



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

DAYSE REGINA BATISTUS

**O PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS COM
RESTRICÇÕES DE JANELAS DE TEMPO: UMA PROPOSTA DE
SOLUÇÃO POR MEIO DA METAHEURÍSTICA
*SCATTER SEARCH***

TESE DE DOUTORADO

Florianópolis
2009

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.

DAYSE REGINA BATISTUS

O PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS COM
RESTRICÇÕES DE JANELAS DE TEMPO: UMA PROPOSTA DE
SOLUÇÃO POR MEIO DA METAHEURÍSTICA
SCATTER SEARCH

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para obtenção do título de Doutora em Engenharia de Produção. Área de concentração: Logística e Transporte.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Fernando Mayerle

Florianópolis
2009

TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Tese

O Problema de Roteirização de Veículos com Restrições de Janelas de Tempo: uma Proposta de Solução por meio da Metaheurística *Scatter Search*

por

Dayse Regina Batistus

Esta tese foi apresentada às 14h30min do dia 15 de dezembro de 2009 como requisito parcial para a obtenção do título de DOUTORA EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, Linha de Pesquisa – Logística e Transporte, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina. A candidata foi argüida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Arinei Carlos Lindbeck Silva
(UFPR)

Prof^a. Dr^a. Maria Teresinha A. Steiner
(UFPR)

Prof. Dr. Antônio Galvão N. Novaes
(UFSC)

Prof^a. Dr^a. Mirian Buss Gonçalves
(UFSC)

Prof. Dr. Antônio Sérgio Coelho
(UFSC)
Presidente

Prof. Dr. Sérgio Fernando Mayerle
(UFSC)
Orientador

Visto da coordenação:

Prof. Dr. Antonio Cezar Borna
Coordenador do PPGEP

À Brenda, Bruna e Matheus, meus
filhos.

AGRADECIMENTOS

Seguramente estes parágrafos não irão contemplar todas as pessoas que fizeram parte dessa fase tão importante de minha formação acadêmica. Portanto, desde já peço desculpas àqueles que não estão presentes entre essas palavras.

Reverencio o Professor Dr. Sérgio Fernando Mayerle pela orientação desta pesquisa, pela dedicação e, sobretudo, pelos momentos de aprendizado.

Agradeço aos professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção da UFSC, em especial aos professores: Dr. Antônio Galvão Novaes, Dr. Carlos Taboada Rodriguez e Dr. João Neiva de Figueiredo, que contribuíram significativamente para meu crescimento intelectual, e por meio deles, eu me reporto a toda a comunidade da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Aos pesquisadores e professores da banca examinadora eu gostaria de externar minha gratidão pela atenção e contribuição dedicadas a este estudo.

Deixo registrado também, o meu reconhecimento à Hobed Rosa, que brilhantemente realizou a implementação do modelo.

Aos colegas Rogério, Marcio e Lindolpho pelo conhecimento compartilhado e experiências trocadas e às amigas Janecler e Elizângela, companheiras de jornada.

À minha família, pelo apoio incondicional e pelo carinho.

Ao meu esposo Ivan Luiz e aos meus filhos Brenda, Bruna e Matheus eu agradeço pelo amor, apoio e compreensão e ao mesmo tempo peço desculpas pela ausência constante.

Agradeço minha mãe Léa, minha irmã Leamari e, principalmente, agradeço à Nelci Silva, por cuidarem de meus filhos com tanto carinho enquanto eu me dedicava aos estudos.

À Rosângela pela colaboração na correção gramatical e organização textual.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Pato Branco, pelo afastamento concedido para a realização do doutorado.

RESUMO

Este estudo apresenta como foco de investigação principal a possibilidade de resolução do Problema de Roteirização de Veículos Coletores de Resíduos Comerciais por meio da utilização da metaheurística *Scatter Search*. São promovidas modificações na referida metaheurística com o propósito de torná-la compatível com as exigências impostas pelo problema abordado. A priori busca-se, a partir de uma adequação da Heurística de Inserção II de Solomon, formar um conjunto de soluções iniciais para o problema. Em seguida, pelo procedimento da *Scatter Search*, algumas dessas soluções são selecionadas e submetidas a processos de melhoria, de agrupamento e de combinação, resultando em soluções de melhor qualidade. Mediante testes computacionais e comparação de resultados com problemas de referência disponibilizados por Kim, Kim e Sahoo (2006b), constatou-se a estabilidade das soluções geradas pela metaheurística, a qual se constitui em uma ferramenta eficiente no tratamento de problemas de pequeno e médio porte.

Palavras-chave: Roteirização de Veículos. *Scatter Search*. Janelas de Tempo.

ABSTRACT

This study has as its major research focus the possibility of solving the Commercial Waste Collection Vehicle Routing Problem through the use of the Scatter Search metaheuristic. Some changes are applied in the referred metaheuristic in order to make it compatible concerning the approached problem. A priori, we try to form an initial set of solutions to the problem, from an adaptation of Solomon's Insertion Heuristic II. Then, some of these solutions are selected by the Scatter Search procedure, and subjected to improvement processes, grouping and combining, resulting in better solutions. Through computational testing and comparison of results with reference problems provided by Kim, Kim and Sahoo (2006b), we could find stability of solutions generated by the metaheuristic, which constitutes an efficient tool in dealing with problems of small and medium proportion.

Keywords: Routing Problem. Scatter Search. Times Windows.

Tudo é possível até que se prove que é impossível. E, mesmo assim, pode ser impossível só por agora.

Pearl S. Buck

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Algoritmo <i>Scatter Search</i>	64
Figura 2 - Sub-rota inicial.....	77
Figura 3 - Inserção de novas paradas à rota.....	78
Figura 4 - Finalização da sub-rota	78
Figura 5 - Remoção da pausa para o almoço.....	79
Figura 6 - Sequência inicial sem parada para almoço	79
Figura 7 - Sequência inicial com parada para almoço	80
Figura 8 - Solução com duas rotas.....	80
Figura 9 - Escolha do aterro mais econômico.....	82
Figura 10 - Tempos de espera e folgas em uma rota.	83
Figura 11 - Tempos de espera e folgas em uma rota após ajuste de saída da garagem.....	83
Figura 12 - Conjunto de referência.....	84
Figura 13 - Soluções pertencentes ao conjunto de referência.....	85
Figura 14 - Soluções a serem combinadas.....	86
Figura 15 - Exemplo de construção da matriz de combinação.	87
Figura 16 - Algoritmo da <i>Scatter Search</i>	91
Figura 17 - Esquema da metaheurística <i>Scatter Search</i>	92
Figura 18 - Rota gerada para o TSP (48 paradas).....	104
Figura 19 - Rota gerada para TSP (100 paradas).....	105
Figura 20 - Primeira sub-rota gerada para VRP (48 paradas).....	106
Figura 21 - Segunda sub-rota gerada para VRP (48 paradas).....	107
Figura 22 - Terceira sub-rota gerada para VRP (48 paradas).	108
Figura 23 - Rota completa gerada para VRP (48 paradas).	109
Figura 24 – Solução obtida para o problema de 102 paradas.	112
Figura 25 - Solução obtida para o problema de 277 paradas.....	113

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características dos Problemas de Roteirização e Programação. (continua).....	23
Quadro 2 - Síntese dos trabalhos mais relevantes reportados no segundo capítulo e que envolvem restrições de janelas de tempo.....	32
Quadro 3 – Soluções a Combinar.	70
Quadro 4 – Valores selecionados para os parâmetros.....	88
Quadro 5 – Comparação entre método proposto e problemas de referência	96

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Escolha da parada semente: problema com 102 paradas regulares.....	94
Gráfico 2 - Escolha da parada semente: problema com 444 paradas regulares.....	94
Gráfico 3 - Escolha do valor de α_1 e α_2 : problema com 102 paradas regulares.	95
Gráfico 4 - Escolha do valor de α_1 : problema com 444 paradas regulares.....	96
Gráfico 5 - Escolha do valor de α_1 : problema com 804 paradas regulares.....	96
Gráfico 6 - Escolha do valor de λ : problema com 102 paradas regulares.....	97
Gráfico 7 - Escolha do valor de λ : problema com 444 paradas regulares.....	98
Gráfico 8 - Escolha do valor de λ : problema com 804 paradas regulares.....	98
Gráfico 9 - Variação no tamanho do conjunto de soluções diversas: problema com 102 paradas regulares.....	99
Gráfico 10 - Variação no tamanho do conjunto de soluções diversas: problema com 444	100
Gráfico 11 - Atualização do conjunto de referência: problema com 102 paradas regulares.....	101
Gráfico 12 - Atualização do conjunto de referência: problema com 444 paradas regulares.	101

LISTA DE ABREVIATURAS

AG	Algoritmos Genéticos
ALNS	<i>Adaptive Large Neighborhood Search</i> (Busca Adaptativa de Grande Vizinhança)
BT	Busca Tabu
CNT	Confederação Nacional de Transportes
CPP	<i>Chinese Postman's Problem</i> (Problema do Carteiro Chinês)
CVRP	<i>Capacitated Vehicle Routing Problem</i> (Problema de Roteirização de Veículos Capacitado)
EFBO	<i>Enumeration-then-of-Optimization</i> (Enumeração-Seguida-de-Otimização)
GIS	<i>Geographic Information System</i> (Sistema de Informação Geográfica)
HFVRPTWSD	<i>Problem of Vehicle Routing with Times Windows, Heterogeneous Fleet and Deliveries Fraction</i> (Problema de Roteirização de Veículos com Janelas de Tempo, Frota Heterogênea e Entregas Fracionadas)
MDVRP	<i>Multi-Depot Vehicle Routing Problem</i> (Problema de Roteirização de Veículos com Múltiplos Depósitos)
MDVSPTW	<i>Multi-Depot Vehicle Scheduling Problem with Time Windows</i> (Problema de Dimensionamento de Veículos com Janelas de Tempo e Múltiplos Depósitos)
m-PDPSTW	<i>Multi-ship Pickup and Delivery Problem with Soft Time Windows</i> (Problema de Coleta e Entrega de Despachos Múltiplos com Janelas de Tempo Flexíveis)
m-PDPTW	<i>Problem of Pickup and Delivery with Vehicles Multiple and Time Windows</i> (Problema de Coleta e Entrega com Múltiplos Veículos e Janelas de Tempo)
MSLS	<i>Heuristic Search Local Multi-start</i> (Heurística de Busca Local Multi-início)
OD	Origem Destino
OVRP	<i>Open Vehicle Routing Problem</i> (Problema de Roteirização de Veículos Aberto)
PDPTW	<i>Problem Collection and Delivery with Time</i>

	<i>Windows</i> (Problema de Coleta e Entrega com Janelas de Tempo)
RNETS	<i>Route-neighborhood-based two-stage</i> (Meta-heurística de dois Estágios Baseada em Rotas de Vizinhança)
SA	<i>Simulated Annealing</i> (Têmpera Simulada)
SDVRP	<i>Site-dependent Vehicle Routing Problem</i> (Problema de Roteirização de Veículos com Dependência de Local)
SEDU	Secretaria Especial de Desenvolvimento Urbano da Presidência da República
SS	<i>Scatter Search</i>
TSA	<i>Simulated Annealing</i> com Busca Tabu Embutida
TSP	<i>Traveling Salesman Problem</i> (Problema do Caixeiro Viajante)
UBSP	<i>Urban bus Scheduling Problem</i> (Problemas de Dimensionamento de Ônibus Urbanos)
VRP	<i>Vehicle Routing Problem</i> (Problema de Roteirização de Veículos)
VRPSTW	<i>Problem of Routing and Scheduling of Vehicles with Restricted Soft Time Windows</i> (Problema de Roteirização e Programação de Veículos com Restrição de Janela de Tempo Flexíveis)
VRPTW	<i>Vehicle Routing Problem with Time Windows</i> (Problema de Roteirização de Veículos com Restrições de Janelas de Tempo)
VRPTWSD	<i>Problem Vehicle Routing with Time Windows and Split Deliveries</i> (Problema de Roteirização de Veículos com Janelas de Tempo e Entregas Fracionadas)

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	17
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	17
1.2 OBJETIVOS.....	18
1.3 RELEVÂNCIA DO TEMA E CONTRIBUIÇÕES	19
1.4 APLICAÇÕES	21
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	21
CAPÍTULO II	22
2 TAXONOMIA DOS PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS E TRABALHOS CORRELATOS	22
2.1 CLASSIFICAÇÃO DOS PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS	22
2.2 PROBLEMAS CLÁSSICOS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS	24
2.2.1 Extensões ao Problema de Roteirização de Veículos	25
2.2.2 Problema de Roteirização (e Programação) de Veículos com Janelas de Tempo – VRPTW.....	26
2.3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA PARA O VRPTW.....	27
2.4 TRABALHOS CORRELATOS.....	30
2.4.1 Métodos Exatos	30
2.4.2 Métodos Heurísticos de Construção e de Melhoria de Rotas	32
2.4.3 Metaheurísticas.....	38
2.5 CONTRIBUIÇÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DO VRPTW	53
CAPÍTULO III	39
3 ESTRATÉGIAS DE SOLUÇÃO EM PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS COM JANELAS DE TEMPO	39
3.1 ABORDAGENS DE SOLUÇÃO.....	55
3.2 MÉTODOS A SEREM IMPLEMENTADOS	56
3.2.1 Heurística de Inserção Sequencial II de Solomon	56

3.2.2	Metaheurística Scatter Search.....	58
3.2.2.1	Origem e evolução.....	58
3.2.2.2	A <i>Scatter Search</i> aplicada a problemas de roteirização de veículos.....	60
3.2.2.3	Descrição do método <i>Scatter Search</i>	62
CAPÍTULO IV		66
4	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	66
4.1	DESCRIÇÃO OPERACIONAL DO PROBLEMA	66
4.1.1	Características do Problema	67
4.2	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	68
4.3	COMPLEXIDADE DO PROBLEMA E ESTRATÉGIAS DE SOLUÇÃO.....	75
CAPÍTULO V.....		76
5	IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO UTILIZADO.....	76
5.1	ADAPTAÇÃO DA HEURÍSTICA DE INSERÇÃO SEQUENCIAL II DE SOLOMON.....	76
5.2	METAHEURÍSTICA <i>SCATTER SEARCH</i>	81
6	ANÁLISE DOS RESULTADOS	93
6.1	CALIBRAÇÃO DE PARÂMETROS	93
6.2	ANÁLISE PARA O TSP	104
6.3	ANÁLISE PARA O VRP.....	106
6.4	ANÁLISE PARA O VRPTW.....	110
CAPÍTULO VII.....		114
7	CONCLUSÕES	114
7.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	114
7.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	115
REFERÊNCIAS		117
APÊNDICE		111

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Ao se fazer alusão aos modernos conceitos do *Supply Chain Management* (Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos), depara-se com as atividades logísticas, as quais ganharam conotação estratégica ímpar dentro desse contexto, contribuindo significativamente para a conquista de novos mercados, para a melhoria da competitividade e para o aumento do market share das empresas participantes da cadeia de suprimentos (NOVAES, 2007). Nesse cenário, encontra-se inserida a Distribuição Física de Produtos, cujo desempenho passa a ser de vital importância uma vez que, entre outros fatores, a redução nos custos relacionados ao transporte das mercadorias transacionadas, bem como a eficiência na prestação deste serviço, proporcionam melhores condições de competitividade. O fato acima mencionado é evidenciado na afirmação de Lambert, Stock e Vantine (1998): “O transporte é uma das áreas mais importantes do gerenciamento da logística, devido ao seu impacto nos níveis de serviço ao cliente e na estrutura de custo da empresa”.

Embora essa idéia encontre-se consolidada entre os estudiosos da área, no Brasil, país de dimensões continentais e que se utiliza essencialmente do modal rodoviário, os custos de distribuição e de logística encontram-se muito elevados, fazendo com que os produtos cheguem ao destino com preços pouco competitivos. Isso impede que se possa aumentar, de forma significativa, as exportações; fato que tornaria o país mais importante, em termos de participação econômica, no cenário global (RODRIGUES, 2003).

De fato, a existência de graves problemas estruturais do setor de transportes no Brasil, segundo pesquisa realizada em 2002 pela Confederação Nacional de Transportes – CNT (2002), somam, anualmente, dezenas de bilhões de reais. Entre esses problemas, encontram-se inclusas as ineficiências operacionais e energéticas. Esses

dados ressaltam o impacto do custo de transporte, que impede, por vezes, que as empresas do setor ofereçam serviços de maior confiabilidade.

Outrossim, considerando que toda estratégia comercial deve contemplar o fator economicidade e ganhos em competitividade, e que as operações logísticas no setor de transportes têm despendido um grande volume de recursos, muitas pesquisas, em âmbito mundial, têm sido direcionadas ao desenvolvimento de modelos de otimização aplicados ao problema de roteirização de veículos – VRP (*Vehicle routing problem*), com o intuito de reduzir custos.

Uma das extensões do VRP diz respeito ao problema de roteirização de veículos com restrições de janelas de tempo – VRPTW (*vehicle routing problem with time windows*), o qual é o objeto de estudo desta tese. Esse problema, além de se constituir em uma oportunidade real de redução de custos, já que tem um impacto econômico considerável no sistema logístico, vem sendo extensivamente estudado pela comunidade da área de Pesquisa Operacional devido ao fato de ser um dos mais difíceis da otimização combinatória (ALVARENGA, MATEUS e TOMI, 2007), o que representa, conseqüentemente, um grande desafio.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho estabelece como objetivo principal a determinação dos roteiros a serem seguidos pelos veículos coletores de resíduo comercial, de forma a minimizar o número de veículos e o tempo de viagem destes, em uma solução, levando em consideração a existência de múltiplos locais de descarga e pausa para o almoço dos motoristas por meio da metaheurística *Scatter Search*.

Para o alcance desse objetivo principal, os seguintes objetivos específicos serão considerados no desenvolvimento desse trabalho:

- i. Equacionar um modelo matemático que expresse a Função Objetivo almejada, bem como as restrições impostas ao problema.
- ii. Desenvolver uma nova estratégia de solução para o problema de roteirização de veículos coletores de resíduo comercial com janelas de tempo, múltiplas áreas de descarga e pausa para o almoço do motorista, por meio da implementação da metaheurística *Scatter Search*.

- iii. Desenvolver um conjunto de soluções iniciais para a metaheurística *Scatter Search*, a partir da adaptação da Heurística de Inserção Sequencial Estendida de Kim, Kim e Sahoo (2006a).
- iv. Avaliar a viabilidade da estratégia de solução e o desempenho do algoritmo proposto mediante: a) alteração de alguns de seus dados de entrada, seguidos de testes computacionais exaustivos com o intuito de verificar a estabilidade das soluções fornecidas pela metaheurística; b) resolução de um conjunto de problemas de referência disponibilizados por Kim, Kim e Sahoo (2006b) e posterior comparação de resultados com os obtidos pela adaptação da Heurística de Inserção Sequencial II de Solomon.

1.3 RELEVÂNCIA DO TEMA E CONTRIBUIÇÕES

A relevância deste estudo se fundamenta em quatro aspectos essenciais. O primeiro deles encontra-se atrelado ao fator econômico, visto que por razões já mencionadas no decorrer do presente capítulo, os problemas de distribuição de bens e serviços estão absorvendo um volume maior de recursos e, na maioria dos casos, os custos operacionais associados aos veículos se configuram entre os mais significativos de todo o processo de distribuição. A título de exemplificação, faz-se uso de dados obtidos no Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos, elaborado pela Secretaria Especial de Desenvolvimento Urbano da Presidência da República – SEDU (2001). O Manual sugere que em uma cidade, cuja população fica em torno de 50.000 habitantes, o custo atrelado ao sistema de limpeza urbana despenderia de 9% a 12% do orçamento total do município, sendo que, deste montante, grande parte, aproximadamente 46%, seria devido ao custo dos veículos coletores com motoristas – o que ressalta a importância de se fazer uso de técnicas apropriadas para a roteirização desses veículos.

