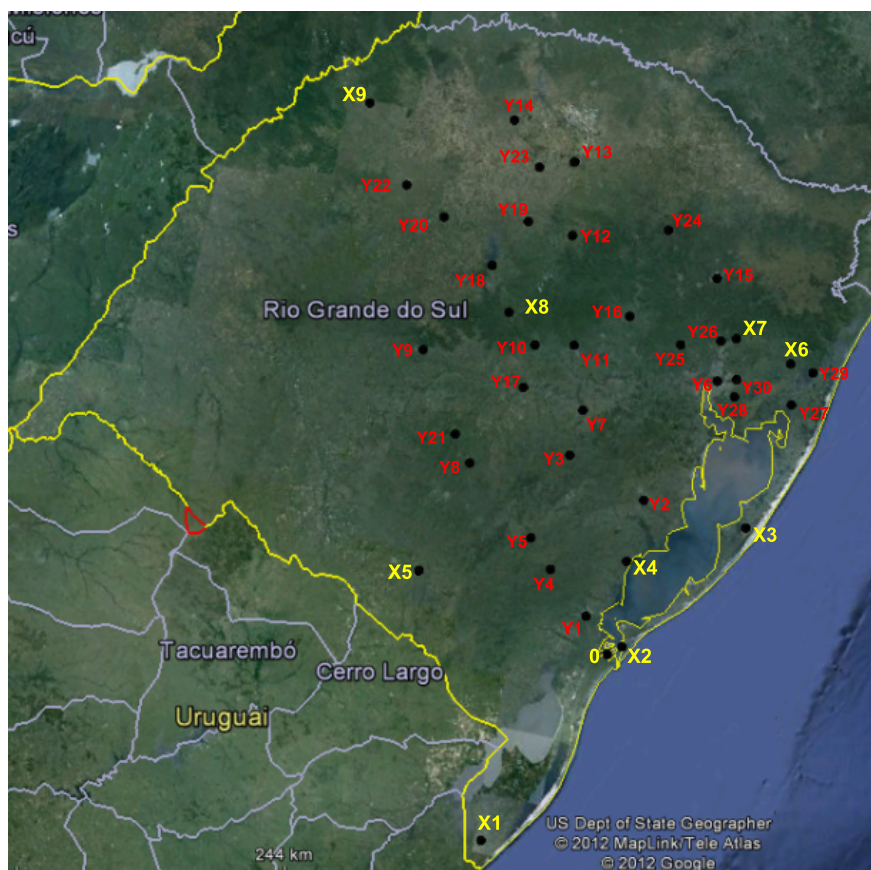


Figura 5.3: Representação da localização dos polos, cidades e trevos

Mostardas, X4 - São Lourenço do Sul, X5 - Hulha Negra, X6 - Santo Antônio da Patrulha, X7 - Sapiranga, X8 - Sobradinho e X9 - Três de Maio);

- as cidades próximas ou no percurso: (Y1 - Pelotas; Y2 - Camaquã; Y3 - Encruzilhada do Sul; Y4 - Canguçu; Y6 - Porto Alegre; Y7 - Pantano Grande; Y9 - Santa Maria; Y10 - Candelária; Y12 - Soledade; Y13 - Passo Fundo; Y14 - Sarandi; Y15 - Caxias do Sul; Y16 - Lajeado; Y17 - Cachoeira do Sul; Y19 - Espumoso; Y20 - Cruz Alta; Y22 - Ijuí; Y23 - Carazinho; Y24 - Nova Prata; Y25 - Montenegro; Y27 - Capivari do Sul; Y28 - Viamão);
- os trevos de acesso em algumas rodovias: (Y5 - Trevo entre Santana da Boa Vista e Canguçu; Y8 - Trevo entre Caçapava do Sul e Santana da Boa Vista; Y11 - Trevo em Santa Cruz do Sul com RS 287; Y18 - Trevo próximo a Salto do Jacuí; Y21 - Trevo entre Caçapava do Sul e Santa Maria; Y26 - Trevo em Novo Hamburgo; Y29 - Trevo na Estrada Osório/Capivari do Sul; Y30 - Trevo em Gravataí);

5.4 Considerações

Neste capítulo, foi apresentado a contextualização de onde o problema real está inserido e um breve histórico da EaD. Apresentou-se as características e a forma como o problema é tratado atualmente, com o mapeamento geográfico dos pontos.

No próximo capítulo, para atingir os objetivos propostos apresenta-se os dados utilizados a partir deste problema real para teste e validação do aplicativo desenvolvido. Além disso, são apresentados os resultados gerados nos testes, as análises destes testes realizados e conclusões dos resultados da Função Objetivo e demais custos.

Capítulo 6

Análise dos Resultados

Este capítulo apresenta alguns testes realizados com o aplicativo desenvolvido, os resultados gerados e analisados. São apresentados os valores utilizados nos parâmetros e penalizações, a descrição dos testes do cenário com 5 requisições para o problema real apresentado no capítulo 5.

Os testes foram realizados em um computador com Processador *Intel Pentium Dual* de 2.16 GHz e 2GB de RAM, com *Windows XP Professional* 2002, *Service Pack 3*, utilizando os dados descritos a seguir.

6.1 Dados utilizados nos testes

Neste trabalho, com a finalidade de testar e validar o aplicativo analisando seu desempenho com as características da formulação matemática e heurísticas desenvolvidas, são utilizados dados reais do problema apresentado. Alguns parâmetros foram fixados apenas para realização destes testes, mas podem ser alterados conforme necessidade ou características específicas de outro problema real.

Inicialmente, foram cadastrados os locais mapeados apresentados na figura (5.3) do capítulo 5 que foram carregadas através de arquivos *excel* para serem executados. Foram necessárias as informações das coordenadas geográficas em graus decimais destes locais (descritas no apêndice A.1) e das distâncias reais aproximadas e tempos de viagem entre os locais, obtidos através do *Google Earth* (descritas no apêndice A.2). É importante recordar que a menor distância entre dois locais quaisquer cadastrados é obtida através do algoritmo de Floyd e estes locais ao serem inseridos no aplicativo podem ser visualizados

através da figura (6.1), a qual permitirá a representação das rotas resultantes.

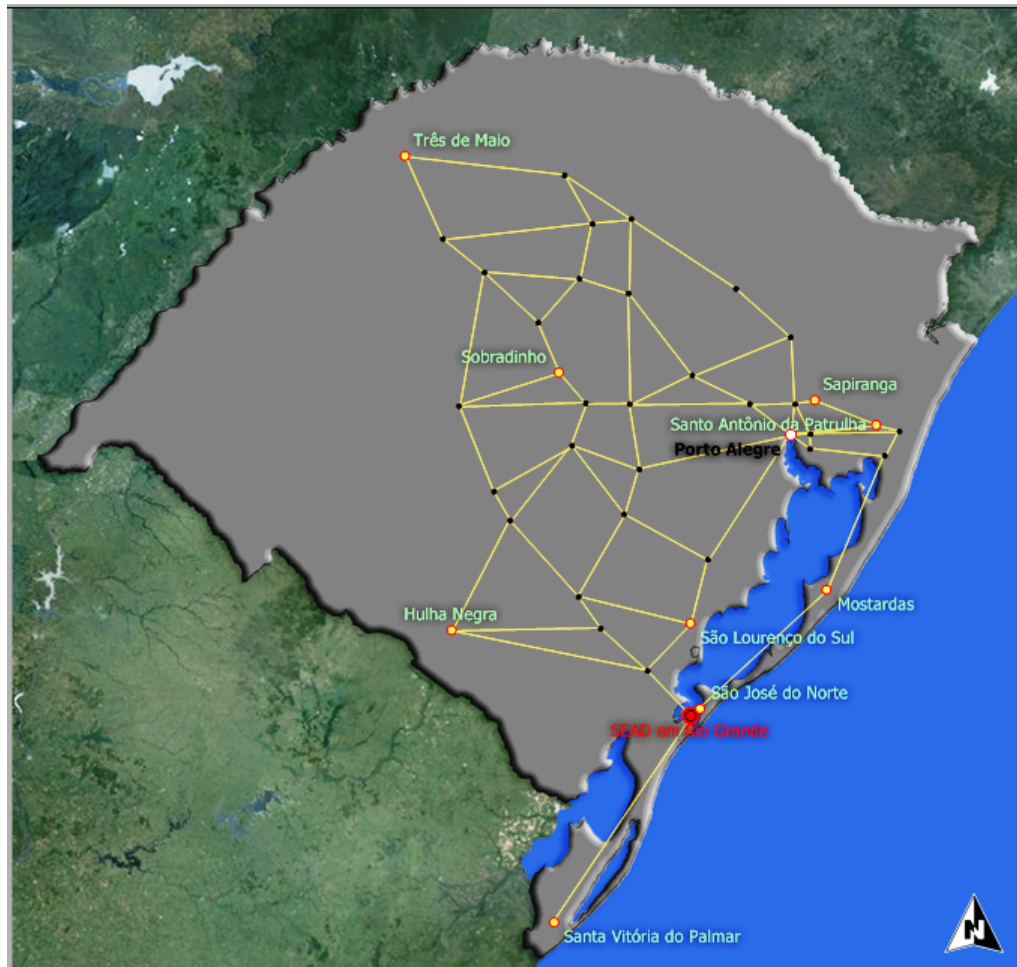


Figura 6.1: Zoom da Tela de representação das rotas

Nesta representação, no trecho entre a “SEaD em Rio Grande” (O) e o polo de “São José do Norte” (X2) foi considerado que os servidores são transportados pelos veículos na balsa¹. Então, foi considerado um tempo de viagem de 1h15min neste trecho entre O e X2, apesar de uma distância percorrida pequena. Apenas para esclarecimento, este tempo ocorre devido a três situações:

- tempo de deslocamento entre a SEaD e o atracadouro da Balsa em Rio Grande - 20min;
- tempo de travessia da Balsa pela Laguna dos Patos - 45min;
- tempo de deslocamento desde o atracadouro da Balsa em São José do Norte até o polo presencial - 10min.

¹Entende-se Balsa como a embarcação marítima que transporta veículos de pequeno, médio e grande porte

Posteriormente, de acordo com os dados do problema foram cadastrados 5 veículos que estão relacionados na tabela (6.1). Conforme descrito no capítulo 4, na tela do aplicativo representada pela figura (4.4) é possível ordenar os veículos a serem utilizados na estrutura 3, então foi utilizada a seguinte ordem para todos os testes: S10, *Ranger*, *Zafira*, *Sprinter* e Gol.

Tabela 6.1: Tabela de veículos e características

Tipo	Carro	Capacidade	Tanque	Consumo	Combustível	Preço Médio
1	Gol	4	45 litros	15km	Gasolina	R\$ 2,95
2	S10	5	80 litros	12km	Diesel	R\$ 2,20
3	Ranger	5	75 litros	11km	Diesel	R\$ 2,20
4	Sprinter	16	75 litros	10km	Diesel	R\$ 2,20
5	Zafira	5	58 litros	12km	Gasolina	R\$ 2,95

Nesta tabela (6.1), na capacidade do veículo estão incluídos passageiros e motorista e para o consumo é considerada a quantidade de quilômetros rodados por litro de combustível consumido para cada veículo. Além disso, os valores do preço médio do combustível foram obtidos através dos dados disponibilizados pela Agência Nacional do Petróleo (ANP, 2012) no mês de Julho/2012, considerando os dados referentes ao município de Rio Grande, Rio Grande do Sul.

Para o cadastro de servidores, o aplicativo aceita até 50 pessoas, mas foram cadastrados 20 servidores identificados como “Pessoa” de 1 a 20, conforme tabela (A.3) do apêndice A. Nesta tabela, além da identificação destes servidores, consta o setor a que pertencem na universidade e um código de identificação.