O segundo aspecto relaciona-se à relevância do problema do ponto de vista teórico. O problema de roteirização de veículos com janelas de tempo é, por si só, NP-hard (TAILLARD, 1997; LIU, 1999a; LI, 2003; HOMBERGER E GEHRING, 2005; CALVETE, 2007; LI, 2008), isto é, possui ordem de complexidade exponencial, não permitindo que seu espaço de busca seja totalmente explorado em tempo hábil. Esse contexto é agravado quando se trata da roteirização de veículos coletores de resíduos comerciais, uma vez que os mesmos

apresentam peculiaridades tais como: necessidade de múltiplas viagens às áreas de descarga, escolha adequada de uma entre as várias áreas destinadas à descarga e também, obrigatoriedade de pausa para o almoço dos motoristas e da equipe de guarnição. Imposições como essas, aumentam ainda mais a complexidade no tratamento de um VRPTW, se configurando em uma oportunidade para se testar novos caminhos em busca de uma solução. Nesse sentido, coloca-se a adaptação de uma metaheurística ainda pouco utilizada em problemas de roteirização, a *Scatter Search*, como forma de contribuir para o estado da arte do referido problema, bem como, da própria metaheurística.

O terceiro aspecto vincula-se ao fato de que, na prática, muitas das operações de coleta e entrega de mercadorias encontram-se sujeitas a restrições de janelas de tempo, impostas principalmente nos grandes centros comerciais, nos quais a circulação de veículos de maior porte fica restrita a horários bem específicos. Essa situação tende a dificultar a roteirização dos veículos envolvidos nas atividades de entrega e coleta, exigindo um maior aporte logístico para a execução do serviço.

O quarto aspecto encontra-se inserido no contexto da atividade de coleta de resíduos propriamente dita, realizada atualmente no Brasil sem diretrizes bem definidas. Tendo apenas um projeto de lei, ainda em tramitação, de autoria do Deputado Federal Eduardo Valverde, que cria a profissão de coletor, catador e reciclador de resíduo urbano. Embora o artigo 5º, do capítulo II do Projeto de Lei, estabeleça aos trabalhadores ligados à coleta de resíduos uma jornada de trabalho máxima de 6 horas, entre outros, não contempla especificações de número máximo de volume coletados ao dia por um trabalhador da guarnição, tampouco do número máximo de paradas diárias que um veículo/motorista pode atender. Inclusões de especificações como essas, passíveis de serem tratadas em problemas de roteirização, poderiam ser vistas como um subsídio para a prevenção do fator de risco ergonômico, associado à sobrecarga da função osteo-muscular e da coluna vertebral dessa classe de trabalhadores, já que, em pesquisa realizada por Velosso, Santos e Angel (1997), evidenciou-se que 28,3% dos acidentes diretamente associados ao processo de trabalho de uma equipe de guarnição envolvida na coleta de resíduos da cidade do Rio de Janeiro, encontravam-se relacionados ao esforço excessivo.

1.4 APLICAÇÕES

O tratamento do problema de roteirização de veículos com janelas de tempo tem emergido como um elemento-chave em muitos sistemas de logística e distribuição e vem recebendo considerável atenção nos últimos anos devido a suas inúmeras aplicações no mundo real, incluindo entregas bancárias, entregas postais, coleta de resíduo industrial, entregas de alimentos, entregas de gás e petróleo, serviço de transporte dial-a-ride, programação e roteirização de ônibus escolares, serviço de patrulha de segurança, e em vários outros problemas que podem ser formulados como tal, (SOLOMON, 1987; TAILLARD et al., 1997; RUSSEL E CHIANG, 2006).

Alguns trabalhos envolvendo aplicações da roteirização de veículos com janelas de tempo encontram-se detalhados no segundo capítulo deste trabalho.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho encontra-se dividido em sete capítulos, sendo que o primeiro é responsável pela apresentação do tema abordado nesta pesquisa.

O segundo capítulo apresenta o problema de roteirização de veículos e mostra como o problema de roteirização de veículos com janelas de tempo, foco deste estudo, encontra-se inserido nesse contexto. Apresenta-se ainda, neste capítulo, o estado da arte do VRPTW, bem como sua formulação matemática.

O terceiro capítulo ocupa-se das principais estratégias de solução implementadas em problemas de roteirização de veículos com janelas de tempo e também apresenta minuciosamente as técnicas a serem utilizadas na resolução do problema.

No quarto capítulo, apresenta-se a descrição operacional do problema abordado no presente trabalho, sua formulação matemática, sua complexidade e a proposta de solução para o mesmo.

No quinto capítulo, encontra-se o detalhamento dos algoritmos implementados para a resolução do problema abordado.

A análise de resultados é efetivada no sexto capítulo. No sétimo, são delineadas as considerações finais e elencadas sugestões para futuros trabalhos.

CAPÍTULO II

2 TAXONOMIA DOS PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS E TRABALHOS CORRELATOS

O termo roteirização (*routing*) é utilizado para descrever o processo através do qual se definem rotas para m veículos, de forma a minimizar o custo total. Em cada uma dessas rotas, que tem como ponto de origem e ponto de destino um depósito, são impostas restrições: cada cliente é visitado exatamente uma vez; a demanda total de cada rota não excede a capacidade do veículo e a duração de qualquer rota não ultrapassa um tempo máximo pré-estabelecido.

Ao se fazer referência aos problemas de roteirização de veículos, observa-se que eles diferenciam-se entre si no que diz respeito ao tipo de restrições, ao tipo de função objetivo, ao tipo de frota disponibilizada, ao tipo de carga envolvida no processo, à operação realizada, à localização dos clientes, entre outros. Como se pode observar, são inúmeros os fatores que podem influenciar esse tipo de problema, o que evidencia a necessidade de uma classificação adequada dos mesmos, de forma a permitir a escolha de uma estratégia de solução concisa, o que poderá ser concretizado mediante o destaque dos aspectos mais relevantes relacionados ao problema em questão.

2.1 CLASSIFICAÇÃO DOS PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS

Uma das classificações mais importantes é, de acordo com Cunha (2000), a proposta por Bodin et al. (1983), a qual encontra-se estruturada em função das restrições vinculadas aos aspectos temporais dos problemas de roteirização de veículos e apresenta a seguinte divisão:

- Problemas de roteirização pura: são aqueles nos quais condicionantes temporais não são considerados na definição de roteiros e das seqüências de atendimento (coletas ou entregas). Nesse tipo de problema, considera-se apenas os aspectos espaciais dos pontos a serem atendidos.

- Problemas de programação de veículos: são aqueles nos quais se considera tanto os condicionantes espaciais quanto os temporais para a definição de roteiros e seqüências de atendimento.
- Problemas combinados de roteirização e programação: de acordo com Bodin et al. (1983), a maioria destes problemas ocorrem mediante restrições de janelas de tempo (intervalo de tempo pré-especificado dentro do qual o serviço precisa iniciar) e restrições de precedência de tarefas (a coleta deve ser realizada antes da entrega e precisa, necessariamente, ser realizada pelo mesmo veículo).

Além da divisão dos problemas dentro das três classes acima explicitadas, Bodin et al. (1983) apresentam uma lista elencando as principais características dos problemas de roteirização e programação de veículos, a qual pode ser utilizada para facilitar a classificação dos problemas de roteirização (Quadro 1).

Características	Opções possíveis
Tamanho da frota disponibilizada	Um veículo Muitos veículos
Tipo da frota disponibilizada	Homogênea Heterogênea Veículos especiais
Quantidade de depósitos	Depósito único Múltiplos depósitos
Natureza das demandas	Demanda determinística Demanda estocástica Atendimento parcial da demanda disponível.
Localização das demandas	Nós Arcos Mistas
Estrutura da rede	Não-direcionada Direcionada Mista Euclidiana
Restrições de capacidade dos veículos	Imposta (todas iguais) Imposta (veículos de diferentes capacidades) Não imposta (capacidade ilimitada)

Quadro 1 - Características dos Problemas de Roteirização e Programação. (continua)

Características	Opções possíveis
Tempo máximo da rota	Imposto (o mesmo para todas as rotas) Imposto (específico para cada rota) Não imposto
Operação	Somente coleta Somente entrega Mista (coleta e entrega) Entrega fracionada
Custos	Variáveis ou custos de roteirização Custos de aquisição dos veículos ou custos fixos de operação Custo de terceirização do serviço (por não atender a demanda)
Objetivos	Minimizar custo total da rota Minimizar o somatório dos custos fixos e variáveis Minimizar o número de veículos necessários Maximizar a função utilidade baseada no nível de serviço Maximizar a função utilidade baseada nas prioridades dos clientes

Quadro 1 - Características dos Problemas de Roteirização e Programação. (conclusão)
FONTE: Adaptado de Bodin et al (1983), p 73.

2.2 PROBLEMAS CLÁSSICOS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS

O primeiro problema de roteirização a ser estudado foi o Caixeiro Viajante – TSP (*Traveling salesman problem*). O TSP é um dos mais tradicionais e conhecidos problemas de cobertura de nós e tem por finalidade encontrar um caminho que minimize a distância total a ser percorrida por um caixeiro viajante ao visitar um conjunto de n cidades (nós) e voltar a sua cidade de origem, passando uma única vez em cada cidade (LARSON E ODONI, 1981; CUNHA, 2000).

Outro problema bastante relevante dentro da roteirização é o Problema do Carteiro Chinês – CPP (*Chinese postman's problem*), o qual consiste em determinar um circuito de custo mínimo que cubra

todos os arcos de um grafo partindo-se de um único depósito e retornando ao mesmo ao final da conclusão do circuito.

O Problema do Caixeiro Viajante e o Problema do Carteiro Chinês estabelecem duas classes bem conhecidas dos problemas de roteirização e, com raras exceções, todos os problemas já formulados nessas duas classes são NP-completos (KARP, 1972; LARSON E ODONI, 1981). Esta condição impõe a utilização de heurísticas e/ou metaheurísticas para o tratamento de problemas com maior porte.

Além do TSP e do CPP existem outras formulações clássicas que também constituem problemas básicos de roteirização e programação de veículos, os quais se encontram descritos a seguir:

- Problema de Roteirização com Arcos Capacitado (*Capacitated arc routing problem*): é uma extensão do Problema do Carteiro Chinês, em que a cada arco encontra-se associada uma demanda.
- Problema Geral de Roteirização: é uma generalização do CPP e do TSP. O objetivo é encontrar uma rota de custo mínimo que cubra um certo subconjunto de arcos e de nós do grafo.
- Problema de Roteirização de Veículos (*Vehicle routing problem – VRP*): é uma generalização do TSP. Seu objetivo é encontrar um conjunto de rotas, com o menor custo possível, iniciando e terminando em um depósito, atendendo a todas as demandas e respeitando a capacidade dos veículos.
- Problema de Roteirização de Veículos com Múltiplos Depósitos (*Multi-depot vehicle routing problem*): é uma generalização do problema clássico de roteirização. Nele, existe mais que um depósito; deve-se formar um conjunto de rotas que cubra todos os nós, cada rota tendo início a partir de um dos depósitos, com o objetivo de minimizar o custo total das rotas, respeitando-se as restrições de capacidade.

2.2.1 Extensões ao Problema de Roteirização de Veículos

Ao longo do desenvolvimento histórico dos Problemas de Roteirização de Veículos, muitas extensões dos problemas básicos foram originadas a partir da inclusão de restrições adicionais, da relaxação de outras, etc., com o intuito de promover uma maior aproximação dos problemas de roteirização com as aplicações reais. Algumas destas extensões encontram-se elencadas a seguir:

- Problema de roteirização de veículos com depósitos intermediários (*Vehicle routing problems with intermediate facilities*).
- Problema de roteirização de veículos com entregas fracionadas (*Vehicle routing problem with split deliveries*).
- Problema de roteirização de veículos com frota heterogênea fixa (*Heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem*).
- Problema de dimensionamento e roteirização de uma frota de veículos heterogênea (*Fleet size and mix vehicle routing problem*).
- Problema de coleta e entrega (*Pickup and delivery problem*).
- Problema de roteirização (e programação) de veículos com janelas de tempo (*Vehicle routing, and scheduling, problem with time windows – VRPTW*).

O VRPTW encontra-se descrito de forma detalhada na seqüência deste trabalho uma vez que o estudo deste problema é o cerne dessa tese.

2.2.2 Problema de Roteirização (e Programação) de Veículos com Janelas de Tempo – VRPTW

O problema de roteirização de veículos com janelas de tempo é um bem conhecido e complexo problema combinatorial, que tem sido objeto de intensivas pesquisas desde os anos 1980 (LAU, SIM E TEO, 2003; ALVARENGA, MATEUS E TOMI, 2007).

Conforme exposto anteriormente, o VRPTW é uma generalização do VRP com restrições adicionais – as chamadas janelas de tempo. Em síntese, estas janelas consistem em atender as necessidades dos clientes em termos de horário de realização do serviço. Na formulação do problema, que considera o intervalo de tempo $[a_i, b_i]$ dentro do qual o cliente deverá ter seu atendimento iniciado para que a solução seja factível, diz-se que a janela de tempo é rígida (*hard*). Caso esse intervalo possa ser violado, ou seja, caso o atendimento inicie depois do instante b_i , sob a imposição de penalidades, tem-se as chamadas janelas de tempo flexíveis (*soft*). Adicionalmente, no VRPTW, a duração de qualquer rota (tempo de serviço mais tempo de viagem) não pode exceder um pré-determinado limite de duração da rota.

Na presença de janelas de tempo, o custo total de roteirização e programação incluem não somente a distância total de viagem, mas

também o custo do tempo de espera incorrido quando um veículo chega à localização do cliente demasiadamente cedo, ou seja, antes do instante a_i , ou ainda, custo do tempo necessário para a execução do serviço (coleta e entrega por exemplo).

No que diz respeito aos objetivos do VRPTW, estes são variados, dependendo de cada aplicação. Eles podem considerar a minimização dos custos de viagem, do número de veículos utilizados, do tempo de viagem, das penalidades por atrasos (no caso de janelas de tempo flexíveis), maximizar o número de clientes atendidos, ou ainda, uma abordagem pode ser feita utilizando-se múltiplos objetivos.

Descreve-se, a seguir, uma formulação matemática para o VRPTW, apresentada por Larsen (2001).

2.3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA PARA O VRPTW

A formulação matemática para o VRPTW, encontrada em Larsen, (2001), é elucidada a seguir.

Considera-se uma frota de veículos homogêneos, denotada por $V = 1, 2, \dots, m$, a qual necessita realizar serviços de entregas em uma determinada região. Um conjunto de clientes que se encontram geograficamente dispersos dentro desta mesma região e que precisam ser atendidos, denotado por C , que juntamente com dois outros pontos, o ponto 0 e o ponto $n+1$, (que representam respectivamente, a saída e o retorno ao depósito onde a frota permanece estacionada após a conclusão do serviço), formam o conjunto de vértices, denotado por $N = 0, 1, \dots, n+1$, que compõem um grafo direcionado $G = (N, A)$.

O conjunto de arcos (denotado por A) que compõe o grafo G , representa as conexões entre o depósito e os clientes e entre os próprios clientes, sendo que nenhum arco termina no vértice 0, assim como nenhum arco inicia no vértice $n+1$. A cada arco (i, j) , com $i \neq j$, associa-se um custo c_{ij} e um tempo t_{ij} , que pode incluir o tempo de serviço ao cliente i , e que representam, respectivamente, a distância e o tempo despendidos no deslocamento de i até j , incluindo o atendimento de i .

Cada veículo pertencente à frota possui uma capacidade de carga q e cada cliente i encontra-se associado a uma demanda d_i e a uma janela de tempo $[a_i, b_i]$. Esta janela de tempo estabelece o intervalo no qual o serviço ao cliente precisa ser iniciado. Caso a chegada do veículo ao cliente i se dê antes do instante a_i , o veículo precisará esperar para

iniciar o serviço. No entanto, não é permitido ao veículo chegar ao respectivo cliente depois do instante b_i , já que, neste caso, haveria uma violação da janela de tempo.

Os vértices que representam os depósitos também estão vinculados a uma janela de tempo $[a_0, b_{n+1}]$, supostamente iguais, chamadas de horizonte de programação. Os veículos não estão autorizados a sair do depósito antes de a_0 , tão pouco retornar depois de b_{n+1} .

No modelo estabelecido por Larsen, assume-se que q, a_i, b_i, d_i, c_{ij} são inteiros não-negativos; entretanto, a razão pela qual os respectivos valores devam ser inteiros não foi colocada pelo autor. Como não observa-se motivo aparente para que os valores que expressam a capacidade de carga dos veículos, o tempo de início e de finalização de uma janela de tempo, a demanda associada a cada parada e a distância entre as paradas, precisem ser, necessariamente, um número inteiro, presume-se que tenha havido um pequeno equívoco por parte do autor ou mesmo um erro na digitação.

É também assumido que a desigualdade triangular seja satisfeita para ambos os c_{ij} s e t_{ij} s.

O modelo proposto pelo autor contém dois conjuntos de variáveis de decisão, x e s . Para cada arco (i, j) , com $i \neq j, i \neq n+1, j \neq 0$, e cada veículo $k \in V$ define-se x_{ijk} como:

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{se o veículo } k \text{ realiza o percurso do vértice } i \text{ ao vértice } j; \\ 0, & \text{em caso contrário.} \end{cases}$$

A variável de decisão s_{ik} é definida por cada vértice i e cada veículo k e denota o tempo no qual o veículo k inicia o serviço do cliente i . No caso em que o cliente i não é servido pelo veículo k , s_{ik} torna-se insignificante.

Supõe-se que $a_0 = 0$ e, conseqüentemente, $s_{0k} = 0$, para todo k .

Objetiva-se encontrar um conjunto de rotas de mínimo custo, uma para cada veículo, de forma que:

- cada cliente seja servido uma única vez;
- cada rota inicie no vértice 0 e termine no vértice $n+1$;
- as restrições de janelas de tempo dos clientes e de capacidade dos veículos sejam respeitadas.

Pode-se, então, definir matematicamente o VRPTW como:

$$\text{Minimize } \sum_{k \in V} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} c_{ij} x_{ijk} \quad (2.1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{k \in V} \sum_{j \in N} x_{ijk} = 1; \forall i \in C \quad (2.2)$$

$$\sum_{i \in C} d_i \sum_{j \in N} x_{ijk} \leq q; \forall k \in V \quad (2.3)$$

$$\sum_{j \in N} x_{0jk} = 1; \forall k \in V \quad (2.4)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ihk} - \sum_{j \in N} x_{hjk} = 0; \forall h \in C, \forall k \in V \quad (2.5)$$

$$\sum_{i \in N} x_{i,n+1,k} = 1; \forall k \in V \quad (2.6)$$

$$s_{ik} + t_{ij} - K(1 - x_{ijk}) \leq s_{jk}; \forall i, j \in N, \forall k \in V \quad (2.7)$$

$$a_i \leq s_{ik} \leq b_i; \forall i \in N, \forall K \in V \quad (2.8)$$

$$x_{ijv} \in \{0,1\}; \forall i, j \in N, \forall k \in V \quad (2.9)$$

A restrição (2.2) garante que cada cliente seja visitado exatamente uma vez. Já a restrição (2.3) assegura que nenhum veículo será carregado além de sua capacidade.

As três equações seguintes, (2.4), (2.5) e (2.6), são as restrições de conservação de fluxo de entrada e de saída. Todo veículo parte e retorna ao depósito central e, quando chega a um cliente, ele deverá partir do mesmo em direção ao cliente seguinte, assegurando a continuidade da rota.

A desigualdade (2.7) indica que um veículo k não poderá chegar a um cliente j antes do tempo de chegada no cliente anterior i , acrescido do tempo de deslocamento do trecho (i, j) , que é t_{ij} . A constante K , sendo um escalar suficientemente grande, garante que a equação seja somente efetiva quando x_{ijk} seja igual a 1, isto é, quando o veículo k percorre o trecho (i, j) .

Finalmente, a restrição (2.8) assegura que o instante de chegada de um veículo k em um cliente i esteja dentro do limite da janela de tempo do mesmo.

A integralidade das variáveis do problema é garantida pela equação (2.9). É interessante observar que um veículo não utilizado terá sua rota vazia, ou seja, $(0, n+1)$.

Devido a sua importância, o problema de roteirização de veículos com janelas de tempo, tem despertado a atenção de pesquisadores da área e tem sido tratado com a utilização de diferentes técnicas, incluindo métodos exatos, heurísticos e metaheurísticos, como se poderá observar na revisão bibliográfica, a seguir.

2.4 TRABALHOS CORRELATOS

Esta seção faz uma revisão de literatura elencando alguns dos primeiros trabalhos a considerar as restrições de janelas de tempo nos problemas de roteirização de veículos. Além disso, apresenta uma retrospectiva dos trabalhos mais relevantes publicados na literatura especializada nos últimos anos.

2.4.1 Métodos Exatos

Métodos exatos foram desenvolvidos para a resolução do VRPTW, e os problemas de referência de Solomon (1987) têm sido comumente utilizados para avaliar e comparar novos algoritmos propostos. Observa-se, entretanto, que das 56 instâncias dos problemas de referência de Solomon, com 100 clientes, 24 continuam sem solução ótima (ALVARENGA, MATEUS E TOMI, 2007).

A seguir, elucida-se alguns trabalhos relevantes cuja abordagem envolveu métodos exatos.

Baker, (1982), desenvolveu um algoritmo *branch-and-bound*, no qual o objetivo foi o de minimizar o tempo total das rotas percorridas

por um único veículo, respeitando as restrições de capacidade dos veículos e de janelas de tempo.

Kolen, Rinnooy e Trienekens (1987), descrevem um algoritmo *branch-and-bound* para o problema de roteirização de veículos com restrições de janelas de tempo. O modelo envolve uma frota de veículos fixa e com capacidade limitada, único depósito e demandas de clientes conhecidas. Os autores estabelecem, como objetivo, a determinação de rotas factíveis que minimizem a distância total percorrida. O método foi avaliado utilizando-se de nove problemas de teste, dos quais três foram gerados randomicamente. Os problemas envolviam um número de clientes que variava entre seis a quinze.

Bard, Kontoravdis e Yu, (2002), desenvolveram um procedimento *branch and cut* para o VRPTW, cujo objetivo considerou a minimização do número de veículos necessário e da distância total de viagem. As restrições impostas ao problema dizem respeito à capacidade dos veículos e às janelas de tempo. Testes computacionais foram realizados em seis conjuntos de problemas (R1, C1, RC1, R2, C2, RC2) de Solomon, (1987).

Calvete, Gale e Oliveiros., (2007), aplicaram uma abordagem de duas fases para resolver, de maneira ótima, VRPTW reais de tamanho médio com janelas de tempo rígidas e flexíveis e com objetivos múltiplos. O procedimento, chamado pelos autores de enumeração-seguida-de-otimização (EFBO), consiste primeiro da enumeração de todas as rotas factíveis e a computação de suas variações, a partir das metas almejadas. Em segundo, o melhor grupo de rotas, de acordo com os objetivos previamente estabelecidos, é selecionado pela solução de um problema de partição de conjunto. O procedimento dá uma solução ótima para o problema analisado. Para formular o modelo de programação, os autores estabeleceram os seguintes objetivos: minimizar o custo total operacional; satisfazer as preferências de janela de tempo dos clientes; evitar a sub utilização da capacidade dos veículos; evitar a subutilização da mão-de-obra. As restrições impostas foram relativas às janelas de tempo, capacidade dos veículos, limite do tempo de roteirização do veículo e limite do tempo de motorista dirigindo. Calvete e seus co-autores não recomendam o uso dessa metodologia para todos os problemas, pois sua principal desvantagem é a impossibilidade de resolver problemas com um grande número de rotas factíveis. Ao contrário, o objetivo dos autores foi propor uma metodologia que fornecesse uma solução ótima e trabalhasse bem quando houvesse múltiplos objetivos e restrições que impedissem o uso de técnicas de programação matemática diretamente. Os resultados

computacionais, segundo os autores, mostraram que, levando em conta o atual uso da tecnologia de computadores, essa metodologia é competitiva para resolver problemas práticos de tamanho médio. Ele dá soluções ótimas e o tempo computacional despendido é considerado aceitável.

Azi, Gendreau e Potvin, (2007), apresentam um algoritmo exato para resolver um problema de roteirização de um único veículo com janelas de tempo e rotas múltiplas. Um método baseado em um algoritmo de caminho mais curto elementar com restrições de recursos, é proposto para resolver esse problema. O método é dividido em duas fases: na primeira, todas as rotas factíveis não dominadas são geradas; na segunda, algumas rotas são selecionadas e postas em seqüência para formar o trabalho diário do veículo. O objetivo é minimizar a distância total viajada para servir todos os clientes, enquanto satisfaz restrições de capacidade, de janelas de tempo e de prazo final. De acordo com os autores, os resultados indicam que esse algoritmo é muito sensível à restrição de prazo final. Quando essa restrição não é “apertada” o suficiente, o número de rotas factíveis “explode”, se torna grande demais e não permite que o algoritmo produza uma solução.

2.4.2 Métodos Heurísticos de Construção e de Melhoria de Rotas

Devido à alta complexidade inerente à solução do VRPTW, métodos de solução, em geral, recorrem ao desenvolvimento de procedimentos heurísticos e/ou metaheurísticos, conforme exposto no capítulo anterior. Solomon, (1987), foi um dos primeiros a generalizar heurísticas do VRP para resolver o VRPTW. Desde então, muitas abordagens, heurísticas e metaheurísticas, eficientes têm sido propostas. Alguns trabalhos que as utilizam são elencados a seguir.

Solomon, (1987), desenvolveu, a partir de extensões de algoritmos para o VRP, sete heurísticas construtivas para o problema de roteirização de veículos com janelas de tempo. A abordagem consistiu não somente em incorporar a distância percorrida, mas também o tempo de processamento da heurística. Solomon considera que a frota de veículos é homogênea e ilimitada e que durante a execução do algoritmo o número de veículos a ser utilizado vai sendo determinado. O autor considera ainda as restrições de janelas de tempo e de capacidade dos veículos. O objetivo proposto é a minimização da distância total percorrida e do tempo total das rotas, incluindo os tempos de espera. As heurísticas desenvolvidas foram: heurística de economia; heurística de

economia com limite de tempo de espera; heurística do vizinho mais próximo com orientação temporal; heurística de inserção I1, com critério que minimiza o acréscimo de tempo e distância causados pela inserção de um cliente; heurística de inserção I2, com critério que minimiza o tempo e a distância total da rota; heurística de inserção I3 e heurística da varredura com orientação temporal. Segundo o autor, modificações extensivas nos algoritmos originais produziram métodos mais robustos e flexíveis, capazes de incorporar restrições de janelas de tempo. Solomon concluiu que a heurística de inserção I1 apresentou melhores resultados, seguida pela heurística I2.

Solomon e Desrosiers, (1988), realizaram uma extensiva análise do estado da arte dos problemas de programação e roteirização de veículos com restrições de janelas de tempo, com a finalidade de delinear os avanços mais significativos para as seguintes classes de problemas: problema do caixeiro viajante; problema dos múltiplos caixeiros viajantes; problema do caminho mais curto; árvore de comprimento mínimo; problema de roteirização de veículos genérico; problemas de coleta e entrega, incluindo problemas dial-a-ride e o problema de roteirização de veículos multiperifódicos.

Cunha, (1997), descreve três heurísticas desenvolvidas para o problema de roteirização de veículos com restrições de janelas de tempo, de duração máxima da jornada de trabalho e de capacidade dos veículos. As três heurísticas baseiam-se na relaxação lagrangiana das restrições relacionadas ao atendimento dos clientes. Ao problema resultante, o qual corresponde a um problema de caminho mínimo com janelas de tempo, são aplicadas heurísticas que utilizam uma versão aprimorada do algoritmo de etiquetamento permanente. Duas das heurísticas implementadas aplicam-se a problemas com frota homogênea, enquanto que a terceira (heurística de agrupamento e alocação seqüencial) contempla problemas com frota heterogênea. De acordo com o autor, o desempenho das heurísticas, em termos de qualidade de soluções, quando comparadas a problemas de referência, apresentam um desempenho equivalente ou superior aos mesmos.

Toth e Vigo, (1997), descrevem uma heurística de inserção paralela, rápida e eficaz, para determinar a programação do transporte de pessoas com deficiência, utilizando uma frota de veículos heterogênea. A determinação do conjunto de rotas para os veículos, que sirva todos os clientes e que minimize o custo total e as penalidades de inconveniência para o usuário, são os objetivos almejados. As restrições dizem respeito ao tempo de viagem máximo, ao tipo de veículo a ser utilizado, à capacidade dos veículos e às janelas de tempo. O problema pode ser

considerado como uma generalização do PDPTW em que se considera múltiplos depósitos (a rota inicia no primeiro cliente a ser atendido e não no depósito). Os autores também apresentam um procedimento (*Tabu thresholding*) que pode ser utilizado para melhorar a solução inicial obtida pelo algoritmo de inserção. O método proposto foi utilizado pelo Sistema de Suporte a Decisões para planejar o horário de serviço dos veículos na cidade de Bologna, Itália. De acordo com os autores, a heurística obteve resultados muito bons em termos de qualidade de serviço e de custo total.

Mullaseril, Dror e Leung, (1997), implementaram uma adaptação da heurística proposta por Dror e Tardieu (1990, apud Mullaseril, Dror e Leung, 1997) para resolverem um problema de distribuição de alimentos, encontrado em um rancho de gado no Arizona. O problema foi moldado como um problema do carteiro rural capacitado com entregas fracionadas e janelas de tempo nos arcos. Restrições inerentes à capacidade dos veículos também foram consideradas e o objetivo proposto foi minimizar a distância total percorrida pelos veículos. A partir da geração de soluções factíveis, com apenas uma entrega, e com o intuito de melhorar as soluções das mesmas, fez-se uso de heurísticas que proporcionaram troca de arcos, trocas de clientes com demandas fracionadas e também adição de rotas. De acordo com os autores, a utilização de entregas fracionadas reduziu consideravelmente quatro dos cinco casos analisados, sendo que em dois deles, a redução foi superior a 10%.

Liu e Shen, (1999b), implementaram uma heurística de inserção baseada em economias para um problema de roteirização de veículos heterogêneos com restrições de janelas de tempo. O objetivo considerado foi a minimização da soma dos custos fixos e dos custos de roteirização dos veículos, os quais foram proporcionais à distância total percorrida. Resultados computacionais obtidos pela resolução de 168 problemas, adaptações derivadas do conjunto de instâncias de Solomon (1987), para frota heterogênea, demonstraram, segundo os autores, a eficiência da heurística. Adicionalmente, os autores fizeram testes com 20 outros problemas de referência. Estes dispunham de frota heterogênea mas não consideravam restrições de janelas de tempo. Mais uma vez a heurística demonstrou bons resultados.

Tung e Pinnoi, (2000), modificaram o algoritmo de inserção de Solomon, (1987), e aplicaram a um problema de coleta de resíduo em Hanói, Vietnã. Além das considerações do VRPTW padrão (janelas de tempo e capacidade dos veículos), eles consideraram uma operação de aterro – que é o depósito do resíduo coletado; uma restrição de tempo

interchegada, entre duas visitas consecutivas a uma parada; e uma frota de veículos heterogênea e fixa. Eles incorporaram a operação de aterro considerando que o veículo começa uma nova rota a partir do depósito após o aterro. O procedimento proposto, que tem por objetivo minimizar o custo total de operação, é dividido em duas fases. Na primeira, as rotas são construídas a partir da modificação do algoritmo de inserção II, de Solomon (1987). Na segunda fase, algoritmos Or-opt ou 2-opt são adotados para melhorar a qualidade da solução. Comparado com a prática atual, o procedimento proposto, segundo os autores, conseguiu uma melhoria significativa no custo total e no número de veículos utilizados. Além disso, demonstrou boa performance em termos de tempo computacional.

Dullaert et al., (2002), abordaram o problema de dimensionamento e roteirização de veículos heterogêneos, com restrições de janelas de tempo. A proposta dos autores consistiu na implementação de três heurísticas, as quais são extensões da heurística de inserção seqüencial II de Solomon, que considera o acréscimo da distância e do tempo e também o custo da inserção de um novo cliente, o qual é baseado nas economias de Golden et al. (1984). O objetivo estabelecido é a minimização da soma dos custos fixos e dos custos de viagem. Testes computacionais foram realizados no conjunto de problemas de Liu e Shen (1999), que são adaptações das instâncias de Solomon (1987). De acordo com Dullaert e seus co-autores, os resultados obtidos em relação ao tempo total da rota (que não considera tempo de serviço) mostraram-se superiores em muitos dos problemas testados, chegando a uma melhoria de 50%.

Bräysy, Hasle e Dullaert, (2004), propõem uma heurística de busca local multiinício (MSLS) para o problema de roteirização de veículos com janelas de tempo (VRPTW). A abordagem sugerida é baseada em um trabalho MSLS e várias novas heurísticas de melhoramento. Uma nova técnica é introduzida para a heurística de construção e os resultados do MSLS são pós-otimizados. A nova heurística de busca local multiinício contém três fases: 1^a) a) utiliza uma nova heurística de inserção seqüencial baseada em Braysy (2001, apud BRAYSY, 2004), para gerar rapidamente um conjunto de soluções iniciais; b) árvores de injeção (TA) são aplicadas para reduzir o número de rotas; 2^a) utiliza duas novas heurísticas de melhorias baseadas em trocas CROSS para minimizar distâncias; 3^a) realiza uma otimização posterior utilizando TA, neste estudo utilizou : IOPT-operator (explora soluções vizinhas e inverte a ordem dos clientes) e GENICROSS (heurística de melhoria). De acordo com os autores, experimentos em

358 problemas de referência – 56 de Solomon (100 clientes); 300 de Gehring e Homberger (200 a 1000 clientes) e 2 problemas reais de Russel (417 clientes) – apresentaram vários melhores resultados publicados, demonstrando uma boa performance com até 500 clientes.

Diana e Dessouky, (2004), apresentaram uma heurística de inserção paralela para resolver um problema dial-a-ride de múltiplos veículos, em larga escala, com janelas de tempo. O algoritmo proposto foi testado em conjuntos de dados de 500 e 1000 solicitações, construídos a partir de dados do serviço de para-trânsito (serviço de atendimento emergencial em acidentes de trânsito) que prestam no município de Los Angeles. O objetivo foi minimizar o somatório de três elementos: (1) a distância total viajada por todos os veículos; (2) o tempo adicional (tempo real do passeio decrescido do tempo de viagem direta ao ponto de desembarque) de todos os clientes; e (3) o tamanho total dos tempos inativos dentro da programação. Os resultados computacionais, de acordo com os autores, mostraram a eficiência do método em termos de qualidade de solução e em tempos computacionais, que é especialmente importante nos sistemas nos quais pedidos diários numerosos precisam ser processados.

Lu e Dessouky, (2006), propuseram um novo algoritmo de construção, baseado em inserção, para resolver o problema de coleta e entrega com múltiplos veículos e janelas de tempo (m-PDPTW). O objetivo era projetar um algoritmo limitado computacionalmente que gerasse soluções de alta qualidade rapidamente, sob a imposição de restrições referentes à capacidade dos veículos, duração máxima das rotas, precedência de tarefas e à janelas de tempo. Além disso, investigaram como medir quantitativamente a atratividade visual das soluções geradas. O novo algoritmo considera o custo de inserção que não somente inclui o aumento de distância, mas, também, o custo da redução da folga na janela de tempo devido às inserções. Eles compararam o algoritmo proposto com um algoritmo de inserção paralela em diferentes problemas e os resultados computacionais obtidos foram superiores. Eles também compararam os resultados com aqueles obtidos por Li e Lim (apud Lu e Dessouky, 2006). O número de veículos utilizados e o tempo total de viagem foram, ambos, próximos das melhores soluções encontrados por eles em todos os casos, porém com um tempo computacional reduzido.

Fabri e Recht, (2006), consideraram o problema de roteamento dinâmico de um veículo de coleta e entrega com janelas de tempo. Os autores adaptaram a heurística proposta por Caramia et al. (2001), substituindo o fator de extensão utilizado por estes por uma segunda

janela de tempo (horário de desembarque) e ainda permitiram tempos de espera dos veículos. O objetivo do problema foi minimizar a distância total percorrida, tendo como restrições a capacidade dos veículos e a precedência de tarefas. Os resultados computacionais relatados foram consideravelmente aprimorados pelas técnicas de busca local e fizeram uso da capacidade computacional livre. Foram realizados testes com 100, 400 e 1000 pontos de demanda. O número de veículos dos testes foram de 10, 20 ou 100. Os autores resumiram que a introdução dos tempos de espera, das janelas de tempo e das rotinas para aperfeiçoar a busca local levaram às seguintes melhorias decisivas:

- As suposições foram adaptadas a um modelo mais realista.
- A taxa de demandas aceitas aumentou.
- O custo por demanda diminuiu.
- Uma capacidade menor de memória é necessária.

Pisinger e Ropke, (2007), apresentaram uma heurística unificada para resolver cinco diferentes variantes do problema de roteirização de veículos: problema de roteirização de veículos com janelas de tempo (VRPTW); problema de roteirização de veículos capacitado (*Capacitated vehicle routing problem* – CVRP); problema de roteirização de veículos com múltiplos depósitos (*Multi-depot vehicle routing problem* – MDVRP); problema de roteirização de veículos com dependência de local (*Site-dependent vehicle routing problem* – SDVRP) e problema de roteirização de veículos aberto (*Open vehicle routing problem* – OVRP). Todas as cinco variações foram transformadas em um modelo de coleta e entrega e resolvidas através de uma busca adaptativa de grande vizinhança (*adaptive large neighborhood search* – ALNS). A ALNS é uma extensão da busca de grande vizinhança que promove a diversificação e intensificação da busca. Para o caso específico do VRPTW, o objetivo foi minimizar a distância de viagem sem que fossem violadas as restrições de janelas de tempo, precedência de tarefas e de capacidade dos veículos. Segundo os autores, estudos computacionais, para as cinco variantes do problema de roteirização de veículos, foram realizados em 486 problemas de referência encontrados na literatura, nos quais o algoritmo encontrou 183 das melhores soluções conhecidas. Além disso, o método mostrou resultados promissores para problemas de roteirização de veículos de grande porte.