Para os parâmetros de tempos e horários, utilizou-se os valores descritos na tabela (6.2) para todos os testes. Nesta tabela são relacionados também os termos utilizados na formulação matemática para fins de melhor entendimento, descritos na coluna “Notação”. Os valores utilizados foram considerados conforme as características do problema real.

Nesta tabela (6.2), alguns valores inseridos auxiliam na programação de paradas dos veículos para realização de serviços necessários para os servidores, ou seja, paradas para refeições e pernoites quando necessárias. Então, foi considerado a realização de paradas do veículo a cada 3h com duração de 15 minutos e que estes veículos devem circular a partir das 6h da manhã e parar às 22h para pernoite dos servidores. Para realização do embarque ou desembarque dos servidores, foi considerado o tempo de 5 minutos para cada serviço e um tempo máximo de viagem permitido de 36h, compreendendo ida e volta.

Tabela 6.2: Parâmetros dos Tempos e Horários

Nome no aplicativo	Tempos e Horários	Notação
Tempo de Refeição	15min	d_r
Tempo de Hospedagem	08h	d_p
Tempo de Embarque	05min	s_i
Tempo de Desembarque	05min	s_j
Tempo de Viagem Diário	16h	t_d
Horário Mínimo Permitido de Saída	06h	H_m
Horário de Parada para Pernoitar	22h	H_p
Horário Tolerado para Pernoitar	23h	HT_p
Tempo de Viagem para Refeição	03h	T_{vr}
Tempo Tolerado para Refeição	01h	TT_r
Máximo Tempo de Viagem	36h	T''_k

Como parâmetros do Recozimento Simulado, baseado em resultados de Mauri e Lorena (2009), foram utilizados $\alpha = 0,97$, $SA_{max} = 1000$, $T_0 = 4000$ e $T_c = 0,01$, sendo que estes valores podem ser alterados. Para as penalizações apresentadas na formulação matemática, considerou-se os parâmetros descritos na tabela (6.3), onde de P1 a P13 representam as penalizações e de T1 a T15 os testes. Os valores de cada parâmetro foram sendo ajustados, conforme testes aleatórios.

Na tela do aplicativo apresentada na figura (4.3) do capítulo 4, tem-se os custos individuais por hora que se referem a custos de Pernoite, Refeição e Tempo de Espera por pessoa, sendo que são calculados conforme as equações apresentadas na seção 3.2 do capítulo 3. Neste trabalho, de acordo com o problema real foram utilizados em todos os testes os seguintes valores: R\$ 50,00 no custo da refeição (V_r), R\$ 8,75 ao custo da pernoite (D_p) e R\$ 20,00 para custo de espera (C_{esp}), conforme são calculados empiricamente pelo setor financeiro da SEaD.

Tabela 6.3: Parâmetros das Penalizações dos 15 testes

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15
Entregas	P1	10	10	20	20	10	5	40	400	85	95	90	2	3	5
	P2	8	30	55	55	30	15	110	1100	80	85	80	2	3	4
	P3	15	10	20	20	10	5	40	400	75	75	75	1	2	7
	P4	20	50	95	95	50	50	190	190	150	190	160	200	150	120
Coletas	P5	100	3000	3000	1000	1000	1000	3000	3000	2000	2000	2000	500	500	800
	P6	2	2	5	5	2	2	10	100	10	10	10	1	2	2
	P7	5	2	2	2	2	5	50	2	2	2	2	1	2	2
	P8	2	5	10	10	5	20	200	10	10	10	10	1	2	2
Embarque fora garagem	P9	4	10	20	20	10	5	40	400	45	45	45	1	3	4
	P10	40	30	55	55	30	15	110	1100	380	380	380	2	4	8
	P11	3	10	20	20	10	5	40	400	35	35	35	1	2	4
	P12	50	60	115	115	60	60	230	2300	450	450	450	5	6	5
Outras	P13	500	6000	6000	3000	3000	6000	6000	4000	4000	4000	5000	2000	2000	2000

O custo da refeição foi calculado como R\$ 12,50 durante 15 minutos (considerando que no problema real, o setor financeiro atribui o valor de R\$ 25,00 para uma refeição durante meia hora) e o custo de pernoite, como R\$ 70,00 dividido pelo total de horas da pernoite (8 horas). A partir do ajuste dos valores dos parâmetros e da quantidade dos veículos, tem-se a escolha das requisições. Estas foram escolhidas a partir dos dados reais na tabela (A.4) com 20 requisições cadastradas, sendo utilizadas para o cenário analisado as requisições descritas na tabela (6.4).

Tabela 6.4: Requisições do cenário analisado

	Embarque	Desembarque			Permanência	
Nome	Local	Local	Data	Hora	Data	Término
Pessoa 4	Mostardas	Santo Antonio	sábado	13:00	sábado	17:00
Pessoa 10	SEaD	Hulha Negra	sábado	10:00	sábado	15:00
Pessoa 13	SEaD	Mostardas	sábado	12:00	sábado	18:00
Pessoa 14	SEaD	Santa Vitória	sexta	14:00	sexta	18:00
Pessoa 16	SEaD	São Lourenço	sábado	09:00	sábado	14:00

Convém salientar que para as requisições nas tabelas, não foi atribuída uma data (com dia e mês) específica. No entanto, para a inserção destas requisições no aplicativo, foi necessário registrar essa data (dia e mês) para que o mesmo fizesse a simulação.

6.2 Resultados Obtidos e Análise

Para o cenário considerado foram realizados 15 testes e utilizou-se apenas 5 veículos, pois foram poucas requisições. Numa primeira análise, tem-se os dados do teste T1 e numa segunda análise tem-se todos os testes.

A análise será feita em relação ao valor da FO Final que considera a parcela das distâncias e as parcelas dos tempos, ou seja, os horários estimados e programados penalizados, os tempos de viagem entre os locais e o tempo total de viagem penalizado em relação ao máximo permitido. Além disso, faz-se uma breve análise sobre a quantidade de movimentos gerados e rotas resultantes para as melhores FO Finais em cada teste, bem como sobre o Custo Total obtido para fins de comparação e possível tomada de decisão.

6.2.1 Resultados do Teste 1

Na tabela (6.5), cada coluna indica uma das 6 estruturas de programação do aplicativo com seus respectivos dados. O “Temp. Viagem” expressa o tempo total de viagem em horas (h) de todas as rotas geradas em cada estrutura, sendo que deve ser dividido pela quantidade de rotas para identificar o tempo de viagem aproximado de cada rota. Os custos “Custo Total”, “C. Combustível”, “C. Pernoites”, “C. Refeições” e “C. Temp Espera” são calculados em unidades monetárias, neste caso, em reais (R\$) e a distância está expressa em quilômetros (km).

Tabela 6.5: Resultados do teste T1

Estruturas	1	2	3	4	5	6
Temp. Viagem (h)	87,27	111,02	109,4	87,15	78,15	88,45
Reordenações	526.834	533.110	11.358	11.623	116	3
Realocações	0	23.191	11.273	0	31	2
Trocas	0	31.526	11.257	0	23	2
FO Inicial	7.956,71	8.770,33	8.559,70	10.100,41	8.949,85	7.304,35
FO Final	5.209,29	8.224,39	8.559,70	6.786,13	5.147,95	7.304,35
Custo Total (R\$)	5.687,31	2.701,38	3.071,21	2.647,36	2.161,19	2.209,89
C. Combustível (R\$)	381,48	800,88	786,04	625,61	550,86	648,44
C. Pernoites (R\$)	840,00	350,00	700,00	418,25	420,00	559,13
C. Refeições (R\$)	362,50	412,50	512,50	537,50	225,00	400,00
C. Temp Espera (R\$)	4.103,33	1.138,00	1.072,67	1.066,00	965,33	602,33
Quant. Rotas	1	2	2	1	2	2
Percentual FO	65,47%	93,78%	100%	67,19%	57,52%	100%
Distância (km)	1.734,00	3.823,90	3.611,20	2.843,70	2.418,20	3.249,20

Analisando a tabela (6.5) percebe-se que a melhor FO Final aparece na estrutura 5 com o valor de 5.147,95 unidades. Deste valor, tem-se 2.418,20 unidades correspondente à distância percorrida e o restante do valor, 2.729,75 unidades correspondente à soma das parcelas dos tempos e horários penalizados na FO. A estrutura gerou 2 rotas para um tempo total de viagem da estrutura de 78,15h, sendo que neste tempo total estão incluídos: o tempo de viagem entre os locais, os tempos de pernoite, refeição, espera e os tempos de embarque ou desembarque e, além disso, houve uma redução do valor da FO Inicial a 57,52%. Comparando com as demais estruturas, apesar de ter a melhor FO Final, a distância total de 2.418,20 km percorrida pelos veículos é maior que a distância da estrutura 1, com 1.734 km. Porém, o Custo Total (Pernoites, Refeições, Combustível e Tempo de Espera) da estrutura 1 de R\$ 5.687,31 é duas vezes maior que o Custo Total

da estrutura 5 que é de R\$ 2.161,19. Isto ocorreu porque na estrutura 1 existe um custo maior associado ao Tempo de Espera dos veículos para coleta dos servidores.

As duas rotas geradas na estrutura 5 devem ser percorridas conforme a sequência de locais a seguir, realizando as entregas e coletas dos servidores, sendo a Rota 1 pelo veículo S10 e a Rota 2 pelo veículo Zafira.

Rota 1: O - Y1 - X4 - Y1 - O - X1 - O - Y1 - X5 - Y1 - X4 - Y1 - O - X1 - O

Rota 2: O - X2 - X3 - Y27 - Y29 - X6 - Y29 - Y27 - X3 - X2 - O

Observa-se também que nas estruturas 3 e 6, apesar de ocorrerem movimentos nas iterações não houve alteração no valor da FO Inicial. Outro detalhe a ser observado é que nas estruturas 1 e 4, como foi construída apenas uma rota em cada estrutura, não houveram movimentos de realocação ou troca, estando de acordo com as heurísticas implementadas.

Convém salientar que estes resultados do teste T1 foram obtidos utilizando os parâmetros descritos anteriormente na tabela (6.3) e que, conforme são alterados os parâmetros tem-se resultados diferentes para estes custos. Isto pode ser comprovado analisando os resultados obtidos para todos os 15 testes descritos na tabela (6.6), onde são apresentados os resultados das estruturas que geraram as melhores FO Finais obtidas em cada teste. Nesta tabela, tem-se a coluna “R” que representa a quantidade de rotas geradas em cada teste, a coluna “E” que indica a estrutura com a melhor FO Final, a coluna dos “Perc.” que representa o percentual de melhora da FO Inicial, a coluna “P.Temp” que representa a parcelas de tempos penalizados calculados na função objetivo e “Comb.” que representa o custo de combustível. Além disso, nesta tabela (6.6) os valores descritos na coluna “FO Final” compreendem a soma dos valores das colunas “Distância” e “P.Temp”.