Bredström e Rönnqvist, (2008), propuseram uma heurística (*Local branching heuristic*) para solucionar o problema de roteirização e programação de veículos com janelas de tempo (VRSP – TW). O trabalho considerou restrições de precedência de tarefas e de

sincronização temporal, ou seja, veículos precisam estar em um mesmo local, em determinada janela de tempo. Os objetivos estabelecidos foram: a) minimização do custo de viagem e da diferença máxima da carga de trabalho e b) minimização do tempo de viagem. Os autores constataram a eficiência da heurística desenvolvida que, segundo eles, apresentou alta qualidade de soluções em curto espaço de tempo. No entanto, eles alertaram para o fato de que o modelo proposto cresce rapidamente (como um VRP padrão) a medida em que se aumenta o número de visitas ou o número de visitas sincronizadas e, portanto, para exemplos de grande porte, sugeriram o desenvolvimento de modelos mais eficientes.

Li, Mirchandani e Borenstein, (2009), estudaram o problema de re-roteirização de veículos com restrições de janelas de tempo. Os autores contemplaram as perturbações ocorridas na programação de serviços de coleta e/ou entrega, considerando as alterações decorrentes de possíveis avarias de um ou mais veículos durante a execução do serviço. A abordagem teve como objetivo a minimização de uma soma ponderada dos custos de operacionalização, de cancelamento do serviço e de interrupção da rota. Para a resolução do problema foi desenvolvida uma heurística baseada em relaxação Lagrangiana. O problema resultante dessa relaxação foi decomposto em um problema de caminho mínimo com restrições de janelas de tempo e de capacidade dos veículos, cuja solução forneceu uma solução inicial viável para o problema. A referida solução foi obtida com a utilização de uma heurística baseada em programação dinâmica. Extensivos experimentos computacionais foram realizados em problemas de referência desenvolvidos por Solomon (1987), nos quais, o procedimento proposto teve, segundo os autores, um desempenho muito bom.

2.4.3 Metaheurísticas

Muitas metaheurísticas têm sido aplicadas para resolver problemas de roteirização de veículos com restrições de janelas de tempo e apresentado resultados satisfatórios. Alguns dos trabalhos mais relevantes que realizam essa abordagem são elencados a seguir.

a) Algoritmos genéticos

Tan et al.,(2001), implementaram as metaheurísticas Busca Tabu, *Simulated Annealing* e Algoritmos Genéticos para resolverem um problema de roteirização de veículos com restrições de janelas de

tempo, capacidade dos veículos e de duração máxima da jornada. O objetivo proposto foi a minimização da distância total percorrida. No método proposto, a heurística de inserção de Solomon (1987) foi utilizada para gerar uma solução inicial e, na seqüência, aplicaram as três metaheurísticas acima explicitadas. Testes realizados em 56 problemas de Solomon mostraram a eficiência do método que, de acordo com os autores, superaram ou igualaram 18 das melhores soluções encontradas na literatura.

Alvarenga, Mateus e Tomi, (2007), propõem uma abordagem heurística robusta para o problema de roteirização de veículos com janelas de tempo, utilizando a distância de viagem como objetivo principal através de uma formulação que envolve um algoritmo genético eficiente e também particionamento de conjuntos. Considera-se, nessa abordagem, além das restrições de janelas de tempo, as restrições de capacidade dos veículos. Testes computacionais foram produzidos utilizando números reais, permitindo uma comparação direta de seus resultados com aqueles obtidos por métodos heurísticos e exatos, previamente publicados. Segundo os autores, resultados computacionais mostraram que a abordagem heurística proposta superou todos os métodos heurísticos já publicados em termos de distância mínima de viagem.

b) *Scatter Search*

Russel e Chiang, (2006), utilizaram a metaheurística *Scatter Search* – SS (Busca Dispersa) para resolução de um problema de roteirização de veículos com janelas de tempo (VRPTW), com o objetivo de minimizar o custo total da rota, considerando, além das restrições de janelas de tempo, restrições de número máximo de veículos. O conjunto de referência inicial foi gerado a partir de duas heurísticas construtivas: heurística de construção paralela de Chiang e Russel, (1997), e heurística de inserção seqüencial de Solomon (1987). Os autores utilizaram duas versões da metaheurística Busca Tabu para a fase de melhoria. O tipo de atualização foi por qualidade e diversidade. O método de combinação foi baseado em duas fases: combinação dos arcos comuns das soluções e método de combinação das rotas. O algoritmo foi aplicado ao conjunto de problemas de referência de Solomon, (1987). Segundo os autores, o modelo garante soluções robustas, pois gera soluções de qualidade que são competitivas com os melhores resultados encontrados na literatura.

Belfiore e Yoshizaki, (2009), apresenta um método de resolução para um problema de roteirização de veículos com janelas de tempo,

frota heterogênea e entregas fracionadas (HFVRPTWSD). O HFVRPTWSD é baseado em um único depósito, a demanda dos clientes pode ser maior que a capacidade dos veículos, existem restrições de janelas de tempo, restrições de capacidade dos veículos e ainda restrições quanto ao tipo de veículo. Com o objetivo de minimizar o custo total do frete, os autores propuseram quatro heurísticas construtivas: heurística de economias; adaptação da heurística de inserção de Solomon (1987); heurística de inserção seqüencial de Ho e Haugland, (2004); adaptação da heurística de inserção seqüencial de Dullaert et al., (2002) e a metaheurística *Scatter Search*, a qual, segundo os autores, permitiu a busca de novos espaços de soluções. Além da proposta ter sido implementada para resolver um problema de abastecimento de lojas de um grupo varejista, Belfiore e Yoshizaki, com o objetivo de avaliar o desempenho dos algoritmos propostos, adaptou-os para que resolvessem três instâncias de problemas da literatura: Solomon (1987), Ho e Haugland (2004) e Liu e Shen (1999). Para algumas dessas instâncias, os algoritmos apresentaram resultados similares ou superiores às melhores soluções encontradas na literatura.

c) Busca tabu

Chiang e Russel, (1997), produziram um método de Busca Tabu Reativa para um problema de roteirização de veículos com janelas de tempo (VRPTW). A Busca Tabu Reativa faz com que o tamanho e os movimentos da lista Tabu variem dinamicamente, evitando ótimos locais. As restrições consideradas no problema dizem respeito à capacidade dos veículos, às janelas de tempo e à duração máxima da jornada de trabalho. O objetivo foi minimizar o número de veículos necessários, o tempo total das rotas, bem como a distância total percorrida. A solução inicial foi similar à heurística de inserção de Solomon (1987), no entanto a construção das rotas foi realizada de forma paralela. Testes computacionais foram realizados em dois problemas reais de Russel (1995) e em um conjunto de dados de Solomon (1987), para os quais produziram o melhor registro em termos do número total de veículos necessários.

Badeau et al., (1997), desenvolveram um algoritmo de Busca Tabu Paralela para um problema de roteirização de veículos com restrições de janelas de tempo rígidas e flexíveis e restrições relativas à capacidade dos veículos. Como objetivo, foi considerado a minimização da distância total percorrida e dos atrasos que eventualmente ocorressem. A abordagem dos autores explora estruturas de vizinhança a partir de movimentos de troca de arcos (2-opt), de trocas cruzadas entre

as rotas existentes e de trocas de clientes pertencentes à mesma rota. De acordo com os autores, os testes computacionais realizados em problemas de referência evidenciaram que a consideração da paralelização no algoritmo não reduz a qualidade da solução.

Taillard et al., (1997), implementaram a metaheurística de Busca Tabu em um problema de roteirização e programação de veículos com restrição de janelas de tempo flexíveis (VRPSTW). A minimização das distâncias totais viajadas, acrescida da penalidade total incorrida por não servir dentro da janela de tempo, são os objetivos estabelecidos pelos autores. A solução inicial foi gerada através da adaptação da heurística de inserção II de Solomon (1987). Um conjunto de soluções foi gerado introduzindo um componente estocástico na heurística acima mencionada. Para acelerar a computação e intensificar a busca, uma decomposição e uma abordagem de construção foram utilizadas. O método foi aplicado ao conjunto de problemas proposto por Solomon (1987) e comparado com os melhores resultados encontrados na literatura. Segundo os autores, a metaheurística apresentada superou as melhores soluções em diferentes classes de problemas.

Weigel e Cao, (1999), apresentaram um estudo da aplicação de algoritmos para o problema de entrega doméstica da Sears e o problema do envio do técnico, VRPTW. Eles seguiram um método clusterização-primeiro-roteirização-depois e discutiram três rotinas principais: construção de matriz origem destino (OD), designação de rotas e rotinas de melhoria de rotas. Eles aplicaram um algoritmo de caminho mais curto a um sistema de informação geográfica (GIS) para obter a matriz OD, considerando o tempo de viagem entre dois pontos de parada, por exemplo. Para a rotina de designação de rota (clusterização), um algoritmo chamado inserção-múltipla, que é similar ao algoritmo de inserção paralela de Potvin e Rousseau, foi desenvolvido. Como função objetivo, a combinação mediada do tempo de viagem, tempo de espera e tempo de violação da janela foi utilizada. Eles propuseram, ainda, um algoritmo de melhoria intra-rota e um algoritmo de melhoria intra-rota vizinha, que melhora a qualidade da solução transferindo e trocando as paradas entre as duas rotas. A fim de melhorar o desempenho do algoritmo, a Busca Tabu é aplicada na fase de aprimoramento.

Caramia et al., (2001), introduziram um algoritmo de inserção combinado com o procedimento de Busca Tabu para roteirizarem uma frota de veículos, com o intuito de dinamizarem o serviço de embarque (coleta) e desembarque (entrega). Os autores assumiram que cada cliente informa um fator de extensão (*stretch-factor*), que denota o desvio máximo relativo ao caminho mais curto entre o ponto de embarque e o

ponto de desembarque, esse desvio máximo deverá ser respeitado. Tendo como objetivo a minimização da distância viajada por todos os veículos e a aceitação de tantos clientes quanto possível, os autores trabalharam com restrições de janelas de tempo e de capacidade dos veículos. Tempos de espera não foram aceitos. Testes computacionais revelaram, segundo os autores, que a heurística proposta é eficiente e rápida.

Landrieu, Mati e Binder, (2001), apresentaram uma Busca Tabu e uma Busca Tabu Probabilística para resolverem um problema de coleta e entrega de veículo único com janelas de tempo. A idéia principal foi a seguinte: no passo de inicialização, a rota foi construída para o veículo, utilizando uma heurística de inserção simples. A construção da primeira rota foi realizada respeitando as restrições de precedência de tarefas e de capacidade do veículo. Em seguida, dois métodos de busca local (Busca Tabu Simples e Busca Tabu Probabilística) foram utilizados para construir uma rota factível com a mínima distância viajada. O algoritmo foi testado em problemas do caixeiro viajante clássico e em uma classe de problemas gerados randomicamente. De acordo com os autores, a abordagem produziu as melhores soluções conhecidas para todos os casos testados e em tempos de execução relativamente pequenos. A Busca Tabu demonstrou melhor desempenho que a Busca Tabu Probabilística, tanto em termos de qualidade de solução obtida quanto em termos de tempo de execução.

Lau, Sim e Teo, (2003), propuseram uma abordagem de Busca Tabu, caracterizada por uma lista de reservas e um mecanismo para forçar a densidade das rotas, para resolverem problemas de roteirização de veículos com janelas de tempo flexíveis e número de veículos limitado (VRPSTW). Em função da limitação do número de veículos, a solução factível foi obtida considerando o não-atendimento de alguns clientes e o relaxamento das restrições de janelas de tempo mediante penalizações. Os autores tiveram como objetivo primordial maximizar o número de clientes atendidos e, em segundo lugar, minimizar a distância total percorrida. O desempenho do algoritmo foi testado em um conjunto de 56 problemas de Solomon, (1987), com 100 clientes. Segundo os autores, os resultados computacionais mostraram que a abordagem gera soluções que são competitivas em relação aos melhores resultados publicados, bem como apresentam um bom desempenho computacional.

Ho e Haugland, (2004), abordaram o problema de roteirização de veículos com restrições de janelas do tempo e entregas fracionadas (VRPTWSD). A opção de dividir uma demanda tornou possível a

prestação de serviços a um cliente cuja demanda excedeu a capacidade do veículo. Neste trabalho, os autores propuseram um método de solução baseado em Busca Tabu para resolver o VRPTWSD sem impor nenhuma limitação nas opções fracionadas da entrega. Eles consideraram uma frota de veículos homogênea, cujos roteiros iniciam e terminam em um depósito, com horário máximo de retorno estabelecido. Tendo como objetivo minimizar o número de veículos e a distância total percorrida, os autores dividiram o método em três fases: a) construção de uma solução inicial através do algoritmo de inserção sequencial, o qual minimiza a soma dos tempos de viagem bem como o tempo de espera dos clientes; b) implementação da metaheurística Busca Tabu; c) utilização do algoritmo US de Gendreau et al. (1992, apud Ho e Haugland, 2004) e um critério de realocação para aprimorar a solução obtida através das fases anteriores. Com o intuito de avaliar o método proposto, os autores alteraram as demandas de um conjunto de problemas de Solomon (1987) para que as mesmas fossem maiores que a capacidade dos veículos, permitindo, dessa forma, a realização de entregas fracionadas, e aplicaram o algoritmo no VRPTWSD e também no VRPTW. Segundo os autores, das 56 classes de problemas de Solomon, somente duas delas apresentaram custos mais elevados, no entanto, os tempos de processamento do VRPTWSD foram bem superiores. Outro experimento realizado pelos autores permitiu a constatação que o algoritmo proposto superou ou igualou as melhores soluções em 13 problemas do conjunto original de Solomon para o VRPTW.

Homberger e Gehring, (2005), implementaram uma metaheurística híbrida de duas fases para o problema de roteirização de veículos com janelas de tempo e um depósito central (VRPTW). A função objetivo considerada pelos autores combinou a minimização do número de veículos (critério primordial) com a distância total de viagem (critério secundário) e colocou restrições de janelas de tempo e de capacidade dos veículos. O foco da primeira fase foi a minimização do número de veículos, a qual é realizada com uma estratégia de evolução. Na segunda, na qual a distância total de viagem é minimizada, um algoritmo de Busca Tabu ligeiramente modificado foi utilizado. O método foi submetido a testes comparativos com 356 problemas encontrados na literatura, com tamanhos que variaram de 100 a 1000 clientes. De acordo com os autores, os resultados obtidos demonstraram que a proposta de duas fases é muito competitiva.

O trabalho de Tan, (2001), além de utilizar algoritmos genéticos, conforme explicitado anteriormente, aborda também, Busca Tabu.

Paraskevopoulos et al., (2008), desenvolveram uma metodologia para encontrar uma solução para o problema de roteirização de veículos com janelas de tempo e frota de veículos heterogênea. Os objetivos considerados eram: a) minimizar o custo total de distribuição; b) determinar a dimensão ótima da frota e c) minimizar a distância total percorrida pelos veículos, bem como, seus custos fixos. Restrições de capacidade do veículo e janelas de tempo foram impostas pelos autores. A proposta consistiu em duas fases. Na primeira delas, várias soluções iniciais foram produzidas a partir de uma nova heurística de construção semi-paralela, seguida de uma técnica que melhorou a utilização dos veículos, bem como, reduziu o número desses. Na segunda fase, as soluções foram melhoradas por meio de um algoritmo híbrido de Busca Tabu de Vizinhança Variável (*Variable neighborhood tabu search – VNTS*). Experimentos computacionais efetuados em um conjunto de problemas de referência revelaram, segundo os autores, a superioridade da metodologia proposta.

d) *Simulated annealing*

Li e Lim, (2003), propuseram uma metaheurística baseada em reinícios para diversificarem e intensificarem buscas locais na resolução de problemas de roteirização de veículos com janelas de tempo (VRPTW). O objetivo foi minimizar o número de veículos necessários e o custo total da viagem, sem que as restrições impostas (janela de tempo e capacidade dos veículos) fossem desrespeitadas. O algoritmo foi proposto como uma estrutura de duas fases:

Fase 1: obter uma solução inicial para a VRPTW usando uma heurística.

Fase 2: iniciar uma busca local a partir da solução inicial, usando *Simulated Annealing* com Busca Tabu Embutida – TSA com a estratégia *K-restart*.

Na primeira fase, eles utilizaram uma heurística de inserção, proposta por Solomon, para produzirem as soluções iniciais. As soluções iniciais foram, então, usadas para alimentar o procedimento de procura na segunda fase. A busca local que ocorreu na segunda fase foi o principal interesse. Já o mecanismo de geração de vizinhanças utilizou operadores de troca (de mudança e de reorganização). Usando exemplos de referência de Solomon para o problema, os autores elucidaram que o método obteve sete novos melhores resultados e se equiparou a 19 outros resultados. Comparações extensivas indicaram que o método é compatível com os melhores publicados pela literatura. Essa abordagem, segundo os autores, foi flexível e pode ser estendida para lidar com

outras variações de problemas de roteirização de veículos, a outros problemas combinatórios.

Kim, Kim e Sahoo, (2006a), abordaram um problema real de roteirização de veículos de coleta de resíduo comercial com janelas de tempo (VRPTW), considerando as múltiplas viagens de descarga e as pausas para o almoço dos motoristas. Segundo os autores, o problema pôde ser caracterizado como uma variação dos problemas de roteirização de veículos com janela de tempo e depósitos intermediários (*Vehicle routing problems with time windows and intermediate facilities* – VRPTW-IF). O algoritmo de inserção de Solomon foi estendido para o problema. Enquanto a minimização do número total de veículos e do tempo total de deslocamento foi o objetivo principal dos problemas de roteirização de veículo na literatura, os autores consideraram, ainda, a compactação da rota e o equilíbrio da carga de trabalho de uma solução, uma vez que eles são aspectos muito importantes nas aplicações práticas. Dois problemas de restrição de capacidade principais são considerados ao criar uma rota: a capacidade do veículo e a capacidade da rota. A capacidade do veículo é o volume e peso máximo que cada veículo pode conter. A capacidade da rota é a capacidade diária para cada motorista: número máximo de paradas, número máximo de carregamentos, volume e peso máximo que a equipe de guarnição pode manusear por dia. A fim de aprimorar a compactação da rota e o equilíbrio da carga de trabalho, um algoritmo VRPTW de coleta de resíduo capacitada baseada em clusters foi desenvolvido. O algoritmo proposto foi elaborado com sucesso e aplicado para o problema real de roteirização de veículos de coleta de resíduo com janelas de tempo na *Waste Management, Inc.* Um grupo de problemas de referência de VRPTW de coleta de resíduo foi também apresentado neste trabalho.

O trabalho de Tan, (2001), além de utilizar algoritmos genéticos, conforme explicitado anteriormente, aborda também, *Simulated Annealing*.

e) Outras

Desaulniers, Lavigne e Soumis (1998) consideraram o problema de dimensionamento de veículos com janelas de tempo e múltiplos depósitos (*Multi-depot vehicle scheduling problem with time windows* – MDVSPTW). O objetivo foi dimensionar a frota para que esta executasse todas as tarefas com o menor custo possível, respeitando as restrições de janelas de tempo e capacidade dos veículos. O problema foi resolvido utilizando uma aproximação da geração de colunas encaixada em uma estrutura *branch-and-bound*. Experimentos foram

realizados em problemas de dimensionamento de ônibus urbanos (*Urban bus scheduling problem* - UBSP), gerados aleatoriamente, e em problemas de dimensionamento de transporte de frete (*Freight transport scheduling problem*). Os resultados, segundo os autores, demonstraram ser eficientes, resolvendo problemas com até 300 tarefas e cinco depósitos.