Tabela 6.6: Resultados dos 15 Testes

Test.	T. Viag	Reord.	Real.	Troc.	FO Inicial	FO Final	Perc	Cust Total	Comb.	Distância	P.Temp	R	E
T1	78,15	116	31	23	8.949,85	5.147,95	57,52	2.161,19	550,86	2.418,20	2.729,75	2	5
T2	48,03	938.906	216.931	65.906	30.822,21	5.257,66	17,06	1.248,20	555,2	2.459,30	2.798,36	2	4
T3	51,05	937	294	205	31.357,35	9.796,89	31,24	1.876,59	650,09	2.765,40	7.031,49	2	4
T4	79,88	1.130	392	230	13.506,61	9.188,46	68,03	1.633,32	768,16	3.201,40	5.987,06	2	4
T5	63,57	782	229	141	15.545,70	6.025,24	38,76	1.819,55	491,89	2.302,20	3.723,04	2	3
T6	48,68	909	349	214	13.623,83	4.734,17	34,75	1.247,57	486,4	2.302,20	2.431,97	2	3
T7	70,23	1.315	413	250	36.638,38	8.472,33	23,12	1.495,84	644,72	3.257,30	5.215,03	2	5
T8	54,48	467	171	100	36.141,65	9.137,83	25,28	1.378,13	667,63	2.821,30	6.316,53	2	4
T9	64,42	402	150	80	22.067,01	6.378,57	28,91	1.318,13	630,13	2.996,50	3.382,07	2	5
T10	50,87	4.091	3.845	3.861	26.107,84	6.973,91	26,71	1.719,65	671,31	3.201,40	3.772,51	2	2
T11	63,18	3.946	3.615	3.500	29.527,74	6.284,25	21,28	1.320,11	576,44	2.738,20	3.546,05	2	3
T12	63,27	229	52	40	23.438,90	6.307,97	26,91	1.224,04	666,79	3.147,80	3.160,17	2	3
T13	73,43	341	131	86	13.638,75	6.695,27	49,09	1.578,16	684,25	3.257,30	3.437,97	2	3
T14	65,35	290	72	48	12.120,21	6.250,49	51,57	2.263,68	463,52	2.201,00	4.049,49	2	4
T15	74,18	184	58	21	7.862,59	7.247,17	92,17	1.322,84	647,84	3.257,30	3.989,87	2	5

6.2.2 Resultados dos 15 Testes

Observando a tabela (6.6) percebe-se que a melhor FO Final aparece no teste T6 que foi obtida pela estrutura 3 com o valor de 4.734,17 unidades, sendo 2.302,20 unidades correspondentes à distância percorrida e 2.431,97 unidades referente à soma das parcelas de tempos na FO, tendo uma redução da FO Inicial a 34,75%. A partir destas informações, apresenta-se um recorte desta tabela (6.6) com os resultados detalhados do teste T6, apenas para a estrutura 3 com as duas rotas geradas, descritos na tabela (6.7).

Tabela 6.7: Resultado detalhado da Estrutura 3 do T6

	Rota 1	Rota 2	TOTAL
Tempo Total Viagem (min)	2.014,00	907,00	2.920,80
FO Final	2868,90	1865,27	4.734,17
Distância	1.298,00	1.004,20	2.302,20
Tempos Penalizados (FO)	1.570,90	861,07	2.431,97
Custo Total	846,73	400,84	1.247,57
C. Combustível	285,56	200,84	486,40
C. Pernoites	210,00	0,00	210,00
C. Refeições	162,50	200,00	362,50
C. Tempo de Espera	188,67	0,00	188,67

Analisando os dados desta tabela (6.7), as duas rotas geram um Custo Total de R\$ 1.247,57, incluindo os totais de R\$ 362,50 (C. Refeições), R\$ 486,40 (C. Combustível), R\$ 210,00 (C. Pernoites) e R\$ 188,67 (C. Tempo de Espera). Os veículos percorrem um total de 2.302,20 km em um Tempo de Viagem Total das duas rotas de 48,68h. O custo total de combustível para estes veículos poderia ter sido menor se utilizasse veículos com consumo menor, por exemplo, verificando a partir da equação do custo (3.21), no capítulo 3.

Para as rotas geradas, tem-se que na Rota 1 foi escolhido o veículo do tipo S10 (5 passageiros) e na Rota 2 o veículo do tipo Ranger (5 passageiros). Estas rotas devem ser percorridas conforme a sequência de locais abaixo:

Rota 1: O - X2 - X3 - Y27 - Y29 - X6 - Y29 - Y27 - X3 - X2 - O - Y1 - X4 - Y1 - X5 - Y1 - O

Rota 2: O - X1 - O - Y1 - X4 - Y1 - X5 - Y1 - O

Na Rota 1, é proposto pelo aplicativo que o veículo (S10) saia da garagem com 2 servidores que devem desembarcar em X3 e X6. Desta forma, o veículo realiza o desembarque do 1º servidor em X3 e segue a rota para o desembarque do 2º servidor em

X6. Ocorre um tempo de espera do veículo para o embarque do servidor em X6, após o término do tempo de permanência deste, e o veículo retorna para o embarque novamente do 1º servidor em X3. Posteriormente, o veículo segue para coletar servidores em X4 e X5 que haviam sido entregues pelo veículo da rota 2.

Na Rota 2, é proposto que o veículo (*Ranger*) saia da garagem com 3 servidores, sendo que 1 servidor deve desembarcar em X1, atender este polo e ser coletado novamente após o término do tempo de permanência. O veículo espera com os outros 2 servidores para que sejam entregues, posteriormente, em X4 e X5. Após coletar o servidor 1 em X1, o veículo segue a rota e realiza o desembarque dos demais servidores em X4 e X5, retornando para a garagem somente com o servidor 1.

Em relação aos demais testes do cenário, percebe-se que todos geraram duas rotas e que houveram os três tipos de movimentos. Salienta-se que em algumas estruturas de cada teste, têm-se resultados que não precisaram de movimentos de reordenação, realocação ou trocas, por dois motivos: se for realizado o movimento, há um excesso na capacidade do veículo ou há um aumento no valor da FO Final.

Analisando a quantidade de movimentos na tabela (6.6) pode-se concluir, a priori, que para alguns testes (T1, T12, T15) com uma quantidade pequena de movimentos de reordenação, realocação e troca, a FO Final não é tão boa considerando o percentual de melhora da FO Inicial e comparando com os demais testes. Porém, não é conclusivo afirmar que quanto maior o número de movimentos melhor será a FO Final, pois para testes com quantidade grande desses movimentos (T2, T4, T10, T11), a FO Final pode não ter uma solução tão boa como em T4 ou T10, em que a FO Final tem valor diferente e a distância percorrida é a mesma.

Os resultados do teste T6 foram comparados com os resultados do cálculo manual das rotas para as 5 requisições do cenário analisado, conforme é feito empiricamente para o problema real. Este cálculo foi feito utilizando os mesmos valores de distância e tempos aproximados utilizados no teste T6 e considerando a duração dos tempos de embarque e desembarque, o tempo de parada para refeição, o tempo de pernoite e a duração dos tempos em que o veículo fica parado nos locais da entrega aguardando a coleta dos servidores que foram entregues.

Utilizando as 5 requisições fez-se uma programação empírica dos veículos de acordo com informações fornecidas pela SEaD para o problema real. Assim, de acordo com os

horários das requisições são programadas 4 rotas (descritas a seguir) e utiliza-se 3 veículos, sendo nas Rotas 1 e 2 a *Ranger*, na Rota 3 a *Zafira* e na Rota 4 a *Sprinter*, escolhidos de forma aleatória.

Rota 1: O - X1 - O

Rota 2: O - Y1 - X4 - Y1 - O

Rota 3: O - Y1 - X5 - Y1 - O

Rota 4: O - X2 - X3 - Y27 - Y29 - X6 - Y29 - Y27 - X3 - X2 - O

Nestas condições, foi obtida a distância total percorrida das 4 rotas, a soma dos tempos de viagem entre os locais e o valor do tempo total de viagem penalizado em relação ao tempo máximo permitido. Salienta-se que não foi considerado na FO Final deste cálculo empírico o valor dos tempos penalizados dos horários estimados e programados, pois na prática não são considerados. Assim, a FO Final resultou em 5.141,37 unidades, sendo 1.835,40 unidades referentes ao total da distância percorrida e 3.305,00 unidades correspondente à soma dos tempos entre os locais na FO.

Além disso, obteve-se como tempo total de viagem destas 4 rotas o valor de 55,05h e um Custo Total de R\$ 1.200,86 distribuído nos custos de Refeições (R\$ 225,00), Pernoite (R\$ 210,00), Tempo de Espera (R\$ 380,00) e Combustível (R\$ 385,86). Para melhor entendimento, estes valores estão dispostos na tabela (6.8) onde são comparados aos valores do teste T6.

Tabela 6.8: Comparação de T6 com resultado empírico

Dados	T6	Cálculo empírico
Temp. Viagem	48,68	55,05
FO Final	4.734,17	5.141,37
Distância	2.302,20	1.835,40
Tempos (FO)	2.431,97	3.305,00
Custo Total	1.247,57	1.200,86
C. Combustível	486,40	385,86
C. Pernoites	210,00	210,00
C. Refeições	362,50	225,00
C. Tempo Espera	188,67	380,00
Quant. Rotas (veículos)	2 (2 veíc.)	4 (3 veíc.)

Nesta comparação da tabela (6.8), percebe-se que no cálculo empírico a FO Final tem o valor maior que no teste T6, mesmo não considerando os horários estimados e programados penalizados no cálculo empírico. No cálculo do valor da parcela dos tempos

na (FO) para o exemplo empírico foi utilizado apenas a soma dos tempos entre os locais, para as 4 rotas consideradas no exemplo.

Observa-se também nesta comparação que o tempo de viagem em T6 é menor e utiliza-se 2 veículos em 2 rotas, enquanto que para o cálculo empírico tem-se o tempo de viagem de 55,05h utilizando-se 3 veículos em 4 rotas. Além disso, tem-se um custo de Tempo de Espera de R\$ 380,00 no empírico, apesar do Custo Total ser próximo do encontrado no teste T6. Como em T6 utilizam-se apenas 2 veículos, a distância percorrida será maior para atender às requisições e o custo de combustível também, de acordo com o tipo de veículo utilizado.

6.2.3 Análise Geral

A partir desta comparação na tabela (6.8), considera-se os resultados do aplicativo satisfatórios para este cenário, visto que sugerem uma programação dos veículos com custos razoáveis e possibilidades de escolha das rotas pelo tomador de decisão. Assim, acredita-se que o aplicativo foi validado, apresentando bons resultados e poderá ser utilizado em outros problemas.

O aplicativo desenvolvido encontrou rotas viáveis para a organização da logística operacional dos veículos da EaD com resultados considerados satisfatórios. Com a implementação e os testes realizados, algumas rotas geradas no cenário analisado apresentaram percursos viáveis, com a utilização de número menor de veículos e alguns custos razoavelmente bons. Onde pode-se utilizar 3 veículos no problema real, aproximando datas e horários das requisições é possível utilizar apenas 2 veículos, como propõe o aplicativo no teste T6. Como os resultados são propostas apresentadas pelo aplicativo, deverá o tomador de decisão verificar qual melhor opção de rota, de acordo com a disponibilidade de recursos e veículos para o problema real analisado.

A partir dos testes realizados neste cenário, percebeu-se possibilidades de melhoria na implementação computacional e acréscimo de restrições na tentativa de indicar a troca de motoristas para descanso, indicar a passagem do veículo pela garagem e desembarque de passageiros quando este veículo ainda deverá continuar sua rota. Além disso, visualiza-se considerar o tempo de permanência da pessoa no veículo e o tempo máximo de viagem de um motorista.

Uma restrição considerada na implementação e que apareceu no resultado de

algumas rotas é a flexibilização do horário limite de pernoite. Este horário nos parâmetros das janelas de tempos e horários foi considerado como 22h para rotas que estejam num percurso de ida somente, com desembarque de servidores. Para o caso de rotas no percurso de retorno para a garagem com embarque de servidores (coleta), se ainda restar um tempo de viagem até a garagem que seja inferior a 3h e esse tempo de viagem da rota não ultrapassar o limite de tempo diário permitido (16h), então não haverá pernoite para os servidores e a rota termina na garagem em horário posterior às 22h.

A fim de encontrar soluções satisfatórias, foram utilizados diferentes valores nos parâmetros das penalizações. Porém, os resultados apresentados neste trabalho comprovam que esta pesquisa inicial deve ter continuidade e outros inúmeros parâmetros devem ser testados e analisados em outros cenários ou problemas, de forma que se encontre resultados e parâmetros melhores. Existem inúmeras possibilidades de utilização dos parâmetros das janelas de tempos e horários que não foram testadas neste trabalho, bem como alteração dos valores dos custos de Pernoite, Refeição e Tempo de Espera.

Em relação ao tempo computacional de execução dos testes, tem-se os dados apresentados na tabela (6.9) como sendo importantes para avaliação do esforço computacional do aplicativo implementado. Nesta tabela, a coluna “Cenário” apresenta os tempos de execução de cada teste e a coluna “Cada Estrutura” apresenta o valor do tempo de execução do teste dividido por 6 (que indica as 6 estruturas), resultando no tempo médio computacional de cada estrutura. Além disso, obtemos a média dos tempos computacionais dos 15 testes para este cenário, sendo o tempo médio de execução de 01h59min20s.

Em geral, percebe-se que os parâmetros utilizados são bons para este cenário, neste problema real, pois possibilitam gerar rotas com percursos viáveis e de acordo com as restrições apresentadas. Acredita-se que em outros problemas, o aplicativo poderá apresentar também boas soluções com estes mesmos parâmetros, não impedindo de encontrar-se outros valores de parâmetros com melhores resultados para a FO Final.

Como a proposta inicial foi implementar o aplicativo, realizar os testes computacionais, analisar a minimização da FO e avaliar as rotas e custos resultantes, considera-se os resultados da pesquisa satisfatórios, visto que foram realizadas estas etapas e boas soluções com rotas viáveis foram encontradas. É relevante ressaltar que este aplicativo está implementado de forma generalizada com possibilidade de carregamento de dados e alteração de valores para utilização em outros problemas de roteamento do cotidiano,

Tabela 6.9: Tempo de Execução dos Testes

Testes	Tempos Computacionais	
	Cenário 1	Cada Estrutura
T1	02h30min36s	25min06s
T2	03h45min37s	37min36s
T3	01h09min05s	11min31s
T4	53min54s	08min59s
T5	01h31min47s	15min18s
T6	01h56min52s	19min29s
T7	02h10min07s	21min41s
T8	02h14min07s	22min21s
T9	02h37min05s	26min11s
T10	01h53min25s	18min54s
T11	01h16min18s	12min43s
T12	01h06min16s	11min03s
T13	01h54min43s	19min07s
T14	02h55min29s	29min15s
T15	01h54min39s	19min07s
Tempo Médio	01h59min02s	

considerando as restrições apresentadas neste trabalho.

6.3 Considerações

Neste capítulo, foram apresentados os dados utilizados para o cenário analisado e os resultados obtidos. A partir destes resultados, fez-se uma análise do teste T1 e outra análise dos 15 testes. Nos 15 testes, o resultado do teste T6 foi comparado aos dados do problema real calculado de forma empírica, validando o aplicativo desenvolvido.

No próximo capítulo, serão apresentadas as conclusões do trabalho e as sugestões de trabalhos futuros, tanto para os métodos e técnicas utilizados, quanto melhorias na implementação.

Capítulo 7

Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste capítulo, apresentam-se as conclusões do trabalho com uma análise da pesquisa desenvolvida e dos resultados apresentados pelo aplicativo, bem como as propostas de estudos futuros que inclui a continuidade da pesquisa.

7.1 Conclusões

Na conclusão desta pesquisa, faz-se uma breve reflexão sobre a relevância do trabalho desenvolvido, visto que foram pesquisados diversos PRV existentes na literatura, com seus modelos matemáticos, métodos de solução e aplicações. Na revisão bibliográfica do capítulo 2, foi enfatizado os PRV's de coleta e entrega e a metaheurística Recozimento Simulado que nortearam este trabalho.

A partir da escolha em desenvolver o trabalho sobre o PRV de coleta e entrega simultânea, foi desenvolvida uma formulação matemática baseada nos modelos de Mauri e Lorena (2009) e Júnior (2005) com restrições de janelas de tempo. Esta formulação considera na função objetivo o somatório da distância total percorrida e o somatório dos tempos penalizados em relação aos horários das requisições, dos tempos de viagem entre os locais e do tempo total de viagem penalizado em relação ao máximo permitido. Foram utilizados quatro parâmetros associados a 13 penalizações, de acordo com o tipo de requisição inserida e, além disso, separado da função objetivo foi inserido no aplicativo o cálculo de Custos de pernoites, refeições, tempo de espera e combustível que auxiliam na tomada de decisão sobre qual melhor solução.

Na tentativa de analisar a formulação apresentada foram utilizadas duas heurísticas

desenvolvidas e denominadas de Heurística de Construção das Rotas e Heurística de Programação de Horários. Estas foram implementadas juntamente com a metaheurística Recozimento Simulado, resultando no aplicativo desenvolvido que foi apresentado no capítulo 4. O mesmo apresenta como diferencial a execução simultânea de seis estruturas de comparação dos resultados, as quais possibilitam a geração da solução inicial e soluções vizinhas através dos movimentos Reordenar, Realocar e Trocar. Nestas estruturas, em duas delas os veículos são selecionados de acordo com as capacidades, em uma estrutura os veículos são selecionados pelo usuário e nas outras três são selecionados aleatoriamente, de forma randômica.

O aplicativo apresenta como resultados em cada estrutura os valores da FO Inicial e Final, dos demais custos calculados, o percentual de melhora da FO Inicial, a quantidade de movimentos realizados e descreve a sequência de locais a serem visitados em cada rota para atender as requisições. A grande importância do desenvolvimento deste aplicativo está no fato de ter sido implementado de forma flexível, facilitando na alteração de dados inseridos para teste de outros problemas.

Para o propósito da análise dos resultados e validação da implementação do aplicativo, utilizou-se as características e informações de um problema real, apresentado no capítulo 5. O problema de logística operacional da EaD na FURG trata a coleta e entrega de servidores em diferentes polos do Rio Grande do Sul, com características peculiares. Inicialmente, realizou-se o mapeamento dos pontos e cadastro de informações sobre distâncias, tempos, horários e, posteriormente, foram inseridos no aplicativo os valores de todos os parâmetros necessários.

É importante salientar que o problema tratado envolveu uma frota de veículos do Governo Federal e, por isso, não foi tratado no modelo os custos com pedágios. Além disso, alguns trechos de rodovias não são asfaltadas influenciando no desgaste dos veículos, bem como na variação da velocidade dos veículos, fatores que não foram analisados neste problema. Também não foi analisado a quantidade e localização de postos de combustíveis nas rotas.

O tempo computacional do aplicativo não foi o foco nesta pesquisa, mas pelos tempos de execução apresentados em cada teste, o aplicativo mostrou-se razoável. Acredita-se que com estes tempos pode-se encontrar boas soluções para outros problemas reais.

Analisando os valores dos parâmetros utilizados para as penalizações, verificou-se

que podem ser ajustados em novos testes com o mesmo cenário ou acrescentado novos cenários, visto que foram atribuídos e ajustados de forma aleatória. Além destes, também pode-se alterar os valores dos parâmetros de tempos e horários para obter novas análises dos resultados gerados. Salienta-se que neste trabalho não foi considerado os horários de troca de motoristas (folgas) e tempo máximo de viagem de uma pessoa dentro do veículo ou na rota, bem como não considerou-se os horários em que o veículo deve abastecer.

Conclui-se o trabalho salientando que foram alcançados os objetivos propostos de forma satisfatória, visto que o aplicativo foi desenvolvido para problemas de coleta e entrega, utilizando o Recozimento Simulado e a formulação matemática descrita. Posteriormente, o aplicativo foi testado e validado para um problema real, onde encontrou-se uma programação dos veículos para a logística apresentada atendendo as requisições do cenário analisado. A função objetivo foi minimizada em todos os testes e o aplicativo mostrou-se robusto e capaz de ser utilizado em outros problemas reais. Enfatiza-se que este trabalho será mais uma contribuição para a área de Pesquisa Operacional que pode servir de referência para outras pesquisas futuras ou continuidade dos estudos.

7.2 Trabalhos Futuros

Como propostas de trabalhos futuros existem inúmeras possibilidades, tanto em relação à formulação matemática e métodos utilizados na pesquisa, quanto em relação ao aplicativo desenvolvido. Pretende-se continuar esta pesquisa fazendo adaptações na formulação e inserindo ou alterando restrições aqui apresentadas para comparação com dados da literatura ou deste trabalho apresentado. Além disso, pode-se:

- Acrescentar restrições que tratem a conservação do trecho da rodovia e o desgaste do veículo, restrições de tempo máximo de permanência do servidor no veículo, do tempo máximo de viagem dos condutores e restrições que indiquem o momento exato em que um veículo deve abastecer e repor o combustível utilizado;
- Utilizar outros métodos, tais como Busca Tabu ou Algoritmo Genético com adaptações nas heurísticas da solução inicial para comparar os resultados;
- Melhorar o procedimento do aplicativo, de forma a reduzir o tempo computacional com possibilidade de utilização de apenas 1 ou 2 estruturas de comparação;

- Modificar a forma de representação das rotas resultantes e a exibição dos resultados que deve enfatizar as informações mais relevantes referente aos custos e rotas geradas;
- Realizar alterações no aplicativo de forma que permita memorizar o resultado de um teste e, posteriormente, executar um novo teste a partir do ponto em que foi salvo o teste anterior. Com esta alteração, pode-se otimizar os testes e análise de resultados;
- Utilizar este aplicativo em outro problema real e fazer comparação dos resultados obtidos;
- Utilizar métodos estatísticos para estimar os valores dos parâmetros das penalizações na função objetivo;
- Propor novos testes, alterando os parâmetros das janelas de tempo e horários, bem como os valores dos custos por pessoa;
- Inserir novas requisições criando outros cenários para realização e análise dos testes.

A partir das sugestões propostas como trabalhos futuros, pretende-se encontrar novos resultados com boas soluções em relação aos testes já realizados e que as novas rotas possibilitem melhorias nos custos do problema proposto neste trabalho.

Referências Bibliográficas

- [1] ANP, Agência Nacional do Petróleo. Disponível em: http://www.anp.gov.br/preco/prc/Resumo_Por_Estado_Index.asp, acessado em 10/07/2012.

- [2] ARAKAKI, R. G. I. **O problema de roteamento de veículos e algumas metaheurísticas**. Monografia para qualificação da Tese de Doutorado do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE. São Paulo, 1998.

- [3] ASSIS, L. P. **Algoritmos para o problema de roteamento de veículos com coleta e entrega simultâneas**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.

- [4] BALL, M.; GOLDEN, B. L.; ASSAD, A.; BODIN, L. D. *Planning for truck fleet size in the presence of a common - Carrier Option*. **Decision Sci**, v. 14, 103-120, 1983.

- [5] BEAN, J. C. *Genetic algorithms and random keys for sequencing and optimization*. **ORSA Journal on Computing**, v. 6(2):154-160, 1994.

- [6] BELTRAMI, E. J.; BODIN, L. D. *Networks and vehicle routing for municipal waste collection*. **Networks**, v. 4, 65-78, 1974.

- [7] BODIN, L. D.; GOLDEN, B. L.; ASSAD, A.; Ball, M. *Routing and scheduling of vehicles and crews: The state of the art. **An International Journal Computers and operations research.*** v. 10 n° 2, p. 63-212, 1983.

- [8] BRASIL. Decreto nº 5.622, de 19 de dezembro de 2005. **Dispõe sobre regulamentações da educação a distância.** Presidência da República, Casa Civil. Brasília, 2005. Disponível em: <http://uab.capes.gov.br/images/stories/downloads/legislacao/decreto5622.pdf>. Acessado em 22/06/12 às 14h06min.