Liu e Shen (1999a) implementaram uma metaheurística de dois estágios baseada em rotas de vizinhança (*Route-neighborhood-based two-stage* – RNETS) para resolver o problema de roteirização de veículos com janelas de tempo (VRPTW). A construção de vizinhança focou o relacionamento entre rota(s) e nó(s). Diferente dos métodos convencionais para construção de rotas paralelas, os autores construíram rotas, de maneira paralela, aninhadas, para obterem uma qualidade de solução mais elevada. Segundo os autores, informações valiosas extraídas de testes de construção paralela anteriores foram utilizados para aprimorar a performance da construção paralela. Além disso, quando sobraram apenas uns poucos clientes, não-roteados, Liu e Shen criaram um procedimento especial para eles. Os resultados computacionais para 60 problemas de referência, entre outros, foram relatados. Segundo os autores, os resultados indicaram que a abordagem foi altamente competitiva com todas as heurísticas existentes, e especialmente muito promissora para resolver problemas de grandes dimensões.

Fagerholt, (2001) trabalhou com um problema de coleta e entrega de despachos múltiplos com janelas de tempo flexíveis (*Multi-ship pickup and delivery problem with soft time windows*- m-PDPSTW) no qual existe um custo de inconveniência por servir clientes fora de suas janelas de tempo. A soma dos custos de transporte e o custo de inconveniência foram minimizados através da resolução de um problema de particionamento de conjuntos, cujas variáveis são planilhas factíveis. Inicialmente, todas, ou algumas rotas candidatas factíveis foram enumeradas. Na seqüência, as várias possibilidades de programação de cada rota foi computada, bem como os custos de operação e de inconveniência correspondentes, sem que fossem violadas as restrições de janelas de tempo. Finalmente, o problema foi resolvido como um problema de particionamento de conjuntos, em que as colunas representam as programações candidatas que foram geradas nas fases anteriores.

Outras referências que abordam problemas de roteirização de veículos com janelas de tempo podem ser encontradas em: Solomon,

1986; Solomon, 1988; Desrochers, 1992; Tompson, 1993; Potvin, 1993; Russel, 1995; Kontoravdis e Bard, 1995; Poot, 2002; Lao e Liang, 2002; Cordeau e Laporte, 2003 e Mitrovic-Minic, 2004.

O Quadro 2, a seguir, apresenta sinteticamente os trabalhos mais relevantes reportados no presente capítulo, elencando o tipo de problema, as restrições adicionais a janelas de tempo, a metodologia utilizada pelos autores, bem como a função objetivo considerada.

Referências Bibliográficas	Tipo de Problema	Restrições Adicionais	Metodologia de Solução	Função Objetivo
Kolen <i>et al.</i> (1987)	VRPTW	-capacidade dos veículos	<i>branch-and-bound</i>	Min. distância total
Solomon (1987)	VRPTW	-capacidade dos veículos	sete heurísticas construtivas	min. distância total + tempo total das rotas
Toth e Vigo (1997)	PDPTW	-capacidade dos veículos -tempo de viagem máximo -tipo de veículo	heurística construtiva inserção paralela heurística de melhoria <i>tabu thresholding</i>	min. custo total + penalidades
Badeau <i>et al.</i> (1997)	VRPTW VRPSTW	-capacidade dos veículos	metaheurística busca tabu paralela	min. distância total + atraso
Mullaseril <i>et al.</i> (1997)	CARPTWSD D<Cv	-capacidade dos veículos	heurística construtiva adaptação de Dror e Trudeau heurística de melhoria adaptação de Dror e Trudeau	Min. distância viajada
Cunha (1997)		-capacidade dos veículos -duração máxima da jornada	Heurística relaxação Lagrangiana	Min. custos fixos + distância total + tempo total rotas
Chiang e Russel (1997)	VRPTW	-capacidade dos veículos -duração máxima da jornada	Metaheurística busca tabu	min. n. veículos + tempo total rotas + distância total
Taillard <i>et al.</i> (1997)	VRPSTW	-capacidade dos veículos	Metaheurística busca tabu	min. distância total + penalidades de atraso
Desaulniers <i>et al.</i> (1998)	MDVSPTW	-capacidade dos veículos	geração de colunas encaixada em uma estrutura <i>branch-end-bound</i>	min. custo total
Liu e Shen (1999)	FSMVRPTW	-capacidade dos veículos	heurística construtiva inserção seqüencial	Min. custos fixos + custos de roteirização

Quadro 2 - Síntese dos trabalhos mais relevantes reportados no segundo capítulo e que envolvem restrições de janelas de tempo.

(continua)

Referências Bibliográficas	Tipo de Problema	Restrições Adicionais	Metodologia de Solução	Função Objetivo
Liu e Shen (1999)	VRPTW	-capacidade dos veículos	metaheurística RNETS procedimento de melhoria procedimento inter e intra rotas procedimento de perturbação	min. n. veículos + distância total viajada
Weigel e Cao (1999)	VRPTW	-capacidade dos veículos	heurística construtiva inserção múltipla heurística de melhoria intra-rota intra-rota vizinha busca tabu	min. tempo de viagem + tempo de espera + tempo de violação da janela
Tung e Pinnoi (2000)	VRPTW	-capacidade dos veículos -tempo inter-chegada entre visitas consecutivas	heurística construtiva inserção adaptada heurística de melhoria 2-opt	min. custo total operação
Caramia <i>et al.</i> (2001)	VRPTW <i>Dial-a-ride</i>	-capacidade dos veículos precedência de tarefas	Heurística construtiva algoritmo de inserção Procedimento de melhoria busca tabu	min. custo total da viagem
Tan <i>et al.</i> (2001)	VRPTW	-capacidade dos veículos -duração máxima da jornada	Metaheurísticas busca tabu <i>simulated annealing</i> algoritmo genético	min distância percorrida
Fagerholt (2001)	m-PDPSTW	-capacidade dos veículos -precedência de tarefas	problema de particionamento de conjuntos	min custo de transporte + custo de inconveniência

Quadro 2 - Síntese dos trabalhos mais relevantes reportados no segundo capítulo e que envolvem restrições de janelas de tempo.

(continua)

Referências Bibliográficas	Tipo de Problema	Restrições Adicionais	Metodologia de Solução	Função Objetivo
Landrieu <i>et al.</i> (2001)	PDPTW	-capacidade dos veículos -precedência de tarefas	heurística construtiva inserção simples heurística de melhoria busca local	min distância viajada
Dullaert <i>et al.</i> (2002)	FSMVRPTW	-capacidade dos veículos	heurística construtiva inserção seqüencial	min. custos fixos + distância total
Bard <i>et al.</i> (2002)	VRPTW	-capacidade dos veículos	método exato <i>branch and cut</i>	min. n. veículos + distância total
Li e Lim (2003)	VRPTW	-capacidade dos veículos	metaheurística <i>simulated annealing</i> c/ busca tabu imbutida (TSA)	min. n. veículos + custo viagem +
Lau <i>et al.</i> (2003)	VRPSTW	-capacidade dos veículos	metaheurística busca tabu	max. n. de clientes atendidos+ min distância total
Braysy <i>et al.</i> (2004)	VRPTW	-capacidade dos veículos	heurística de construção inserção seqüencial heurística de melhoria troca <i>CROSS</i> <i>IOPT-operator</i> <i>GENICROSS</i>	min. distância total
Ho e Haugland (2004)	VRPTWSD $d < C_v$	-capacidade dos veículos -horário máximo de retorno	metaheurística busca tabu	min. tempo de viagem + espera
Diana e Dessouky (2004)	<i>Dial-a-ride</i>	-capacidade dos veículos	heurística inserção paralela	min. distância total de viagem+ tempo adicional+ tempo inativo
Homberger e Gehring (2005)	VRPTW	-capacidade dos veículos	metaheurística busca tabu	min. n. veículos + distância total de viagem

Quadro 2 - Síntese dos trabalhos mais relevantes reportados no segundo capítulo e que envolvem restrições de janelas de tempo.

(continua)

Referências Bibliográficas	Tipo de Problema	Restrições Adicionais	Metodologia de Solução	Função Objetivo
Kim, Kim e Sahoo (2006)	VRPTW	-janelas de tempo das paradas e do depósito -capacidade do veículo -capacidade da rota -limite do tempo de roteamento do veículo -viagens de descarga -pausa do motorista para o almoço	clusterização <i>clusters</i> capacitados heurística construtiva algoritmo de inserção metaheurística <i>simulated annealing</i> c/ troca <i>CROSS</i>	min. n. veículos + tempo de viagem + max. compactação da rota + equilibrar a carga entre os veículos
Lu e Dessouky (2006)	m-PDPTW	-precedência de tarefas -capacidade do veículo -duração total máxima das rotas	heurística de construção baseada em inserção	min. custo total+ n. de veículos
Fabri e Recht (2006)	VRPTW <i>Dial-a-ride</i>	-capacidade dos veículos -precedência de tarefas -tempos de espera	heurística busca local algoritmos híbridos	min. custo total da viagem
Russel e Chiang (2006)	VRPTW	-capacidade dos veículos -número máximo de veículos	heurística de construção construção paralela inserção seqüencial metaheurística <i>scatter search</i>	min. custo total da rota
Alvarenga <i>et al.</i> (2007)	VRPTW	-capacidade dos veículos	metaheurística algoritmo genético particionamento de conjuntos	min. distância de viagem
Calvete <i>et al.</i> (2007)	VRPTW VRPSTW	-capacidade do veículo -limite do tempo de roteamento do veículo -limite do tempo de motorista dirigindo	método exato enumeração seguida de otimização	min. custo total operacional + subutilização da capacidade do veículo + subutilização da mão-de-obra

Quadro 2 - Síntese dos trabalhos mais relevantes reportados no segundo capítulo e que envolvem restrições de janelas de tempo.

(continua)

Referências Bibliográficas	Tipo de Problema	Restrições Adicionais	Metodologia de Solução	Função Objetivo
Azi <i>et al.</i> (2007)	VRPTW	-capacidade do veículo -prazo final para finalizar o serviço	método exato baseado no algoritmo do caminho mais curto	min. distância total
Pisinger e Ropke (2007)	VRPTW e outras	-capacidade dos veículos -precedência de tarefas	heurística unificada ALNS	min. distância de viagem
Bredström e Rönnqvist (2008)	VRSP-TW	-sincronização temporal - precedência de tarefas	local <i>branching heuristic</i> (RDT)	min. custo de viagem + diferença máxima da carga de trabalho ou min tempo viagem
Paraskevopoulos <i>et al.</i> (2008)	HFVRPTW	- capacidade dos veículos	heurística construtiva heur. const. semi-paralela técnica p/ determinar n ^o veículos heurística de melhoria busca tabu de vizinhança variável	min. custo total, otimizar frota ou min dist. total + custos fixos
Belfiore (2009)	HFVRPTWSD D>Cv	-capacidade do veículo -tipo de veículo	heurística de construção heurística de economias inserção sequencial adaptada metaheurística <i>scatter search</i>	min. custo total do frete
Li <i>et al.</i> (2009)	VRPTW	-capacidade do veículo	Heurística baseada em: relaxação lagrangiana programação dinâmica	min. soma ponderada de custo de exploração, de cancelamento de serviço e de interrupção da rota

Quadro 2 - Síntese dos trabalhos mais relevantes reportados no segundo capítulo e que envolvem restrições de janelas de tempo. (conclusão)

2.5 CONTRIBUIÇÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DO VRPTW

A realização dessa retrospectiva, que elencou os principais trabalhos que abordaram o problema de roteirização de veículos com janelas de tempo e suas extensões, permitiu a visualização dos avanços ocorridos nessa classe de problemas. Partindo-se de trabalhos iniciais, desenvolvidos na década de oitenta, os quais envolviam problemas extremamente pequenos, de 6 a 15 clientes, chegou-se aos problemas de grande porte, nos quais, em alguns casos, foram considerados milhares de clientes. Evidenciou-se também, a utilização de métodos cada vez mais eficientes e adequados aos problemas atuais, os quais têm envolvido um considerável número de restrições, o que tem feito com que os pesquisadores extrapolem o universo dos métodos exatos e mergulhem no desenvolvimento de novas heurísticas ou mesmo, na adequação dessas. Apesar disso, recentemente, métodos exatos têm sido também alvo de pesquisa, como é o caso do trabalho apresentado por Azi e seus co-autores (2007) e por Calvet et al. (2007).

Um diferencial observado entre os trabalhos pesquisados é a consideração das janelas de tempo rígidas, realizada pela grande maioria dos autores, das janelas de tempo flexíveis e ainda, daqueles que abordam, em um mesmo estudo, as duas possibilidades. As aplicações de cada caso variam com pouca intensidade. Na grande maioria, são considerados problemas de entrega de mercadorias. Seguidos, estão os trabalhos que referenciam problemas de coleta e entrega, incluindo neste último os problemas conhecidos como dial-a-ride.

No que diz respeito às técnicas de resolução, a metaheurística Busca Tabu e as heurísticas de inserção têm-se destacado. Esse trabalho de revisão permitiu ainda a constatação de que poucos autores apresentam a modelagem matemática completa dos problemas tratados, o que ocorre, provavelmente, pela alta complexidade dos mesmos. Além disso, confirmou-se a afirmação de Simchi-Levi (1997), de que a verificação da eficiência dos métodos propostos têm sido realizada, em essência, pela comparação dos resultados obtidos por esses com os fornecidos pelos problemas de referência, deixando-se de lado o enfoque analítico.

O panorama refletido pela revisão bibliográfica do VRPTW, o coloca como um tema encorajador para futuras pesquisas, uma das quais é direcionada, no presente estudo, para o problema de coleta de resíduos

comerciais. Até onde se pode constatar, esse problema foi tratado em apenas dois trabalhos, o de Tung e Pinnoi, (2000) e o de Kim, Kim e Sahoo (2006a), sendo que somente o último considerou múltiplos locais de descarga e pausa para o almoço dos motoristas. A abordagem realizada por Kim, Kim e Sahoo (2006a), além de contemplar restrições primordiais inerentes ao problema de coleta de resíduos, visto que se trata de uma aplicação real vivenciada pela *Waste Manegemente*, uma empresa provedora de serviços de coleta de resíduos da América do Norte, disponibiliza um conjunto de referências, o que instiga a exploração desse problema a partir de outras técnicas, como a *Scatter Search*. Essa metodologia, embora pouco explorada em VRP, apresentou resultados satisfatórios em problemas de roteirização que incluíram restrições de janelas de tempo, conforme pode ser visto em Russel e Chiang, (2006) e Belfiore, (2009). Ainda que a S.S. já tenha sido utilizada na abordagem do VRPTW nos trabalhos supracitados, o ineditismo dessa tese é contemplado pois as particularidades intrínsecas do problema abordado exigem uma reestruturação apurada de cada um dos cinco passos da metaheurística, fazendo com que a implementação da *Scatter Search* para a resolução de problemas de coleta de resíduos comerciais com restrições de janelas de tempo seja bastante distinta daquelas já mencionadas.

CAPÍTULO III

3 ESTRATÉGIAS DE SOLUÇÃO EM PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS COM JANELAS DE TEMPO

Este capítulo apresenta um breve relato a respeito de alguns dos métodos de solução utilizados em problemas de roteirização de veículos com janelas de tempo. Apresenta ainda, minuciosamente, os métodos que serão utilizados na fase de implementação desta tese.

3.1 ABORDAGENS DE SOLUÇÃO

Conforme exposto nos capítulos anteriores, encontram-se na literatura especializada inúmeras técnicas utilizadas para a abordagem do problema de roteirização de veículos com janelas de tempo, as quais se utilizam de métodos exatos, métodos heurísticos e métodos metaheurísticos. Entre os métodos exatos utilizados para a resolução do VRPTW, têm-se: programação dinâmica, métodos baseados em relaxação Lagrangiana, geração de colunas, entre outros. Já as heurísticas para o VRPTW podem ser divididas em três abordagens: a) heurísticas construtivas – procedimento de construção de rotas, que constroem (ou expandem) rotas ótimas ou quase ótimas, considerando a matriz de distâncias. Entre elas, pode-se destacar a heurística de economias de Clark e Wright (1964) e as sete heurísticas construtivas de Solomon (1988), já mencionadas no capítulo anterior, entre outras; b) heurísticas de melhoria/aprimoramento – procedimento de melhoria de rotas que tem por objetivo melhorar as distâncias percorridas em uma rota já existente fazendo, para isto, troca entre os vértices que podem, ou não, estar na mesma rota, procurando evitar cruzamentos. Entre eles, encontram-se: Melhoria 2-opt e 3-opt; c) procedimentos compostos – consistem em gerar uma solução inicial, utilizando-se de algum procedimento de construção de rotas, e, em seguida, aplica-se procedimentos de melhorias de rotas. Entre os métodos de resolução para o VRPTW encontram-se, ainda, algumas metaheurísticas, cujos resultados mostram-se bastante satisfatórios, com soluções, freqüentemente, de boa qualidade e reduzido tempo computacional.

Estas técnicas tentam reduzir o risco de paradas prematuras, evitando a convergência para um mínimo local. Entre elas, destacam-se: Busca Tabu, *Simulated Annealing* e Algoritmos Genéticos.

Entre as técnicas encontradas na literatura para a resolução do VRPTW, nesse estudo optou-se pela metaheurística *Scatter Search*, a qual utilizará, em um de seus passos, a Heurística de Inserção Sequencial II de Solomon, (1987).

3.2 MÉTODOS A SEREM IMPLEMENTADOS

Os métodos a serem implementados na fase de resolução deste trabalho consistem na adaptação da heurística de Inserção Sequencial II de Solomon e da implementação da metaheurística *Scatter Search*. Ambos são delineados a seguir.

3.2.1 Heurística de Inserção Sequencial II de Solomon

Na heurística de inserção II de Solomon, a inicialização do processo de construção da rota baseia-se na escolha de uma parada semente de acordo com um dos critérios a seguir:

- a) parada mais distante do depósito;
- b) parada que tem o tempo de finalização mais cedo.

A partir da escolha de um dos critérios acima mencionados, uma sub-rota é formada com uma seqüência (i_0, i_1, i_m) em que $i_0 = i_m$ e correspondem ao depósito (a rota contém $m-1$ clientes), ao passo que i_1 representa o cliente inserido (parada semente).