- [9] BRASIL. Decreto nº 5.800, de 08 de junho de 2006. **Dispõe sobre o Sistema Universidade Aberta do Brasil - UAB.** Presidência da República, Casa Civil. Brasília, 2006. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/decreto/d5800.htm, acessado em 22/06/12 às 13h54min.

- [10] BRASILEIRO, L. A.; LACERDA, M.G. Análise do uso de SIG no roteamento dos veículos de coleta de resíduos sólidos domiciliares. **Revista Eng. Sanit. Ambient.**, v.13, São Paulo, 2008.

- [11] CAIRES, L. F. V.; ASSIS, L. P.; ANDRADE, A. V. **Aplicação do método Path-Relinking na resolução do Problema Roteamento de Veículos com Coleta e Entrega Simultâneas.** In: XLII SBPO, Bento Gonçalves, RS, 2010.

- [12] CALIPER, C. **TransCAD Transportation GIS Software. User's Guide Version 3.0 for Windows.** Newton, EUA, 1996.

- [13] CLARK, G.; WRIGHT, J. *Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points*. **Operations Research**, v.12, n°4, p.568-581, 1964.

- [14] CONSELHO UNIVERSITÁRIO (CONSUN). **Aprova a criação da Secretaria de Educação a Distância**. Resolução nº 034, de 07 de dezembro de 2007. Universidade Federal do Rio Grande, Secretaria Geral dos Conselhos Superiores. Rio Grande, 2007. Disponível em: <http://www.conselho.furg.br/converte.php?arquivo=delibera/consun/03407.htm>, acessado em 22/06/12, às 14h27min.

- [15] CORDEAU, J. F. *A branch-and-cut algorithm for the dial-a-ride problem*. **Operations Research**, v. 54, n. 3, p. 573-586, 2006.

- [16] CORMEN, T. H.; LEISERSON, C. E.; RIVEST, R. L.; STEIN, C. **Algoritmos: teoria e prática**. Tradução da 2ª edição americana. Rio de Janeiro, Elsevier. 2002.

- [17] COSTA, C. E. S. **Aplicação de Técnicas de Pesquisa Operacional na determinação de setores de atendimento de uma concessionária de energia**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.

- [18] COSTA, T. A. **Metaheurísticas Híbridas GRASP-Busca Tabu Aplicadas ao Problema de Roteamento de Veículos com Janelas de Tempo**. Dissertação de Mestrado do Curso de Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET. Belo Horizonte, 2005.

- [19] DAER, Departamento Autônomo de Estradas e Rodagem, Estado do Rio Grande do Sul. Disponível em <http://www.daer.rs.gov.br/site/pedagogios_localizacao_

tarifas_pedagio.php>, acessado em 10/11/2011 às 20h.

- [20] DANTZIG, G. B.; RAMSER, J. H. *The truck dispatching problem. **Management Science***, 6:80-91. 1959.

- [21] DASKIN, M. S. *Location, dispatching and routing models for emergency services with stochastic travel times. Ghosh A. and G. Rushton, **Spatial Analysis and Location - Allocation Models**. Van Nostrand Reinhold, Nova York, 1987.*

- [22] EGGLESE, R. W. *Routing road sweepers in a rural area. **Journal of the Operational Research Society***. v. 42(4), 281-288. 1991.

- [23] FARIA, A.; YAMASHITA, M.; TOZI, L. A.; SOUZA, V. J.; BRITO JR, I. *Dial-a-ride Routing System: the study of mathematical approaches used in public transport of people with physical disabilities. In: 12th WCTR. Lisboa - Portugal, 2010.*

- [24] FEO, T.; RESENDE, M. *Greedy randomized adaptive search procedures. **Journal of Global Optimization***, v. 6, 109-133, 1995.

- [25] GLOVER, F. *Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. **Computers and Operations Research***, v.13, 533- 549, 1986.

- [26] GLOVER, F.; LAGUNA, M. *Tabu Search*. Kluwer, Boston, 1997.

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

- [28] GOLDBERG, D. E. *Genetic Algorithms in Search. Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley, Berkeley, 1989.

- [29] GOLDEN, B. L.; MAGNANTI, T. L.; NGUYEN, H. Q. *Implementing vehicle routing algorithms*. **Networks**, v. 7, 113-148, 1977.

- [30] GOLDEN, B. L.; WASIL, E. A. *Computerized vehicle routing in the soft drink industry*. **Operations Research**, 35(1), 1987.

- [31] GOMES, H. A. S. **Utilização da metaheurística simulated annealing no problema de alocação de pessoal em empresas de transporte coletivo por ônibus**. Dissertação de Mestrado do Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2003.

- [32] GONZALEZ, M. **Fundamentos da Tutoria em Educação a Distância**. Avercamp, São Paulo, 2005.

- [33] GONÇALVES, S. M.; STEINER, M. T. A.; ZAMBONI, L. V. S. **Uma metodologia para o problema do roteamento de veículos - um estudo de caso para a distribuição de água mineral**. In: XXXVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa

Operacional. Gramado, RS, 2005.

- [34] HAIDEMANN, H. P. **O problema *dial-a-ride* estático: estudo de caso para o transporte escolar**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

- [35] HALSE, K. ***Modeling and solving complex vehicle routing problems***. *PhD thesis, Institute of Mathematical Statistics and Operations Research, Technical University of Denmark. Denmark*, 1992.

- [36] HEINEN, M. R. Análise e Implementação de Algoritmos para o Roteamento de Veículos. **Anais do IV SIRC/RS**. Santa Maria, 2005.

- [37] HEINEN, M. R.; OSÓRIO, F. S. Algoritmos Genéticos aplicados ao problema de roteamento de veículos. **Revista Hífen**, Volume 30. Uruguaiana, 2006.

- [38] HOLLAND, J. H. ***Adaptation in Natural and Artificial Systems***. *University Michigan Press, Ann Arbor*. Michigan, 1975.

- [39] ILOG, CPLEX 10.0 user's manual. France, 2006. Disponível em: http://home.eng.iastate.edu/~jdm/ee458_2011/CplexLargeUsersManual.pdf, acessado em 14/06/2012.

- [40] IZQUIERDO, V. B. **Uma proposta de especificação formal e fundamentação teórica para *Simulated Annealing***. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.
- [41] JAW, J. J.; ODoni, A. R.; PSARAFTIS, H. N.; WILSON, N. H. M. *A heuristic algorithm for the multi-vehicle advance request dial-a-ride problem with time windows*. ***Transportation Research Part: B***, v. 20, nº 3, pág. 243-257, 1986.
- [42] JIH, W.; KAO, C. Y.; HSU, J. Y. *Using family competition genetic algorithm in pickup and delivery problem with time window constraints*. ***International Symposium on Intelligent Control***. Vancouver, Canada, 2002.
- [43] JÚNIOR, A. C. G.; SOUZA, M. J. F.; MARTINS, A. X. *Simulated Annealing aplicado à resolução do problema de roteamento de veículos com janela de tempo*. ***Revista Transportes***, v. XIII, p. 5 - 20, 2005.
- [44] JÚNIOR, E. M. S. **Estudo de métodos para resolução do problema dinâmico da Coleta e Entrega utilizando Algoritmos Genéticos**. Projeto de Pesquisa do Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Lavras. Minas Gerais, 2003.
- [45] KAISER, M. S. **Aplicação de metaheurística híbrida na resolução do problema *dial-a-ride***. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, UFRJ. Rio de Janeiro, 2009.

- [46] KIRKPATRICK, S. *Optimization by Simulated Annealing*. **Science**, v. 220, N.4598, p.671-680, 1983.

- [47] LAPORTE, G. *The vehicle routing problem: an overview of exact and approximate algorithms*. **European Journal of Operational Research**, v. 59, nº 3, p. 345-358, 1992.

- [48] LIMA, I. X. A. **Algoritmo para problemas de roteamento de veículos com entrega e coleta**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Computação, Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2009.

- [49] LOPES, S. S.; CARDOSO, M. P.; PICCININI, M. S. O Transporte rodoviário de carga e o papel do BNDES. **Revista do BNDES**. v. 14, Rio de Janeiro, 2008.

- [50] LU, Q.; DESSOUKY, M. M. *A new insertion-based construction heuristic for solving the pickup and delivery problem with hard time windows*. **European Journal of Operational Research**. (175:672-687), 2006.

- [51] MARTINS, D.; MORAES, E.; ALVES, J.; NAKARA, R. Problema de Roteamento de Veículo na Cidade de Maceió. In: II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica. João Pessoa, 2007.

- [52] MAURI, G. R. Uma nova abordagem para o problema de roteirização e programação de veículos. Monografia para qualificação da Tese de Doutorado do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, SP, 2006.

- [53] MAURI, G. R.; LORENA, L. A. N. Uma nova abordagem para o problema *dial-a-ride*. **Revista Produção**, v. 19, nº 1, p. 041-054. 2009.
- [54] MONTANÉ, F. A. T. Um algoritmo de Busca Tabu adaptativo aplicado a problemas de roteamento de veículos com pedidos de coleta e entrega. In: XXXVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Goiânia, 2006.
- [55] MONTANÉ, F. A. T.; GALVÃO, R. D. *A tabu search algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery service*. **Computers and Operations Research**. V.33(3), 595-619, 2006.
- [56] MOLE, R. H.; JAMESON, R. S. *A sequential routing-building algorithm employing a generalised savings criterion*. **Opl. Res Q**, v. 27, 503-512, 1976.
- [57] MIN, H. *The multiple vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup points*. **Transportation Research-A**. v. 23A(5), 377-386, 1989.
- [58] NANRY, W. P.; BARNES, W. J. *Solving the pickup and delivery problem with time windows using reactive tabu search*. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 34(2), 107-121, 2000.
- [59] NETTO, P. O. B. **Grafos, Teoria, Modelos, Algoritmos**. Blucher, 4ª edição. São Paulo, 2006.

- [60] OLIVEIRA, H. C. B.; SOUZA, M. M.; ALVARENGA, G. B.; SILVA, R. M. A. Adaptação do Algoritmo Genético no tratamento do problema de Roteamento de Veículos com Janela de Tempo. **INFOCOMP**. UFPA, v. 3, n.º. 2, 2004.
- [61] PARRAGH, S. N.; DOERNER, K. F.; HARTL, R. F. *A survey on pickup and delivery models*. Disponível em: <<http://www.univie.ac.at/bwl/prod/research/surveyPDP/>>, 2006.
- [62] PELIZARO, C. **Avaliação de desempenho do algoritmo de um programa comercial para roteirização de veículos**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia de São Carlos, UFSCAR. São Carlos, 2000.
- [63] PEREIRA, E. C. **Um modelo dinâmico de programação da frota e condutores aplicado ao transporte rodoviário regional de passageiros**. Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC. Florianópolis, 2005.
- [64] PRATA, P. A. **Proposta de um algoritmo para o problema de roteirização do transporte escolar rural**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, UFSCAR. São Carlos, São Paulo, 2009.
- [65] PRESTES, A. N. **Uma análise experimental de abordagens heurísticas aplicadas ao problema do caixeiro viajante**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Sistemas e Computação, UFRN. Natal, Rio Grande do Norte, 2006.

- [66] PSARAFTIS, H. N. *A dynamic programming solution to the single vehicle many-to-many immediate request dial-a-ride problem*. **Transportation Science**, v. 14(2), 130-154, 1980.

- [67] PSARAFTIS, H. N. *An exact algorithm for the single vehicle many-to-many dial-a-ride problem with time windows*. **Transportation Science**, v. 17(3), 351-357, 1983.

- [68] RODRIGUES, P. P. **Proposta de um modelo matemático para o problema dial-a-ride aplicado ao transporte de cadeirantes**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Transportes, UFES. Vitória, 2011.

- [69] RODRIGUES, S. B. **A metaheurística colônia de formigas aplicada a um problema de roteamento de veículos: caso da Itaipu Binacional**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2007.

- [70] RODRIGUES, M. H. P. **Simulated Annealing: uma proposta de resolução para o problema de alocação de berços em terminais de contêineres**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande. Rio Grande, 2012.

- [71] SOARES, G. L. **Algoritmos Genéticos: estudo, novas técnicas e aplicações**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFMG. Belo Horizonte, 1997.

- [72] TAN, K. C.; LEE, L. H.; ZHU, Q. L.; OU, K. *Heuristic methods for vehicle routing problem with time windows. **Artificial Intelligence in Engineering***, v. 15, p. 281-295, 2001.

- [73] TAUFER, F. S. G. **Análise dos operadores de cruzamento do algoritmo genético aplicado ao problema do caixeiro viajante**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, FURG. Rio Grande, 2012.

- [74] TOPCUOGLU, H.; SEVILMIS, C. *Task scheduling with conflicting objectives*. In: Yakhno, T. M., ADVIS, v. 2457 of **Lecture Notes in Computer Science**, p. 346-355. Springer, 2002.

- [75] TORTELLY, A. J.; OCHI, L. S. Um GRASP eficiente para Problemas de Roteamento de uma Frota de Veículos. **TEMA: Tendências em Matemática Aplicada e Computacional**. V.7, nº 1. Rio de Janeiro, 2006.

- [76] TOTH, P.; VIGO, D. *The vehicle routing problem. **Society for Industrial Mathematics***, 1987.

- [77] VURAL, A. V. A. **GA based meta-heuristic for capacited vehicle routing problem with simultaneous pick-up and deliveries**. Master's thesis. Graduate School of Engineering and Natural Sciences. Sabanci University, 2003.

- [78] VIEIRA, H. P. **Metaheurística para a solução de problemas de roteamento de veículos com janela de tempo**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação do Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica,

UNICAMP. Campinas, 2009.

- [79] ZNAMENSKY, A.; CUNHA, C. B. Um modelo para o problema de roteirização e programação do transporte de deficientes. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. **ANPET**, p. 59-62. São Carlos, 1999.

Apêndice A

Tabelas de dados

Tabela A.1: Coordenadas geográficas dos pontos em graus decimais

Pontos	Longitude (eixo x)	Latitude (eixo y)
O	-52,169804	-32,076157
X1	-53,361969	-33,523651
X4	-51,988506	-31,355837
X7	-51,006302	-29,639725
X6	-50,523335	-29,831486
X3	-50,914959	-31,098621
X2	-52,034340	-32,015316
X8	-53,026051	-29,427431
X9	-54,239857	-27,761040
X5	-53,870625	-31,408630
Y1	-52,359165	-31,778126
Y2	-51,831779	-30,884825
Y3	-52,493877	-30,535650
Y4	-52,678070	-31,414600
Y5	-52,851105	-31,170509
Y6	-51,176399	-29,969490
Y7	-52,372986	-30,190653
Y8	-53,391430	-30,584467
Y9	-53,794170	-29,702778
Y10	-52,796108	-29,681173
Y11	-52,448132	-29,688425
Y12	-52,456970	-28,837456
Y13	-52,434998	-28,265682
Y14	-52,962341	-27,928902
Y16	-51,954517	-29,467548
Y15	-51,179810	-29,173746
Y17	-52,903332	-30,008760
Y18	-53,169621	-29,060896
Y19	-52,845097	-28,724464
Y20	-53,594055	-28,675829

Y21	-53,518269	-30,361601
Y22	-53,921478	-28,417692
Y23	-52,742615	-28,301962
Y24	-51,610466	-28,800646
Y25	-51,501160	-29,688053
Y26	-51,144039	-29,688548
Y27	-50,513763	-30,148689
Y28	-51,022568	-30,088552
Y29	-50,321934	-29,897619
Y30	-51,003330	-29,955959

Tabela A.2: Tabela de identificação das arestas com distâncias e tempos

Identificação das arestas	pontos ligados	distância(km)	tempo (horas/min)
1	O - X1	218	3h05min
2	O - X2	25	75min
3	O - Y1	50,6	49min
4	Y1 - X4	73,5	1h1min
5	Y1 - Y4	55,1	51min
6	Y1 - X5	160	1h56min
7	Y4 - X5	148	1h59min
8	Y4 - Y5	31,8	25min
9	X4 - Y5	115	1h39min
10	X4 - Y2	67,6	50min
11	Y2 - Y6	129	1h34min
12	Y2 - Y3	101	1h22min
13	Y3 - Y5	103	1h10min
14	Y8 - Y5	94,1	1h4min
15	Y8 - X5	126	1h26min
16	Y8 - Y21	29,4	20min
17	Y8 - Y17	98	1h17min
18	Y17 - Y21	91,2	1h16min
19	Y21 - Y9	81,4	1h2min
20	Y9 - Y10	101	1h25min
21	Y17 - Y10	50,3	38min
22	Y17 - Y3	102	1h58min
23	Y17 - Y7	77,3	59min
24	Y3 - Y7	50,2	34min
25	Y6 - Y7	123	1h30min
26	Y11 - Y7	59,1	50min
27	Y11 - Y10	36,3	31min
28	Y11 - Y25	99	1h25min
29	Y11 - Y16	58,8	53min
30	Y11 - Y12	138	1h36min
31	Y10 - X8	48,7	43min
32	Y9 - X8	128	1h48min
33	Y9 - Y20	127	1h32min
34	Y18 - Y20	77,5	1h50min
35	X8 - Y18	53	47min
36	Y18 - Y19	59,6	48min
37	Y20 - Y19	91	1h21min
38	Y20 - Y22	48,3	49min
39	Y23 - Y22	130	1h30min
40	X9 - Y22	83,1	1h11min
41	X9 - Y14	154	1h55min
42	Y13 - Y14	74,2	1h14min
43	Y23 - Y14	45,1	36min

44	Y23 - Y13	35,8	28min
45	Y23 - Y19	72,7	1h1min
46	Y12 - Y19	48,9	44min
47	Y12 - Y13	76,7	1h06min
48	Y24 - Y13	117	1h39min
49	Y12 - Y16	97,5	1h18min
50	Y16 - Y25	58,9	49min
51	Y16 - Y15	100	1h30min
52	Y15 - Y24	100	1h30min
53	Y15 - Y26	86,4	1h16min
54	Y26 - Y25	44,3	42min
55	Y6 - Y25	56,8	52min
56	Y26 - Y6	36,4	31min
57	Y26 - X7	15,1	15min
58	X6 - X7	66,3	1h01min
59	X6 - Y6	81,7	1h13min
60	X3 - X2	156	1h56min
61	Y27 - Y29	36,1	55min
62	X3 - Y27	123	1h24min
63	Y6 - Y28	39,2	41min
64	Y27 - Y28	53,3	44min
65	Y29 - X6	24,8	22min
66	X6 - Y30	55,5	49min
67	Y26 - Y30	42	38min
68	Y28 - Y30	16	16min
69	Y6 - Y30	29,2	33min
70	Y29 - Y30	70,2	58min

Tabela A.3: Cadastro dos Servidores

<i>Identificação</i>		
<i>Nome</i>	<i>Setor</i>	<i>Código</i>
<i>Pessoa 1</i>	IMEF	127845
<i>Pessoa 2</i>	IE	136845
<i>Pessoa 3</i>	SEaD	193244
<i>Pessoa 4</i>	C3	117743
<i>Pessoa 5</i>	C3	163041
<i>Pessoa 6</i>	SEaD	197622
<i>Pessoa 7</i>	C3	163497
<i>Pessoa 8</i>	IMEF	175586
<i>Pessoa 9</i>	SEaD	123290
<i>Pessoa 10</i>	IMEF	146744
<i>Pessoa 11</i>	IMEF	198973
<i>Pessoa 12</i>	C3	152738
<i>Pessoa 13</i>	SEaD	171321
<i>Pessoa 14</i>	IE	166466
<i>Pessoa 15</i>	IE	174903
<i>Pessoa 16</i>	ICHI	176530
<i>Pessoa 17</i>	SEaD	158861
<i>Pessoa 18</i>	IMEF	131398
<i>Pessoa 19</i>	IMEF	173299
<i>Pessoa 20</i>	C3	146772

Tabela A.4: Requisições dos Servidores

<i>Requisições</i>										
<i>Identificação</i>		<i>Embarque</i>			<i>Desembarque</i>			<i>Permanência</i>		
<i>Nome</i>		<i>Local</i>	<i>Data</i>	<i>Hora</i>	<i>Local</i>	<i>Data</i>	<i>Hora</i>	<i>Data</i>	<i>Término</i>	
<i>Pessoa 1</i>		SEaD			Três de Maio	sexta	20:00	sábado	12:00	
<i>Pessoa 2</i>		SEaD			Três de Maio	sexta	22:00	sábado	14:00	
<i>Pessoa 3</i>		SEaD			Sobradinho	sábado	11:00	sábado	17:00	
<i>Pessoa 4</i>		Mostardas			Santo Antonio	sábado	13:00	sábado	17:00	
<i>Pessoa 5</i>		SEaD			Sapiranga	sábado	12:00	sábado	18:00	
<i>Pessoa 6</i>		Santo Antonio			SEaD	sábado	13:00	0	0	
<i>Pessoa 7</i>		Sobradinho			SEaD	sábado	15:00	0	0	
<i>Pessoa 8</i>		SEaD			Sapiranga	quinta	19:00	sexta	18:00	
<i>Pessoa 9</i>		Sapiranga			Mostardas	quinta	20:00	sexta	14:00	
<i>Pessoa 10</i>		SEaD			Hulha Negra	sábado	10:00	sábado	15:00	
<i>Pessoa 11</i>		SEaD			Sobradinho	sexta	18:00	sábado	16:00	
<i>Pessoa 12</i>		Mostardas			SJN	sexta	18:00	sexta	21:00	
<i>Pessoa 13</i>		SEaD			Mostardas	sábado	12:00	sábado	18:00	
<i>Pessoa 14</i>		SEaD			Santa Vitoria	sexta	14:00	sexta	18:00	
<i>Pessoa 15</i>		SEaD			São Lourenço	terça	15:00	terça	19:00	
<i>Pessoa 16</i>		SEaD			São Lourenço	sábado	09:00	sábado	14:00	
<i>Pessoa 17</i>		SEaD			Santa Vitoria	sábado	13:00	sábado	18:00	
<i>Pessoa 18</i>		Sapiranga			Mostardas	terça	18:00	quarta	14:00	
<i>Pessoa 19</i>		SEaD			Sobradinho	quinta	11:00	quinta	18:00	
<i>Pessoa 20</i>		SEaD			Hulha Negra	terça	13:00	terça	18:00	

Apêndice B

Resultados dos Testes

Tabela B.1: Resultados do Teste 1

	TESTE 1					
Estruturas	1	2	3	4	5	6
Temp Viagem	87,27	111,02	109,4	87,15	78,15	88,45
Reordenações	526.834	533.110	11.358	11.623	116	3
Realocações	0	23.191	11.273	0	31	2
Trocas	0	31.526	11.257	0	23	2
FO Inicial	7956,71	8770,33	8559,70	10100,41	8949,85	7304,35
FO Final	5209,29	8224,39	8559,70	6786,13	5147,95	7304,35
Refeições	362,50	412,50	512,50	537,50	225,00	400,00
Pernoites	840,00	350,00	700,00	418,25	420,00	559,13
Temp Espera	4.103,33	1.138,00	1.072,67	1.066,00	965,33	602,33
Custo Total	5.687,31	2.701,38	3.071,21	2.647,36	2.161,19	2.209,89
Combustível	381,48	800,88	786,04	625,61	550,86	648,44
Quant Rotas	1	2	2	1	2	2
Percentual FO	65,47%	93,78%	100%	67,19%	57,52%	100,00%
Distância	1734,00	3823,90	3611,20	2843,70	2418,20	3249,20