O próximo passo diz respeito à inserção do próximo cliente à nova rota, que é representada por (i_0, i_1, \dots, i_m) . A inserção é realizada a cada iteração e consiste em colocar um novo cliente u , não pertencente à rota, entre dois clientes, i e j , pertencentes à rota atual a partir da utilização de dois critérios:

primeiro critério: $c_1(i, u, j)$ – determina para todo cliente u , não pertencente a nenhuma rota, a melhor posição de inserção factível p , definida por:

$$c_1(i(u), u, j(u)) = \min[c_1(i_{p-1}, u, i_p)], p=1, \dots, m \quad (3.1)$$

em que:

$$c_1(i, u, j) = \alpha_1 c_{11}(i, u, j) + \alpha_2 c_{12}(i, u, j), \quad \alpha_1 + \alpha_2 = 1 \quad (3.2)$$

$$\alpha_1, \alpha_2 \geq 0$$

$$c_{11}(i, u, j) = d_{iu} + d_{uj} - \mu d_{ij}, \quad \mu \geq 0$$

$$c_{12}(i, u, j) = b_{j/u} - b_j$$

em que:

c_1 é a função correspondente ao acréscimo de distância e de tempo, resultante da inserção do cliente u na rota, sendo que a melhor posição é aquela que minimiza esse acréscimo.

c_{11} é a função correspondente ao acréscimo da distância após a inserção do cliente u ;

c_{12} é a função correspondente à diferença entre o novo instante de início de serviço ao cliente j e o instante de início de serviço anterior, desencadeada pela inserção do cliente u ;

$b_{j/u}$ é o novo tempo de início de serviço do cliente j após a inserção do cliente u na rota;

α_1 é um parâmetro que prioriza a função c_{11} ;

α_2 é um parâmetro que prioriza a função c_{12} ;

μ é um parâmetro que, na função c_{11} , prioriza d_{ij} .

segundo critério: $c_2(i, u, j)$ – que determina, a partir da maximização da função $c_2(i(u), u, j(u))$, qual cliente u será inserido na rota atual entre os clientes i e j :

$$c_2(i(u^*), u^*, j(u^*)) = \max [c_2(i(u), u, j(u))]$$

$$e \ c_2(i, u, j) = \lambda d_{0u} - c_1(i, u, j), \quad \lambda \geq 0 \quad (3.3)$$

em que:

c_2 é a função correspondente à diferença entre a distância direta da base ao cliente u e o acréscimo de tempo e distância devido à inserção da função c_1 .

λ é um critério de ponderação.

A utilização do segundo critério é conveniente quando se pretende priorizar a inserção dos clientes mais distantes do depósito ou, ainda, no caso em que dois clientes tiverem o mesmo valor para a função c_1 . Em ambos os casos, o cliente mais distante da base é inserido.

3.2.2 Metaheurística *Scatter Search*

A *Scatter Search* – SS, é uma metaheurística que tem sido eficientemente aplicada na solução de uma variedade de problemas de otimização combinatória (MARTÍ et al., 2006b; SCHEUERER, 2006). Devido ao seu recente sucesso, tornou-se um dos novos centros de atenção da comunidade de otimização (SAGARNA, 2006). Os conceitos e princípios fundamentais do método foram propostos no início da década dos anos 1970, com base em estratégias para combinar regras de decisão, especialmente em problemas de seqüenciamento e na combinação de restrições (como o conhecido método das restrições substitutas), (Martí, 2003).

A SS trabalha combinando soluções de um conjunto, denominado conjunto de referência - ConjRef. Com o objetivo de melhorar as soluções deste conjunto, são realizadas combinações, convexas e não-convexas, originando novas soluções, que poderão passar a fazer parte de sua composição, dependendo do critério de seleção a ser utilizado, o qual será relatado no decorrer do presente capítulo.

Embora a *Scatter Search* seja considerada um método evolutivo, por operar com combinações realizadas sobre um conjunto de soluções, com o intuito de melhorar as que as originaram (HERRERA, LOZANO E MOLINA, 2006), a SS distingue-se dos mesmos por violar a premissa de que aproximações evolutivas estão obrigadas a terem por base a aleatoriedade.

Na *Scatter Search*, a escolha de novas soluções é realizada através de combinações sistemáticas e estratégicas, a partir de um pequeno conjunto de soluções, diferenciando-se dos algoritmos genéticos, que realizam a combinação de forma aleatória, a partir de um grande conjunto de soluções. A título de exemplificação, Martí e Laguna, (2003), colocam que, enquanto nos algoritmos genéticos considera-se uma população inicial de 100 indivíduos (soluções), na SS é habitual se trabalhar com um conjunto inicial de apenas 10 soluções.

3.2.2.1 Origem e evolução

A metodologia *Scatter Search* foi introduzida em 1977, por Fred Glover, o qual estabeleceu os princípios básicos do método (apud CAMPOS et al., 2001; MARTÍ E LAGUNA, 2003; MARTÍ, 2006a):

- realizar uma exploração sistemática, a partir de um conjunto de boas soluções (ConjRef);
- combinar duas ou mais soluções do ConjRef para gerar novas soluções;
- realizar combinações não-aleatórias (utilizando pesos apropriados);
- realizar combinações convexas e não-convexas das soluções;
- gerar pontos distribuídos de maneira dispersa.

De acordo com Martí et al. (2006b), a *Scatter Search* só voltou a ser discutida novamente em 1990. Sua re-introdução foi realizada no *Seminar on Operations Research and Artificial Intelligence Search Methods*. Baseado nessas discussões, Glover publica, em 1994, um artigo, apresentando novos detalhes de execução do método e expandindo sua aplicação a problemas não-lineares, binários e de permutação. Ainda neste artigo, Glover introduz o conceito de combinação ponderada (*weighted combination*), como principal mecanismo de geração de novas soluções. O autor enfatiza a importância de se combinar tanto soluções de qualidade como soluções com diversidade, as quais evitam que se recaia em um mínimo local. Atualmente, contribuições extensivas para a SS têm sido realizadas por Manuel Laguna e Rafael Martí.

Outro trabalho que merece destaque na literatura da SS é também uma publicação de Glover, que, em 1998, apresentou a descrição algorítmica do método, incorporando detalhes que despertaram o interesse por parte de pesquisadores. Esta versão apresenta os cinco passos da *Scatter Search*:

- método de geração de soluções diversas;
- método de melhoria;
- método de criação do conjunto de referência;
- método de geração de subconjuntos;
- método de combinação de soluções.

Desde então, as publicações da metaheurística *Scatter Search* vêm sendo expandidas. Sua aplicação, que tem mostrado resultados satisfatórios, é bastante variada e envolve: roteirização de veículos (Rego e Leão, 2000; Corberán et al., 2002; Alegre, Laguna e Pacheco, 2005; Chu, Labadi e Prins, 2006; Belfiore e Yoshizaki, 2009; Russel e Chiang, 2006; Liu, 2008), problema da mochila (Silva et al. 2007;

Adenso-Dýaz; Garcia-Carbajal e Lozano-Dýas, 2006), particionamento de conjuntos (Dell’Amico et al, 2006), problema de distribuição/produção (Keskin e Üster, 2006), problema de seleção de subconjuntos (Lopes et al., 2006), p-medianas capacitado (Dýaz e Fernandez, 2006), programação de projetos (Debels et al., 2006; Yamashita et al, 2006, Rangbar et al. 2009), programação de trabalho em máquinas paralelas (Laguna et al., 2000), flow-shop problem (Nowicki e Smutnicki, 2006), programação de aterrissagem de aviões (Pinol e Beasley, 2006), ordenação linear (Campos et al. 2001), otimização não-linear (Beausoleil, 2006), entre outras.

3.2.2.2 A *Scatter Search* aplicada a problemas de roteirização de veículos

Embora a metaheurística *Scatter Search* tenha sido introduzida nos anos 1970, somente na década de 1990  que ela passou a ser utilizada de fato, inclusive no que diz respeito a problemas de roteirização de veículos, existindo, portanto, poucos trabalhos que abordam o assunto.

Rego e Leão (2000) trazem uma abordagem dos problemas combinatórios, dando ênfase aos problemas de roteirização de veículos, procurando delinear a importância da metaheurística SS para a resolução dos mesmos. No decorrer do trabalho, os autores apresentam um exemplo ilustrativo do procedimento SS, passo por passo, para um problema clássico de roteirização de veículos. Rego e Leão classificam o método como sendo evolucionário para o VRP.

Corberán et al., (2002) abordaram um problema de transporte escolar que contempla uma frota composta por 58 ônibus, viagens de ida e volta e múltiplos objetivos, entre eles: minimizar o tamanho da frota e o tempo total de espera dos estudantes. Para a resolução do problema, os autores implementaram a metaheurística *Scatter Search*, a qual considera cada objetivo separadamente, buscando um conjunto de soluções eficientes e não apenas uma solução ótima. As soluções do ConjRef são geradas a partir de duas heurísticas construtivas. A fase de melhoria utiliza procedimentos de inserção e de trocas na mesma rota. Já o método de combinação, é realizado pela combinação de duas soluções. A atualização do ConjRef é realizada de forma esttica, ou seja, após todas as combinações terem sido realizadas e o critério de aceitação para essa atualização é a qualidade das soluções geradas.

Alegre, Laguna e Pacheco et al. (2005) implementaram a SS para um caso particular de problemas de roteirização de veículos periódicos (PVRP). O trabalho dos autores abordou uma operação de gerenciamento de uma fábrica de autopeças localizada no norte da Espanha, a qual, periodicamente, precisa coletar peças (matéria-prima) em seus fornecedores, que se encontram em locais geograficamente dispersos. Basicamente, o problema incidia em determinar a programação das coletas em cada um dos fornecedores e ainda, estabelecer rotas diárias com o intuito de minimizar o custo total de transportes, definindo-se, para tal, um horizonte de tempo correspondente a 90 dias. Os autores relataram, após extensivos experimentos computacionais, que o procedimento proposto foi capaz de encontrar soluções de alta-qualidade em um espaço de tempo razoável.

Russel e Chiang, (2006) utilizaram a metaheurística *Scatter Search* para resolução de um problema de roteirização de veículos com janelas de tempo. O trabalho desenvolvido pelos autores foi descrito de maneira mais precisa no segundo capítulo deste trabalho.

Chu, Labadi e Prins, (2006), consideraram o problema de roteirização de veículos periódicos capacitado com demandas em arcos. Com o objetivo de minimizar o tamanho da frota e o custo total de viagem, os autores resolveram o problema, para cada período, utilizando a metaheurística *Scatter Search*. O método foi aplicado a dois conjuntos de referência do problema de roteirização de veículos periódicos capacitado com demandas em arcos e também para o caso de um único período. De acordo com Chu e seus co-autores, a SS melhorou substancialmente a solução inicial.

Sosa et al., (2007) apresentaram um algoritmo *Scatter Search* desenvolvido para o PRV clássico, detalhando suas etapas básicas quando aplicado ao problema em questão. Os autores consideraram restrições de capacidade dos veículos e distância máxima. O objetivo foi minimizar o custo total do conjunto de rotas percorrido pela frota. Experimentos computacionais foram realizados em quatro conjuntos de dados disponíveis na literatura e as soluções encontradas, segundo os autores, foram bastante próximas às melhores soluções reportadas na literatura para essas instâncias, sendo que o tempo de processamento foi reduzido.

Belfiore e Yoshizaki, (2009) estudou a implementação de novos algoritmos de otimização (entre eles a *Scatter Search*) em um problema de roteirização de veículos com frota heterogênea, restrições de janelas de tempo e entregas fracionadas. O trabalho desenvolvido pela autora

foi mencionado, de forma mais detalhada, no segundo capítulo deste trabalho.

3.2.2.3 Descrição do método *Scatter Search*

Conforme exposto, a *Scatter Search* tem por base a combinação de soluções que fazem parte de um conjunto de referência, no qual se encontram armazenadas soluções de boa qualidade e diversidade, as quais são encontradas no processo de busca. De acordo com (Campos et al., 2001; Martí e Laguna, 2003; Scheuerer e Wendolsky, 2006; Cotta, 2006, Sagarna e Lozano, 2006), o método consiste basicamente de cinco passos, que são detalhados a seguir.

Passo 1 - Geração de soluções diversas

Gera-se um conjunto de P soluções diversas, aproximadamente 100, do qual serão extraídas um subconjunto pequeno, de dez soluções, por exemplo, que formarão o conjunto de referência.

As soluções do conjunto P podem ser geradas através de heurísticas construtivas e/ou aleatoriamente. Neste passo, é importante que as soluções geradas sejam dispersas o suficiente para corresponder ao princípio do método.

Passo 2 - Melhoria em cada solução diversa

Trata-se de um método de busca local para melhorar as soluções geradas pelo passo anterior. A busca pode ser realizada a partir de movimentos de troca e inserção. Caso o Passo 2 não melhore a solução inicial, esta é considerada como sendo o próprio resultado.

Passo 3 – Criação e atualização do conjunto de referência

A partir do conjunto de soluções diversas P , são extraídas b soluções (aproximadamente 10), que formarão o ConjRef e serão divididas em dois subconjuntos: b_1 que representa as soluções de alta qualidade e b_2 que representa as soluções diversas. Este passo da SS prioriza a intensificação e a diversificação.

a) Criação do conjunto de referência: inicialmente, farão parte do ConjRef as b_1 melhores soluções de P , obtidas após a aplicação do método de melhoria. As b_2 soluções restantes são extraídas de P com o objetivo de maximizar a distância mínima em relação às soluções já

incluídas no ConjRef, ou seja, as b_2 soluções selecionadas serão aquelas que apresentarem maior discrepância em relação às melhores soluções selecionadas, dessa forma, em um VRP por exemplo, as b_2 soluções selecionadas poderiam ser aquelas cujo número de arcos comuns com as b_1 melhores soluções fosse o menor possível.

b) *Atualização do conjunto de referência*: Durante o procedimento da *Scatter Search*, novas soluções são geradas e, se essas forem de melhor qualidade, substituem soluções do ConjRef. O processo de atualização considera dois aspectos. O primeiro deles, que estabelece o momento em que a atualização deve ser realizada, pode ser efetivado de forma estática: o conjunto de referência não muda até que todas as combinações de soluções do ConjRef tenham sido executadas; ou de forma dinâmica: o ConjRef é atualizado sempre que uma nova solução, gerada a partir de uma combinação, qualifica-se para entrar no mesmo. O segundo aspecto, que estabelece os critérios de aceitação de uma nova solução, pode considerar a qualidade e a diversidade de uma nova solução ou considerar apenas sua qualidade.

Passo 4 – Geração de subconjuntos

Consiste em gerar, a partir das soluções contidas no ConjRef, novos subconjuntos, nos quais serão aplicados o método de combinação. A SS se baseia em examinar, de forma bastante exaustiva, todas as possíveis combinações de ConjRef. De acordo com o modelo de Glover (1998, apud Campos et al, 2001), quatro tipos de subconjuntos podem ser gerados:

- subconjunto 1: todos os subconjuntos (de ConjRef) de dois elementos (soluções);
- subconjunto 2: subconjuntos de três elementos – todas as soluções do subconjunto 1 (dois elementos), acrescidas da melhor solução do ConjRef (caso esta não esteja incluída);
- subconjunto 3: subconjuntos de quatro elementos – todas as soluções do subconjunto 2 (três elementos), acrescidas da segunda melhor solução do ConjRef (caso esta não esteja incluída);
- subconjunto 4: subconjunto de $i+1$ melhores soluções – todas as soluções do subconjunto $i-1$, acrescidas da i -ésima melhor solução do ConjRef (caso esta não esteja incluída).

Passo 5 – Combinação das soluções

Consiste em aplicar um método de combinação nos subconjuntos obtidos no Passo 4. As soluções obtidas dessa combinação podem ser introduzidas imediatamente no ConjRef (atualização dinâmica) ou após a combinação de todas as soluções (atualização estática). Ao término da combinação, aplica-se um método de melhoria às melhores soluções geradas.

A Figura 1, a seguir, apresenta um algoritmo simplificado do método *Scatter Search*.

P1: Gerar o conjunto P de n soluções diversas (método de diversificação)
P2: Aplicar método de melhoria
P3: Construir o conjunto de referência: selecionar as b_1 melhores soluções e as b_2 soluções mais diversas de P para construir o ConjRef.
Número de iterações = 0
Novas Soluções = Verdadeiro
Enquanto (número de iterações < número máximo de iterações desejadas) faça
 Enquanto houver Novas Soluções em ConjRef faça
 P4: Gerar subconjuntos e aplicar o método de combinação
 P5: Aplicar o método de melhoria em cada solução combinada
 P6: Atualizar ConjRef considerando as novas soluções
 Fim Enquanto
Fim Enquanto

Figura 1 - Algoritmo *Scatter Search*.

Fonte: Adaptado de Belfiore 2006, Alegre, Laguna e Pacheco 2005, Sosa et al., 2007.

O primeiro passo (P1) do algoritmo apresentado diz respeito à construção de um conjunto inicial P, com n elementos. P2 consiste em aplicar o método de melhoria a cada uma das soluções geradas em P1. Em P3 é construído o ConjRef, com as b_1 melhores soluções de P e as b_2 soluções com maior diversidade em relação às soluções que se encontram em ConjRef. P4 realiza o agrupamento das soluções do ConjRef formando subconjuntos, os quais terão suas soluções combinadas. Em P5, aplica-se uma heurística de melhoria a cada solução combinada. Enquanto houver pelo menos uma nova solução, repetem-se os passos 4, 5 e 6. O algoritmo pára depois que o número

máximo de iterações desejadas seja alcançado ou outro critério de parada estabelecido.

CAPÍTULO IV

4 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

4.1 DESCRIÇÃO OPERACIONAL DO PROBLEMA

A abordagem proposta no âmbito da presente pesquisa direciona-se ao problema de roteirização de veículos coletores de resíduo comercial com janelas de tempo, em que se considera as múltiplas viagens aos locais de descarga e as pausas para o almoço dos motoristas.

O problema consiste em determinar os roteiros a serem seguidos pelos veículos coletores de resíduo comercial, de forma a minimizar o número de veículos e o tempo de viagem destes, garantindo que a demanda seja totalmente atendida sem que haja violação das restrições.

Problemas de coleta de resíduo são freqüentemente considerados como um problema de roteirização de arcos, sem janelas de tempo. Entretanto, esse ponto de vista pode ser aplicado apenas para problemas de coleta de resíduo residencial, uma vez que, na coleta de resíduo comercial, objeto de estudo desta tese, as paradas podem conter janelas de tempo. De acordo com Kim et al., 2006a, o problema de roteirização de veículos de coleta de resíduo comercial pode ser caracterizado como uma variação dos problemas de roteirização de veículos com janela de tempo e depósitos intermediários (VRPTW-IF). A variação maior em relação a um VRPTW padrão é devida às operações de descarga e ao intervalo de almoço do motorista. Quando um veículo encontra-se com sua capacidade esgotada, precisa dirigir-se até a área de aterro (depósito de resíduo) mais próximo e realizar a operação de descarga. Cada veículo pode, e tipicamente faz, múltiplas viagens de descarga por dia.

Como em um VRPTW típico, na abordagem desta tese, considera-se a existência de apenas uma garagem (local onde os veículos permanecem estacionados), uma área operacional (uma cidade), um número finito de veículos homogêneos, um conjunto de paradas e múltiplas áreas de aterro. Cada parada tem uma janela de tempo, ou seja, um intervalo de tempo dentro do qual o serviço deve ser inicializado, e uma quantidade de resíduo a ser coletado – demanda. Os veículos saem da garagem, coletam resíduos dos pontos de parada, até que seu limite de capacidade seja atingido, descarregam o material em uma das áreas de aterro, repetem a coleta e a descarga tantas vezes

quantas forem necessárias e possíveis (dependendo das restrições impostas ao problema), e, finalmente, retornam à garagem, dentro de um limite de tempo pré-estabelecido. Os motoristas dos veículos precisam de uma hora de pausa para o almoço, que pode ocorrer entre às 11 e às 13 horas, por exemplo.