Tabela B.2: Resultados do Teste 2

	TESTE 2					
Estruturas	1	2	3	4	5	6
Temp Viagem	78,60	117,30	96,40	48,03	67,17	81,22
Reordenações	519.127	521.142	11.388	938.906	441.778	155
Realocações	0	11.434	11.378	216.931	2.152	66
Trocas	0	25.581	11.307	65.906	2.124	37
FO Inicial	26147,23	28127,35	25845,85	30822,21	26440,14	26040,16
FO Final	17385,59	28127,35	25845,85	5257,66	10621,16	11351,69
Refeições	512,50	275,00	450,00	R\$ 375,00	325,00	237,50
Pernoites	630,00	413,00	417,38	210,00	490,00	589,90
Temp Espera	4,00	1.522,67	1.031,33	108,00	841,33	46,67
Custo Total	1.918,66	2.995,69	2.646,63	1.248,20	2.221,47	1.744,87
Combustível	772,16	785,03	747,92	555,20	565,14	870,81
Quant Rotas	1	2	2	2	2	2
Percentual FO	66,49%	100,00%	100%	17,06%	40,17%	43,59%
Distância	3509,80	3802,30	3422,20	2459,30	2568,80	3792,20

Tabela B.3: Resultados do Teste 3

	TESTE 3					
Estruturas	1	2	3	4	5	6
Temp Viagem	78,60	133,48	90,98	51,05	122,05	82,95
Reordenações	518.696	498.085	8	937	14	471
Realocações	0	23.113	9	294	13	0
Trocas	0	27.829	6	205	30	0
FO Inicial	26914,98	47231,04	21466,55	31357,35	37699,13	28465,49
FO Final	17570,99	37486,32	21466,55	9796,89	37699,13	19129,21
Refeições	512,50	437,50	412,50	412,50	525,00	562,50
Pernoites	630,00	490,00	547,17	210,00	420,00	490,00
Temp Espera	4,00	1.847,33	544,33	604,00	1.942,67	0,00
Custo Total	1.918,66	3.585,60	2.276,97	1.876,59	3.610,32	1.879,81
Combustível	772,16	810,77	772,97	650,09	722,65	827,31
Quant Rotas	1	2	2	2	2	1
Percentual FO	65,28%	79,37%	100%	31,24%	100,00%	67,20%
Distância	3509,80	4007,20	3551,80	2765,40	3619,30	3760,50

Tabela B.4: Resultados do Teste 4

	TESTE 4					
Estruturas	1	2	3	4	5	6
Temp Viagem	78,60	87,57	98,87	79,88	122,98	90,35
Reordenações	515.632	520.881	16	1.130	9	13
Realocações	0	11.343	12	392	9	13
Trocas	0	11.365	12	230	15	18
FO Inicial	18166,64	9884,76	15804,78	13506,61	20865,17	13292,99
FO Final	12218,28	9884,76	15804,78	9188,46	20865,17	13292,99
Refeições	450,00	325,00	525,00	312,50	450,00	362,50
Pernoites	630,00	280,00	350,00	280,00	274,46	547,17
Temp Espera	239,00	930,33	1.039,33	272,67	2.018,67	698,33
Custo Total	2.035,61	2.171,79	2.699,53	1.633,32	3.480,12	2.349,45
Combustível	716,61	636,46	785,19	768,16	736,99	741,45
Quant Rotas	1	2	2	2	2	2
Percentual FO	67,26%	100,00%	100%	68,03%	100,00%	100,00%
Distância	3257,30	3106,00	3608,70	3201,40	3691,00	3408,60

Tabela B.5: Resultados do Teste 5

	TESTE 5					
Estruturas	1	2	3	4	5	6
Temp Viagem	86,93	81,73	63,57	122,98	87,57	85,63
Reordenações	521.521	521.186	782	5	585	478
Realocações	0	11.500	229	7	132	153
Trocas	0	11.373	141	7	69	109
FO Inicial	14052,57	14591,09	15545,7	20563,07	11464,02	15537,39
FO Final	14052,57	11519,26	6025,24	20563,07	9183,7	12877,92
Refeições	625,00	R\$ 312,50	225,00	450,00	250,00	525,00
Pernoites	488,25	489,56	420,00	274,46	490,00	490,00
Temp Espera	25,00	569,00	682,67	2.018,67	919,00	182,00
Custo Total	2.012,31	1.954,61	1.819,55	3.564,50	2.241,06	1.967,31
Combustível	874,06	583,55	491,89	821,37	582,06	770,31
Quant Rotas	1	2	2	2	2	2
Percentual FO	100,00%	78,95%	38,76%	100,00%	80,11%	82,88%
Distância	3973,00	2899,80	2302,20	3691,00	2821,30	3861,70

Tabela B.6: Resultados do Teste 6

	TESTE 6					
Estruturas	1	2	3	4	5	6
Temp Viagem	99,35	130,32	48,68	77,50	87,45	100,87
Reordenações	11.467	8.024	909	541	190	2
Realocações	0	7.656	349	109	74	8
Trocas	0	7.601	214	120	79	6
FO Inicial	16587,51	18481,31	13623,83	13121,27	15186,9	15725,11
FO Final	16587,51	18236,87	4734,17	10485,44	9092,3	15725,11
Refeições	412,50	362,50	362,50	300,00	362,50	525,00
Pernoites	728,44	490,00	210,00	277,67	420,00	350,00
Temp Espera	795,33	1.974,67	188,67	170,00	628,00	1.127,33
Custo Total	2.748,29	3.552,41	1.247,57	1.486,12	2.151,10	2.898,31
Combustível	812,02	725,24	486,40	738,46	740,60	895,98
Quant Rotas	1	2	2	2	2	2
Percentual FO	100,00%	98,68%	34,75%	79,91%	59,87%	100,00%
Distância	3691,00	3551,80	2302,20	3619,30	3147,80	3682,70

Tabela B.7: Resultados do Teste 7

	TESTE 7					
Estruturas	1	2	3	4	5	6
Temp Viagem	103,23	122,95	69,27	82,43	70,23	89,60
Reordenações	11.480	532.771	521.360	4.503	1.315	16
Realocações	0	22.761	330.302	3.731	413	12
Trocas	0	30.658	248.330	3.704	250	13
FO Inicial	27127,16	47652,89	13266,42	30089,74	36638,38	23915,97
FO Final	27127,16	29599,15	13266,42	12008,23	8472,33	23915,97
Refeições	562,50	325,00	325,00	450,00	350,00	375,00
Pernoites	819,44	489,13	280,00	490,00	349,13	420,00
Temp Espera	215,33	1.458,67	294,00	246,67	152,00	1.152,67
Custo Total	2.533,46	3.043,60	1.542,03	1.963,21	1.495,84	2.621,25
Combustível	936,19	770,81	643,03	776,55	644,72	673,59
Quant Rotas	1	2	2	2	2	2
Percentual FO	100,00%	62,11%	100,00%	39,91%	23,12%	100,00%
Distância	4255,40	3762,30	2962,50	3390,20	3257,30	2821,30

Tabela B.8: Resultados do Teste 8

	TESTE 8					
Estruturas	1	2	3	4	5	6
Temp Viagem	102,52	94,68	109,40	54,48	93,77	78,72
Reordenações	11.404	469.129	7	467	210	136
Realocações	0	22.745	5	171	51	27
Trocas	0	22.758	6	100	31	25
FO Inicial	36031,5	40451,12	37304,26	36141,65	27439,13	47587,6
FO Final	36031,5	32166,83	37304,26	9137,83	23154,22	22507,49
Refeições	700,00	437,50	512,50	462,50	387,50	375,00
Pernoites	840,00	280,00	700,00	140,00	420,00	210,00
Temp Espera	371,33	1.029,33	1.072,67	108,00	783,33	974,00
Custo Total	2.753,93	2.401,58	3.071,21	1.378,13	2.303,65	2.068,49
Combustível	842,60	654,75	786,04	667,63	712,81	509,49
Quant Rotas	1	2	2	2	2	2
Percentual FO	100,00%	79,52%	100,00%	25,28%	84,38%	47,30%
Distância	3830,00	3261,80	3611,20	2821,30	3581,50	2554,70

Tabela B.9: Resultados do Teste 9

	TESTE 9					
Estruturas	1	2	3	4	5	6
Temp Viagem	127,60	87,65	98,73	68,58	64,42	80,40
Reordenações	11.502	521.706	11.555	2.795	402	1
Realocações	0	11.624	11.548	2.486	150	0
Trocas	0	11.589	16.183	2.523	80	0
FO Inicial	30394,67	13029,81	20769,84	11238,9	22067,01	15974,7
FO Final	30394,67	13029,81	20769,84	7396,77	6378,57	15974,7
Refeições	662,50	325,00	487,50	337,50	300,00	500,00
Pernoites	896,88	280,00	350,00	280,00	280,00	765,92
Temp Espera	1.174,67	935,33	1.127,33	108,00	108,00	165,00
Custo Total	3.654,46	2.176,79	2.736,72	1.381,86	1.318,13	2.192,05
Combustível	920,41	636,46	771,89	656,36	630,13	761,13
Quant Rotas	1	2	2	2	2	1
Percentual FO	100,00%	100,00%	100,00%	65,81%	28,91%	100,00%
Distância	4183,70	3106,00	3541,50	3207,20	2996,50	3459,70

Tabela B.10: Resultados do Teste 10

	TESTE 10					
Estruturas	1	2	3	4	5	6
Temp Viagem	120,08	50,87	89,25	90,82	72,4	85,18
Reordenações	11.761	4.091	354	3	181	173
Realocações	0	3.845	112	4	63	52
Trocas	0	3.861	72	5	35	33
FO Inicial	28932,54	26107,84	20266,51	17054,6	12991,77	29585,05
FO Final	28932,54	6973,91	14160,24	17054,6	12200,87	11842,71
Refeições	550,00	675,00	287,50	387,50	362,50	325,00
Pernoites	543,08	210,00	350,00	630,00	280,00	420,00
Temp Espera	1.400,00	163,33	1.356,00	501,33	642,00	1.026,00
Custo Total	3.256,04	1.719,65	2.554,03	2.262,61	1.891,76	2.476,41
Combustível	762,96	671,31	560,53	743,78	607,26	705,41
Quant Rotas	1	2	2	2	2	2
Percentual FO	100,00%	26,71%	69,87%	100,00%	93,91%	40,03%
Distância	3468,00	3201,40	2655,90	3682,70	2916,70	3549,80

Tabela B.11: Resultados do Teste 11

	TESTE 11					
Estruturas	1	2	3	4	5	6
Temp Viagem	78,60	94,68	63,18	80,75	80,48	101,02
Reordenações	517.952	440.485	3.946	631	364	5
Realocações	0	23.090	3.615	211	0	5
Trocas	0	22.928	3.500	113	0	8
FO Inicial	23585,52	25327,23	29527,74	20937,05	16435,98	21216,95
FO Final	15023,55	19985,47	6284,25	10046,81	16055,76	21216,95
Refeições	487,50	437,50	275,00	312,50	425,00	562,50
Pernoites	630,00	280,00	280,00	483,88	555,92	350,00
Temp Espera	4,00	1.029,33	188,67	738,67	170,00	1.036,00
Custo Total	1.902,46	2.401,58	1.320,11	2.253,82	1.930,05	2.699,39
Combustível	780,96	654,75	576,44	718,78	779,13	750,89
Quant Rotas	1	2	2	2	1	2
Percentual FO	63,70%	78,91%	21,28%	47,99%	97,69%	100,00%
Distância	3549,80	3261,80	2738,20	3619,30	3541,50	3760,50

Tabela B.12: Resultados do Teste 12

	TESTE 12					
Estruturas	1	2	3	4	5	6
Temp Viagem	123,25	106,53	63,27	80,48	87,47	98,73
Reordenações	11.426	7.509	229	107	105	1
Realocações	0	7.477	52	0	0	0
Trocas	0	7.295	40	0	0	0
FO Inicial	33051,49	18103,52	23438,9	23678,28	26826,69	22870,55
FO Final	33051,49	17010,9	6307,97	18377,98	20074,95	22870,55
Refeições	550,00	450,00	212,50	475,00	600,00	487,50
Pernoites	900,38	560,00	316,75	560,00	490,00	350,00
Temp Espera	1.225,33	267,33	28,00	391,00	158,00	1.127,33
Custo Total	3.534,48	2.156,16	1.224,04	2.140,78	2.106,77	2.680,37
Combustível	858,77	878,83	666,79	714,78	858,77	715,54
Quant Rotas	1	2	2	1	1	2
Percentual FO	100,00%	93,96%	26,91%	77,62%	74,83%	100,00%
Distância	3903,50	4192,00	3147,80	3249,00	3903,50	3541,50

Tabela B.13: Resultados do Teste 13

	TESTE 13					
Estruturas	1	2	3	4	5	6
Temp Viagem	127,82	134,43	73,43	81,73	85,67	101,07
Reordenações	11.495	470.375	341	170	53	28
Realocações	0	11.381	131	7	13	0
Trocas	0	11.337	86	4	10	5
FO Inicial	16833,98	17931,59	13638,75	11203,32	10488,94	10735,72
FO Final	16833,98	15703,17	6695,27	9313,67	8517,37	10735,72
Refeições	812,50	450,00	275,00	312,50	350,00	350,00
Pernoites	980,00	560,00	273,58	489,56	557,38	560,00
Temp Espera	1.121,33	1.804,00	345,33	569,00	360,00	716,00
Custo Total	3.843,05	3.638,44	1.578,16	1.954,61	1.967,75	2.373,09
Combustível	929,21	824,44	684,25	583,55	700,37	747,09
Quant Rotas	1	2	2	2	2	2
Percentual FO	100,00%	87,57%	49,09%	83,13%	81,20%	100,00%
Distância	4223,70	4076,70	3257,30	2899,80	3408,60	3462,20

Tabela B.14: Resultados do Teste 14

	TESTE 14					
Estruturas	1	2	3	4	5	6
Temp Viagem	78,60	91,08	70,38	65,35	81,92	156,70
Reordenações	490.246	512.710	244	290	183	162
Realocações	0	3.129	104	72	0	4
Trocas	0	3.131	74	48	0	9
FO Inicial	12668,57	14290,94	12905,56	12120,21	12618,94	18340,27
FO Final	9404,93	7854,92	6413,11	6250,49	10545,66	17664,63
Refeições	400,00	237,50	225,00	237,50	425,00	425,00
Pernoites	840,00	463,75	210,00	560,00	624,90	350,00
Temp Espera	1.077,67	1.243,33	272,67	1.002,67	386,00	2.729,33
Custo Total	2.867,95	2.493,11	1.372,11	2.263,68	2.181,74	4.353,88
Combustível	550,29	548,53	664,45	463,52	745,84	849,55
Quant Rotas	1	2	2	2	1	2
Percentual FO	74,24%	54,96%	49,69%	51,57%	83,57%	96,32%
Distância	2501,30	2670,00	3131,90	2201,00	3390,20	4076,70

Tabela B.15: Resultados do Teste 15

	TESTE 15					
Estruturas	1	2	3	4	5	6
Temp Viagem	78,60	124,43	75,73	87,65	74,18	101,07
Reordenações	515.305	143	225	147	184	96
Realocações	0	1	33	58	58	5
Trocas	0	5	40	34	21	9
FO Inicial	14568,76	14163,86	12728,01	12987,47	7862,59	14030,7
FO Final	10088,78	14163,86	7266,31	8427,35	7247,17	11244,87
Refeições	450,00	325,00	400,00	287,50	325,00	350,00
Pernoites	630,00	699,13	279,13	697,38	350,00	560,00
Temp Espera	239,00	1.336,67	205,33	1.320,67	0,00	716,00
Custo Total	2.035,61	3.177,96	1.626,88	2.886,37	1.322,84	2.351,89
Combustível	716,61	817,16	742,42	580,83	647,84	725,89
Quant Rotas	1	2	2	2	1	2
Percentual FO	69,25%	100,00%	57,09%	64,89%	92,17%	80,14%
Distância	3257,30	3973,00	3509,80	2637,00	3257,30	3462,20

Anexos A

ANEXOS

A.1 Algoritmo de FLOYD

Este algoritmo proposto por Floyd em 1962 é matricial e tem a finalidade de encontrar o caminho de menor custo entre todos os pares de vértices num grafo qualquer, baseado nas n iterações de uma matriz de adjacência D , onde os custos dos caminhos entre os vértices são armazenados (HAIDEMANN, 2007).

Neste algoritmo, trabalha-se com K matrizes de ordem $n \times n$, tal que $K = 1, 2, 3, \dots, n$ sendo cada elemento da matriz obtido pela equação (A.1), onde d_{ij}^k é o caminho entre os vértices i e j na k -ésima matriz de iteração.

$$d_{ij}^k = \min\{d_{ik}^{k-1} + d_{kj}^{k-1}, d_{ij}^{k-1}\} \quad (\text{A.1})$$

Inicialmente, determina-se uma matriz D^0 , cujos valores serão registrados na posição $D^0[i, j]$, se existir o caminho entre os vértices i e j . Se o grafo for não-direcionado, o mesmo custo deverá ser registrado na posição $D^0[j, i]$. Se não houver caminho ligando diretamente os vértices i e j , um valor infinito (∞) é inserido na posição $D^0[i, j]$, especificando que é impossível mover-se diretamente do vértice i para o vértice j (FLOYD, 1962).

A partir disso, o algoritmo constrói iterações sucessivas na matriz de custos D^0 , obtendo $D^1, D^2, \dots, D^{n-1}$ sucessivamente, de modo que na k -ésima iteração, a matriz resultante D^n representa a distância mínima entre todos os outros pares de vértices (PEREIRA, 2005). Este algoritmo pode ser executado pelos seguintes passos:

- Passo 1: Numerar os vértices do grafo de 1 a n ;
- Passo 2: Defina D^0 , tal que $d_{ii} = 0$ para todo $i = 1, 2, \dots, n$, d_{ij}^0 são os valores dos caminhos entre i e j quando existem e, $d_{ij}^0 = \infty$, caso contrário;
- Passo 3: Para cada $k = 1, 2, \dots, n$, determine sucessivamente os elementos da matriz D^k a partir dos elementos de D^{k-1} , utilizando a equação (A.1);

A.2 Recozimento Simulado

O procedimento de como funciona o algoritmo Recozimento Simulado pode ser entendido através do fluxograma da figura (A.1) e implementado utilizando o pseudocódigo a seguir, onde estão definidos os seguintes parâmetros:

- α - representa a razão de resfriamento do processo;
- SA_{max} - é o valor máximo de iterações do processo;
- T_0 - indica a temperatura inicial do procedimento;
- T_c - é a temperatura de congelamento;
- T - representa a temperatura corrente no processo;
- $IterT$ - representa a temperatura numa determinada iteração.

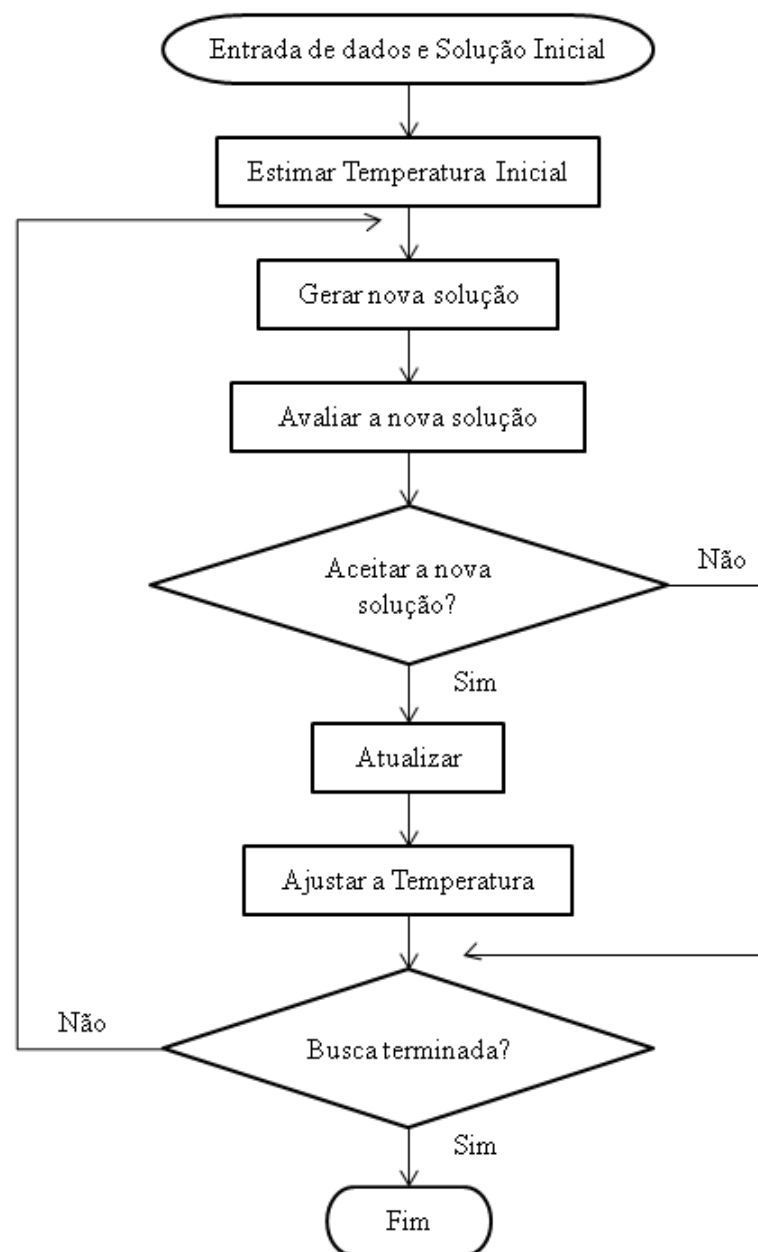


Figura A.1: Esquema do procedimento do Recozimento Simulado, Rodrigues (2012)

Algoritmo 3: Recozimento Simulado

DADOS (α, S_{Amax}, T_0 e T_c) FAÇAGERAR (uma solução S pela heurística de construção das rotas);APLICAR (a heurística de programação de horários em todas as rotas de S); $S^* \leftarrow S$; Melhor solução obtida até então $IterT \leftarrow 0$; Número de iterações na temperatura T $T \leftarrow T_0$; Temperatura corrente**while** ($T > T_c$) **do** **while** ($IterT < S_{Amax}$) **do** $IterT \leftarrow IterT + 1$;

GERAR;

APLICAR;

 $\Delta \leftarrow f(S') - f(S)$; **if** ($\Delta < 0$) **then** $S \leftarrow S'$; **if** ($f(S') < f(S^*)$) **then** $S^* \leftarrow S'$ **end if** **else** TOMAR ($x \in [0, 1]$); **if** ($x < e^{-\Delta/T}$) **then** $S \leftarrow S'$; **end if** **end if** **end while** $T \leftarrow \alpha * T$; $IterT \leftarrow 0$;**end while** $S \leftarrow S^*$;