Dois problemas de restrição de capacidade principais são considerados ao se criar uma rota: a capacidade do veículo e a capacidade da rota. A capacidade do veículo relaciona-se ao volume máximo que cada um pode conter e a distância máxima que cada um pode percorrer. A capacidade da rota é a capacidade diária para cada motorista/guarnição: número máximo de paradas e número máximo de descarregamentos. A capacidade do veículo determina quando o descarregamento da carga deve ser realizado. Se a capacidade do veículo for maior que o volume de capacidade da rota, haverá apenas uma viagem de descarga, e ela será a última antes do retorno à garagem. Se, porém, o volume coletado na rota for maior que a capacidade do veículo, múltiplas viagens de descarga serão necessárias em uma mesma rota. Uma vez que existem múltiplas áreas de descarga disponíveis, uma seleção cuidadosa deve ser realizada com o propósito de utilizar a que minimiza o valor da função objetivo. Cada veículo deve iniciar e terminar sua rota na garagem e com volume zero.

4.1.1 Características do Problema

As principais características do problema estudado são:

Gerais:

- veículos coletores de resíduo comercial;
- frota homogênea e ilimitada;
- existência de uma única garagem;
- existência de múltiplas áreas de aterro.

Tipo de rede:

- euclidiana;
- não-direcionada.

Estratégia de serviço:

- a demanda deve ser totalmente atendida;
- coletas diretas (não-fracionadas);
- a roteirização envolve coleta e descarregamento em áreas próprias;
- os veículos podem realizar múltiplas viagens aos locais de descarga;
- os veículos partem e retornam à mesma garagem ao final da jornada.

Restrições:

- janelas de tempo das paradas;
- horário de saída e de retorno dos veículos à garagem;
- capacidade dos veículos (volume e distância máxima percorrida);
- capacidade da rota (capacidade diária para cada motorista e/ou guarnição: número máximo de paradas a serem atendidas, número máximo de descarregamentos realizados, volume máximo que a guarnição pode manusear ao dia);
- pausa para almoço dos motoristas;
- o veículo deve sair e retornar à garagem vazio;
- viagens de descarga (quando um veículo está cheio, ele deve ir para a área de descarga).

Objetivos:

- minimizar o número de veículos;
- minimizar o tempo de viagem;

4.2 Formulação Matemática

A formulação matemática delineada a seguir tem por base o trabalho de Tung e Pinnoi ,(2000), que tratou de um problema de roteirização de veículos de resíduos comerciais. No presente estudo, efetiva-se a inclusão de restrições adicionais às impostas por Tung e Pinnoi, (2000), com o intuito de considerar a obrigatoriedade da pausa para o almoço dos motoristas e da guarnição e ainda, a existência de múltiplos locais para descarga dos resíduos.

Os pressupostos aplicados ao problema são:

1. A distância entre cada par de nós é conhecida e simétrica; o mesmo vale para o tempo de deslocamento entre os nós, já que a velocidade do veículo é considerada constante.
2. A frota obsoleta é plenamente amortizada e o custo de operação do veículo consiste em: custo de combustível, remuneração do operador e custo de manutenção. O custo de operação é, portanto, dependente da distância viajada, ou do tempo viajado.
3. O veículo pode chegar ao local da coleta antes do início de sua janela de tempo, porém, precisa esperar para iniciar o atendimento. O tempo de espera é penalizado com um custo igual ao custo do veículo rodando.

4. O tempo de serviço (carregamento/descarregamento) tem aproximadamente o mesmo custo que o de viagem pois, durante a realização de tal serviço, o motor hidráulico e o dispositivo de carga/descarga continua operando.
5. O volume de resíduo de cada ponto de coleta (parada), em cada janela de tempo, é conhecido.
6. As janelas de tempo são fixas, ou seja, o período dentro do qual o atendimento deve ser iniciado não pode, de forma alguma ser violado, nem mesmo sob a imposição de penalidades.
7. Cargas fracionadas não são permitidas.
8. Cada veículo pode cobrir apenas uma rota.
9. A demanda mínima em cada ponto de coleta, em cada janela, é equivalente a uma unidade de volume.
10. Todos os veículos em operação precisam de uma hora de pausa para o almoço, a qual deve ocorrer no intervalo das 11h às 13h. Considera-se que a pausa possa ocorrer em qualquer um dos pontos de coleta.¹

As seguintes notações são definidas:

Conjuntos

N' $\{i / i = 1\}$, o conjunto da garagem (local no qual os veículos permanecem estacionados).

N'' $\{i / i = 2,3, \dots, n\}$, o conjunto das áreas de aterro (locais onde os resíduos coletados são despejados).

$N_0 = N' \cup N''$, o conjunto da garagem e das áreas de aterro.

¹ Devido a complexidade da formulação matemática, considera-se que todos os veículos precisam da pausa para o almoço, independentemente do tempo de duração da rota.

N^* o conjunto dos pontos de coleta, numerados, consecutivamente, a partir de $(n + 1)$.

$N = N_0 \cup N^*$, o conjunto de todos os nós.

K o conjunto dos veículos.

$P_0 = \{p / p = 0\}$, representa a janela de tempo destinada à pausa para o almoço.

P^* o conjunto de janelas de tempo de um grupo de pontos; no caso da garagem, ou da área de descarga, ele representa os horários em que um veículo sai da garagem ou visita uma área de aterro.

$P = P_0 \cup P^*$ conjunto de todas as janelas de tempo, incluindo o almoço

Variáveis de decisão:

$x_{ipq} = \begin{cases} 1, & \text{se o ponto } i, \text{ na janela de tempo } p, \text{ é conectado ao ponto } j, \text{ na janela de tempo } q; \\ 0, & \text{em caso contrário, para todo } i, j \in N; p, q \in P. \end{cases}$

$y_{ipk} = \begin{cases} 1, & \text{se o ponto } i, \text{ na janela de tempo } p, \text{ é servido pelo veículo } k; \\ 0, & \text{em caso contrário, para todo } i \in N; p \in P; k \in K. \end{cases}$

w_{ip} total de carga quando o veículo deixa o ponto i na janela de tempo p , para todo $i \in N; p \in P$.

a_{ip} tempo de chegada do veículo ao ponto i na janela de tempo p , para todo $i \in N; p \in P$.

Parâmetros:

- L_{ip} limite inferior da janela de tempo p do ponto i , para todo $i \in N^*$; $p \in P$.
- U_{ip} limite superior da janela de tempo p do ponto i , para todo $i \in N^*$; $p \in P$.
- D_{ip} volume de resíduo do ponto i na janela de tempo p , para todo $i \in N^*$; $p \in P^*$.
- S_{ip} tempo de serviço do ponto i na janela de tempo p , para todo $i \in N \setminus \{1\}$; $p \in P^*$. No caso em que $p = 0$, o tempo de serviço será correspondente ao destinado para a pausa do almoço.
- t_{ij} tempo de viagem entre os pontos i e j , para todo $i, j \in N$.
- T_m tempo máximo de trabalho de um veículo em um turno.
- T_p duração da pausa para o almoço.
- V_k capacidade total do veículo k , para todo $k \in K$.
- V_m um número grande, o dobro da capacidade máxima dos veículos.
- B o número máximo de rotas que um veículo pode fazer em um turno.
- F o custo operacional fixo dos veículos.
- C custo operacional variável pela unidade de tempo viajada.

Note-se que as seguintes variáveis, x_{ipjq} , são fixadas para zero:

1. $x_{ip1q} = 0 \quad \forall i \in N^*$ e $p, q \in P$, uma vez que um veículo precisa passar pela área de descarga antes de retornar à garagem, ou seja, ele volta para a garagem vazio.
2. $x_{1pj} = 0 \quad \forall p, q \in P$ e $j \in P''$, uma vez que o veículo não sai da garagem e vai diretamente para a área de descarga.

3. $x_{ipjq} = 0 \quad \forall i, j \in N^*, p > q$ e $p, q \in P$, uma vez que as janelas de tempo são numeradas cronologicamente; para duas visitas consecutivas, a primeira janela de tempo deverá ser igual ou inferior à segunda.
4. $x_{1p1q} = x_{2q2q} = 0 \quad \forall q \in P$ e $x_{ipip} = 0 \quad \forall i \in N^*$; $p \in P$, uma vez que um nó não precisa ser revisitado durante a mesma janela de tempo, exceto no caso em que uma das janelas de tempo seja a destinada para a pausa do almoço.

Agora, pode-se escrever o modelo matemático como:

Minimizar

$$F \sum_{k \in K} \sum_{q \in P^*} y_{1qk} + C \sum_{q \in P^*} (a_{1q} - T_p \cdot \sum_{k \in K} \sum_{q \in P^*} y_{1qk}) \quad (4.1)$$

A função objetivo (4.1) minimiza o custo total de operação, incluindo o custo fixo e o custo variável. Deste último é decrescido, para cada veículo, o tempo destinado à pausa para o almoço (T_p).

Sujeita à:

$$\sum_{i \in N} \sum_{p \in P^*} x_{ipjq} = \sum_{k \in K} y_{jqk} \quad \forall j \in N; q \in P^* \quad (4.2)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{q \in P^*} x_{ipjq} = \sum_{k \in K} y_{ipk} \quad \forall i \in N; p \in P^* \quad (4.3)$$

$$\sum_{k \in K} y_{ipk} \leq 1 \quad \forall i \in N; p \in P^* \quad (4.4)$$

$$\sum_{k \in K} y_{i0k} = 1 \quad \forall i \in N \quad (4.5)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{p \in P^*} x_{ipj0} = \sum_{k \in K} y_{j0k} \quad \forall j \in N, \quad (4.6)$$

$$y_{ipk} - y_{jqk} \leq 1 - x_{ipjq} \quad \forall i, j \in N; p, q \in P^*; k \in K, \quad (4.7)$$

$$y_{ipk} - y_{jqk} \geq x_{ipjq} - 1 \quad \forall i, j \in N; p, q \in P^*; k \in K, \quad (4.8)$$

$$D_{ip} \sum_{k \in K} y_{ipk} \geq D_{ip} \quad \forall i \in N^*; p \in P^*, \quad (4.9)$$

$$\sum_{k \in K} y_{ipk} \leq D_{ip} \quad \forall i \in N^*; p \in P^*, \quad (4.10)$$

$$\sum_{p \in P^*} y_{1pk} \leq 1 \quad \forall k \in K, \quad (4.11)$$

$$\sum_{p \in P^*} y_{2pk} \leq B \sum_{p \in P^*} y_{1pk} \quad \forall k \in K, \quad (4.12)$$

$$w_{ip} - V_m(1 - y_{ipk}) \leq V_k \quad \forall i \in N^*; p \in P^*; k \in K, \quad (4.13)$$

$$w_{jq} - D_{jq} - w_{ip} \geq -V_m(1 - x_{ipjq}) \quad \forall i \in N; j \in N^*; p, q \in P^*, \quad (4.14)$$

$$w_{jq} - D_{jq} - w_{ip} \leq V_m(1 - x_{ipjq}) \quad \forall i \in N; j \in N^*; p, q \in P^*, \quad (4.15)$$

$$w_{ip} = 0 \quad \forall i \in N_0; p \in P^*, \quad (4.16)$$

$$a_{jq} \geq t_{1j} - T_m(1 - x_{1pj}) \quad \forall j \in N^*; p, q \in P, \quad (4.17)$$

$$a_{jq} \geq a_{ip} + S_{ip} + t_{ij} - T_m(1 - x_{ipjq}) \quad \forall i \in N \setminus \{1\}; j \in N; p, q \in P, \quad (4.18)$$

$$a_{ip} \leq U_{ip} \quad \forall i \in N^*; p \in P, \quad (4.19)$$

$$a_{ip} \geq L_{ip} \quad \forall i \in N^*; p \in P, \quad (4.20)$$

$$a_{1q} \leq T_m \quad \forall q \in P, \quad (4.21)$$

$$x_{ipjq}, y_{ipk} \text{ binários} \quad \forall i, j \in N; p, q \in P; k \in K, \quad (4.22)$$

$$\text{demais variáveis são não-negativas.} \quad (4.23)$$

As restrições (4.2), (4.3) e (4.4) exigem que cada ponto, em cada janela de tempo, seja servido por apenas um veículo.

A garantia de que cada veículo tenha uma pausa para o almoço é estabelecida pelas restrições (4.5) e (4.6).

A continuidade da rota é colocada pelas restrições (4.7) e (4.8), que asseguram, para cada par de pontos conectados, a visitada pelo mesmo veículo.

As restrições (4.9) e (4.10) fazem com que todos os pontos com demanda (resíduo) igual ou superior a uma unidade sejam visitados e, ainda, que os demais pontos não precisem ser servidos.

A restrição (4.11) requer que cada veículo seja utilizado em apenas uma sub-rotas² e (4.12) indica que a rota inicia a partir da garagem e respeita o número máximo de rotas permitido para cada veículo em determinado turno.

Enquanto a restrição (4.13) garante que os resíduos presentes em uma carga, em momento algum, sejam superiores à capacidade do veículo, as restrições (4.14) e (4.15) calculam o volume de resíduo acumulado em um veículo. Desta forma, sempre que a capacidade do veículo for esgotada, o mesmo deverá seguir para uma das áreas de descarga. A restrição (4.16) faz com que o volume da carga seja igual a zero, sempre que o veículo visita uma das áreas de descarga ou a garagem.

O tempo de chegada a um ponto, em determinada janela de tempo, é atualizado nas restrições (4.17) e (4.18).

² Sub-rotas: é uma seqüência de pontos que um veículo visita antes de dirigir-se à uma área de descarga.

As restrições (4.19) e (4.20) checam, respectivamente, o limite inferior e o limite superior de uma determinada janela de tempo.

A jornada de trabalho é considerada na restrição (4.21), a qual evidencia que, para cada veículo, o total de tempo de trabalho, equivalente ao tempo de retorno ao depósito, seja menor que o tempo máximo de jornada de trabalho permitido.

A restrição (4.22) exige que x_{ipjq} e y_{ipk} sejam variáveis binárias e (4.23) impõe que as demais variáveis sejam não-negativas.

4.3 COMPLEXIDADE DO PROBLEMA E ESTRATÉGIAS DE SOLUÇÃO

Conforme exposto nos capítulos iniciais, o problema de roteirização de veículos com janelas de tempo é NP-hard. Considerando-se este fator, mais as múltiplas viagens de descarga, o almoço dos motoristas e o grande tamanho dos problemas em questão, abordagens heurísticas são uma escolha natural para sua resolução.

Partindo-se desse pressuposto, a estratégia de solução a ser utilizada consiste na adaptação da Heurística de Inserção Sequencial II de Solomon, (1987) a qual tem o propósito de assegurar as soluções iniciais para a implementação da metaheurística *Scatter Search*. O procedimento da referida metaheurística permitirá a exploração dessas soluções iniciais, a partir de uma seleção que prioriza não somente a qualidade dessas, mas também sua diversidade, evitando mínimos locais. Além disso, possibilitará a combinação das soluções selecionadas, visando obter maior qualidade nos resultados, que serão melhorados durante o processo, com o intuito de chegar a uma solução satisfatória.

CAPÍTULO V

5 IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO UTILIZADO

O propósito do presente capítulo vincula-se ao detalhamento dos algoritmos implementados para a resolução do problema abordado. Intenciona-se contribuir para o desenvolvimento de novos métodos de solução em VRPTW, a partir da implementação da metaheurística *Scatter Search* para o problema de roteirização de veículos de coleta de lixo comercial com restrições de janelas de tempo. Para tal, a Heurística de Inserção Seqüencial II de Solomon, estendida por Kim, Kim e Sahoo (2006a), será adaptada com o intuito de assegurar as soluções iniciais para a implementação da metaheurística *Scatter Search*, a qual explora novos espaços de soluções, a fim de melhorar a solução inicial obtida.

Na seção 5. encontra-se delineada, de forma precisa, a heurística construtiva implementada para o problema estudado, bem como suas devidas adaptações. A posteriori, no item 5.2, descreve-se a reestruturação dos passos da metaheurística *Scatter Search*.

5.1 ADAPTAÇÃO DA HEURÍSTICA DE INSERÇÃO SEQÜENCIAL II DE SOLOMON

Enquanto na Heurística de Inserção Seqüencial II de Solomon (1987) a rota é iniciada com a seqüência [depósito, parada semente, depósito], nesse trabalho, utiliza-se uma extensão sugerida por Kim, Kim e Sahoo, (2006a), que considera a pausa para o almoço dos motoristas e ainda as visitas às áreas de descarga.

Na inicialização do algoritmo todas as paradas são classificadas como não_roteadas. Uma rota vazia para um veículo é gerada e rotulada como rota_atual (R). A checagem do almoço em R é identificada como “ainda_não”. É também criada uma sub-rota de R, SR, cuja seqüência é: [garagem, parada semente, pausa para almoço, área de aterro mais próxima da garagem, garagem], conforme pode ser visualizado na Figura 2, a seguir.

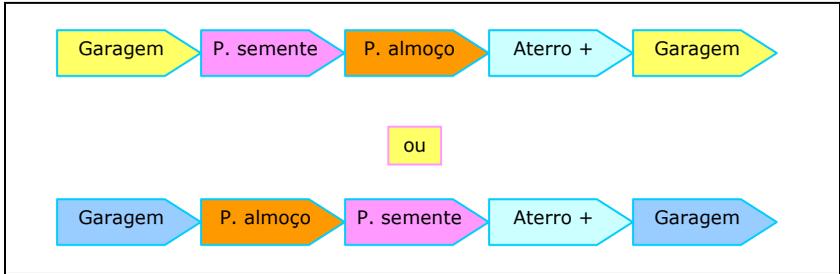


Figura 2 - Sub-rotas inicial

A construção de SR é iniciada pela escolha da parada semente, que será realizada de acordo com um dos critérios a seguir:

- a) a parada mais distante da garagem;
- b) a parada que possui a janela de tempo com finalização mais cedo;
- c) a parada com menor intervalo de janela de tempo;
- d) aleatório.

Subsequentemente à escolha da parada semente, o processo divide-se em dois passos e corresponde à inserção de uma nova parada (u) à rota. Essa escolha será efetivada a partir das funções c_1 e c_2 , estabelecidas por Solomon (1987) e já explicitadas no item 2.4.2 desse trabalho. A priori, determina-se a melhor posição de inserção para cada parada u, que ainda não tenha sido alocada a nenhuma rota, calculando-se para cada uma delas, a melhor posição viável de inserção, que é aquela que minimiza o acréscimo de custo de transporte e tempo causados pela inserção (função c_1). No segundo passo determina-se qual parada u será inserida na rota, que será aquela que possui o menor acréscimo de custo e tempo (função c_2), ver Figura 3.

Cabe lembrar que os valores dos parâmetros $\alpha_1, \alpha_2, \lambda$ e μ , envolvidos no cálculo das funções supracitadas, serão escolhidos a partir de testes computacionais.

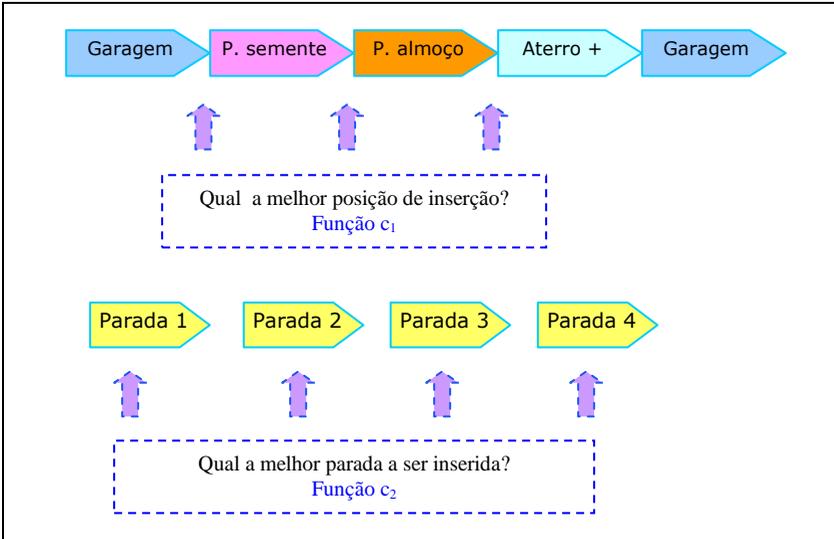


Figura 3 - Inserção de novas paradas à rota.

Na continuidade do processo as paradas serão alocadas em SR enquanto a capacidade do veículo não for atingida. Quando o veículo estiver lotado, a sub-rote será finalizada e acrescentada na Rota atual. Antes, porém, é verificado, entre as áreas de aterro existentes, qual é a mais econômica – se não for a área mais próxima da garagem, a qual já faz parte da sub-rote, será efetivada a troca (Figura 4).

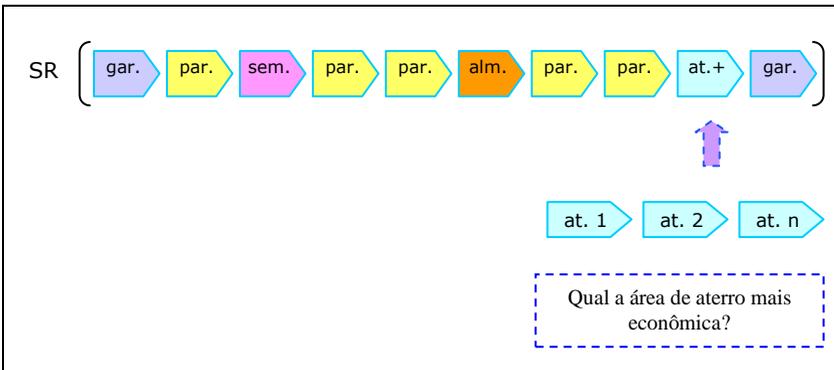


Figura 4 - Finalização da sub-rote

Como a pausa para o almoço afeta a factibilidade das paradas que formam a rota, ela permanece inserida explicitamente na sub-rote inicial e assume a mesma localização da parada imediatamente anterior a ela. Caso o término da sub-rote se dê em um intervalo anterior à hora estabelecida para o almoço, a respectiva pausa será removida antes de ser acrescentada em R (Figura 5).

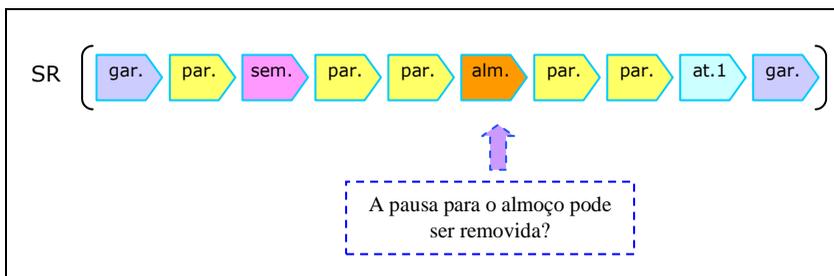


Figura 5 - Remoção da pausa para o almoço

A Rota atual, que estava vazia, apresenta-se agora com a seguinte seqüência: [garagem, paradas inseridas, pausa para almoço, paradas inseridas³, área de aterro mais econômica, garagem]. Enquanto houver viabilidade de inserção, a rota atual terá continuidade. Nesse caso, a última parada, a garagem, será suprimida da rota atual e uma nova sub-rote de R será formada. Serão duas as possibilidades de seqüência inicial para a nova sub-rote:

1ª) no caso em que a pausa para o almoço não foi realizada em R atual (Figura 6).

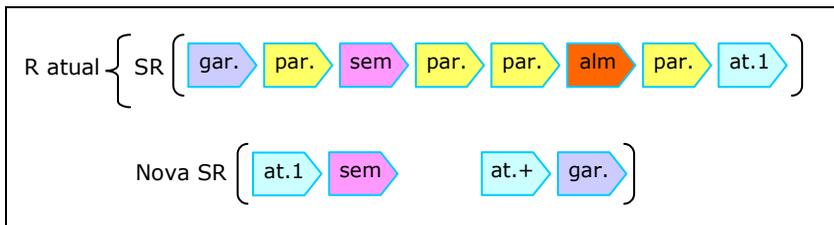


Figura 6 - Seqüência inicial sem parada para almoço

³ Existe a possibilidade de que todas as paradas sejam inseridas antes da pausa para o almoço ou ainda, a possibilidade de serem inseridas apenas depois da respectiva pausa, ocasionando, nesse último caso, a exclusão da mesma.

2ª) no caso em que a pausa para o almoço já foi realizada em R atual (Figura 7).

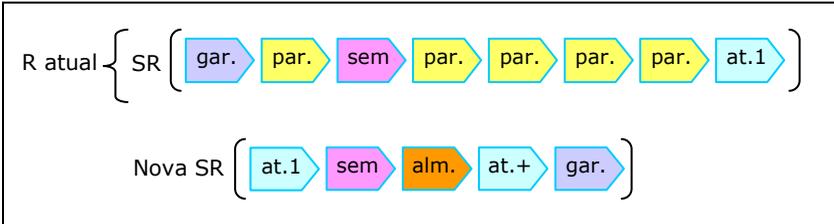


Figura 7 - Sequência inicial com parada para almoço

Quando a continuidade da construção da Rota atual for infactível, devido às restrições impostas ao problema, a referida rota será finalizada e uma nova rota gerada. O processo é repetido até que todas as paradas sejam atendidas. Supõe-se que haja tantos veículos quanto necessários, para atender a cada uma das rotas. A seguir, na Figura 8, visualiza-se uma solução com duas rotas finalizadas.

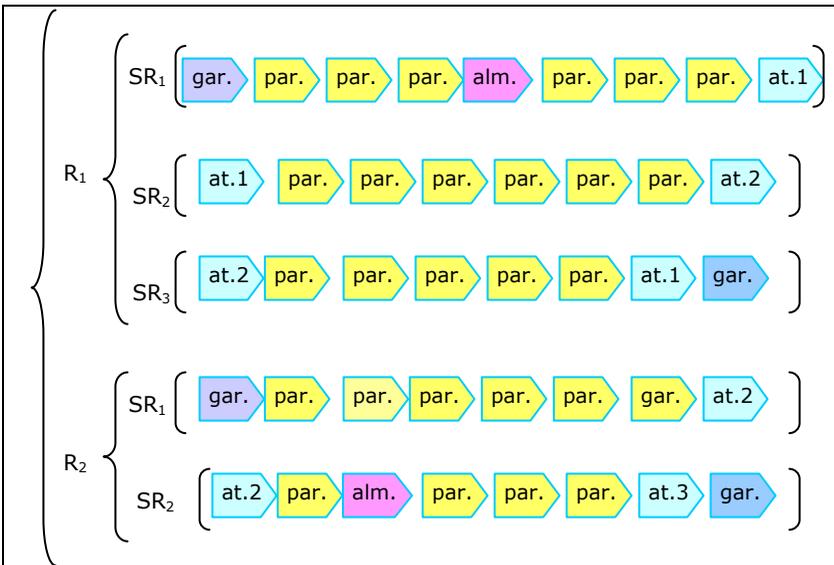


Figura 8 - Solução com duas rotas

5.2 METAHEURÍSTICA SCATTER SEARCH

Para tornar a *Scatter Search* compatível com as restrições do problema abordado nesse estudo, serão realizadas alterações em cada um dos seus cinco passos, algumas delas, bastante significativas, conforme é exposto a seguir.

Passo 1: Geração de soluções diversas

Para corresponder ao princípio do método de SS, que é o de gerar soluções suficientemente dispersas, utilizou-se da técnica empregada com eficiência por Belfiore, (2006), intitulada GRASP construtiva (GRACO), a qual incorpora elementos aleatórios na heurística mencionada no item 5.1 do presente capítulo.

O método GRACO baseia-se na primeira fase do método GRASP (*greedy randomized adaptive search procedure*) e consiste em gerar diversas soluções utilizando-se de um componente aleatório.

Na heurística de inserção seqüencial o método GRACO foi empregado na inicialização do processo de construção da rota, ou seja, na escolha da parada semente e da parada não roteada a ser inserida. Sendo assim, ao invés de escolher, por exemplo, a parada mais distante da garagem para ser inserida na sub-rota, realiza-se uma escolha aleatória entre as k paradas mais distantes e sua localização será entre as k paradas mais próximas. O cálculo do critério de proximidade será dado em função do acréscimo de tempo causado pela inserção de uma nova parada à rota e o número de paradas k a ser considerado é a porcentagem α do número total de paradas que serão atendidas, em que α será estipulado a partir de testes computacionais.

Passo 2 - Melhoria em cada solução diversa

O método de melhoria, que é aplicado a cada uma das P soluções geradas pelo passo anterior, é realizado em duas etapas, como segue:

1ª etapa

A primeira etapa do procedimento de melhoria objetiva realizar a verificação dos aterros mais econômicos a serem utilizados na rota (Figura 9). Essa verificação não será efetivada no caso em que o aterro é a última parada antes do retorno à garagem, pois, o cálculo da mesma

já foi realizado no procedimento de inserção. No entanto, as demais visitas ao aterro durante a realização de uma rota, caso existam, podem ainda ser passíveis de melhoria.

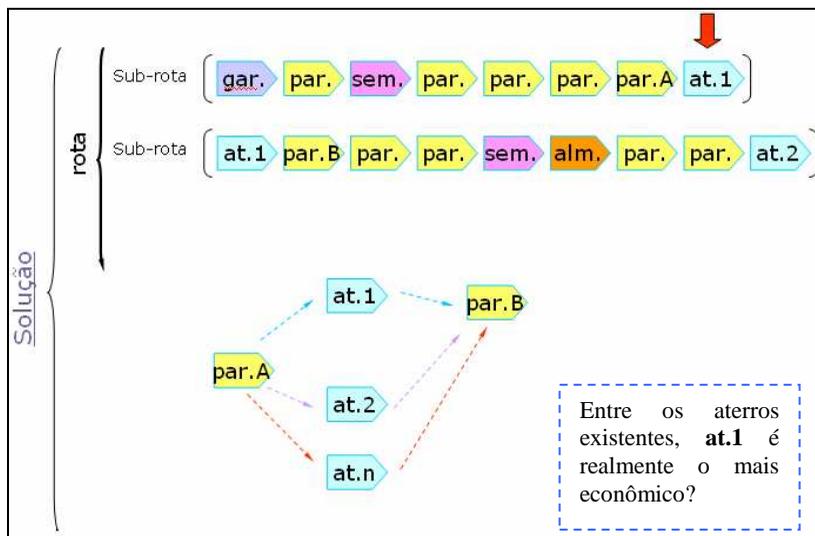


Figura 9 - Escolha do aterro mais econômico

2ª etapa

A segunda etapa do processo de melhoria destina-se ao ajuste do horário de saída dos veículos da garagem com a finalidade de diminuir os tempos de espera que porventura ocorram durante a execução da rota. O procedimento é executado a partir de dois cálculos:

- i) Somatório do total dos tempos de espera ocorridos durante a rota;
- ii) folga em cada ponto de parada, que equivale à diferença entre o tempo mais tardio em que o serviço pode ser iniciado (fim da janela de tempo) e o horário em que o veículo chega ao local designado para a prestação do serviço.

Se, entre as paradas anteriores à última parada que apresentou tempo de espera, nenhuma tenha folga inferior ao tempo total de espera da rota, esse será acrescido ao horário de saída da garagem sem que haja violação das janelas de tempo. Nos casos em que a folga, em algum

ponto de parada, for menor que o somatório dos tempos de espera, acrescenta-se ao horário de saída do veículo da garagem apenas o valor da menor folga. Nesse último caso, os tempos de espera, para determinados pontos de parada, não serão suprimidos, mas sim, decrescidos (ver Figuras 10 e 11).

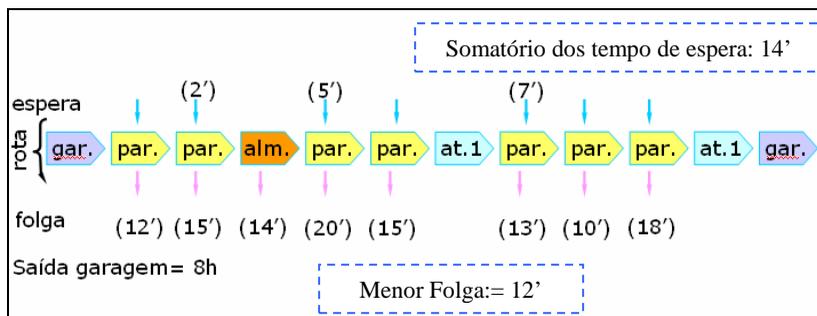


Figura 10 - Tempos de espera e folgas em uma rota.

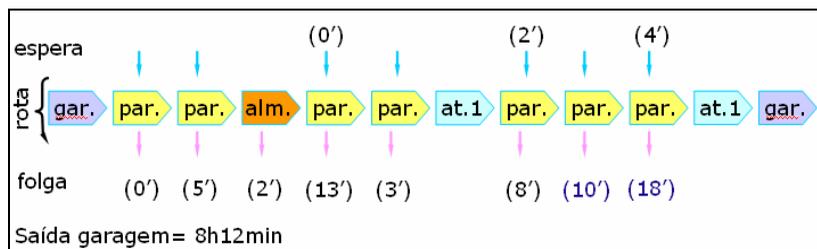


Figura 11 - Tempos de espera e folgas em uma rota após ajuste de saída da garagem.

Passo 3 – Criação e atualização do conjunto de referência

Passo 3.1 – Criação do conjunto de referência

A partir do conjunto de soluções diversas P, são extraídas b soluções (aproximadamente 10), que formarão o ConjRef e serão divididas em dois subconjuntos b_1 e b_2 :

As melhores b_1 soluções do conjunto P, que minimizam a Função Objetivo do problema, são automaticamente incluídas em ConjRef. As demais b_2 soluções são acrescentadas com o intuito de fazer com que a diversidade de soluções do ConjRef seja a maior possível. Desta forma,

compara-se as soluções pertencentes à P com as b_1 soluções já incluídas em ConjRef a fim de determinar a diversidade entre as mesmas. Para tanto, lista-se o número de arcos comuns entre cada uma das soluções candidatas à pertencer ao subconjunto b_2 e as b_1 soluções já contidas em ConjRef. A solução que apresentar menor número de arcos comuns será classificada como a “mais diversa/distante” e inserida em b_2 . O processo de inserção é repetido até que o número desejado de elementos em b_2 seja atingido.

A título de exemplificação, coloca-se na Figura 12, um conjunto de referência composto por três melhores soluções (S12, S67 e S43), retiradas de um total de cem soluções diversas e verifica-se, entre duas outras soluções (S1 e S2), qual é a mais diversa.

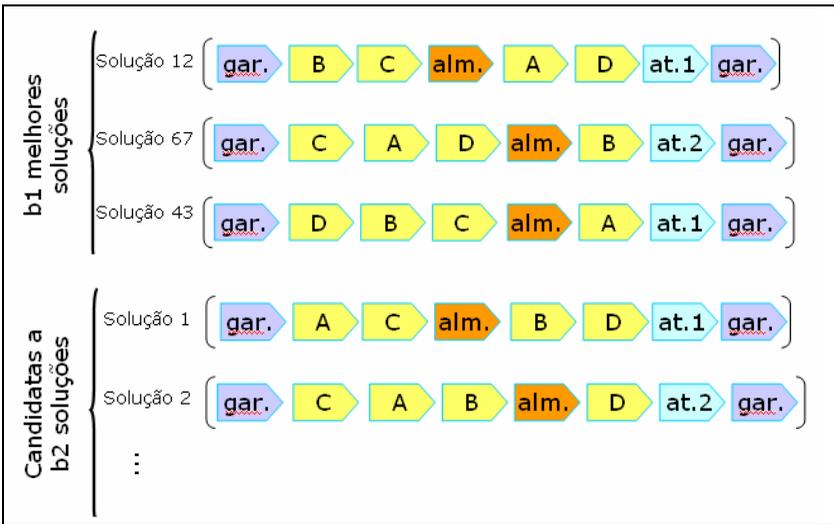


Figura 12 - Conjunto de referência

Os número de arcos direcionados comuns entre S1 e S12, entre S1 e S67 e entre S1 e S43, é igual a zero. Já o número de arcos comuns entre S2 e S12 é três, e entre S2 e S67 e entre S2 e S43 é zero. Portanto, S1 não possui nenhum arco direcionado comum com as b_1 soluções do conjunto de referência e S2 possui três arcos direcionados comuns. Logo, entre as duas soluções, a mais diversa é S1.

Passo 3.2 – Atualização do conjunto de referência

No que diz respeito ao momento em que a atualização será efetivada, optou-se por utilizar a forma estática, na qual o conjunto de referência não muda até que todas as combinações de soluções do ConjRef tenham sido executadas.

Em relação aos critérios de aceitação de uma nova solução, considera-se a qualidade e a diversidade (QD) de uma nova solução e ainda apenas a qualidade (Q).

Passo 4 – Geração de subconjuntos

Neste passo, considera-se todos os subconjuntos do Conjunto de Referência de dois elementos (soluções), ou seja, subconjuntos do tipo 1.

Caso o conjunto referência fosse o da Figura 13, a seguir, as soluções combinadas seriam as apresentadas no Quadro 3.

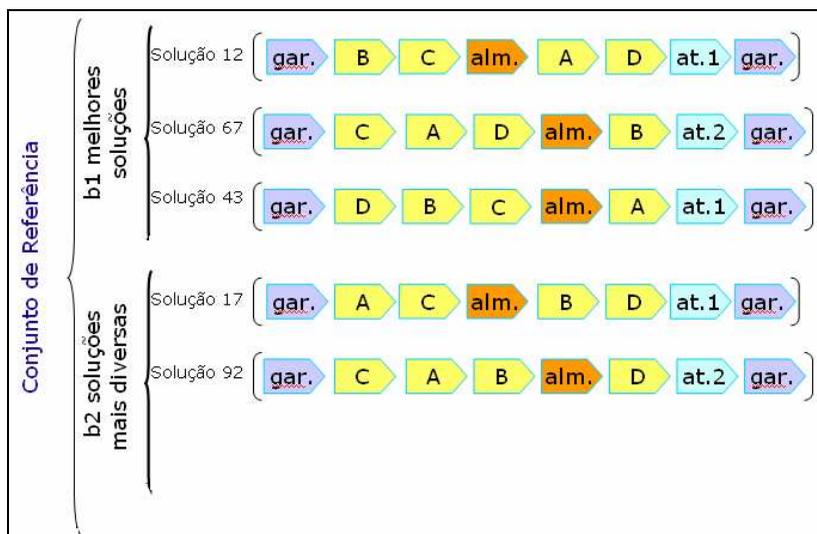


Figura 13 - Soluções pertencentes ao conjunto de referência

Solução 12 X Solução 67	Solução 12 X Solução 43
Solução 12 X Solução 17	Solução 67 X Solução 43
Solução 12 X Solução 92	Solução 67 X Solução 17
Solução 67 X Solução 92	Solução 17 X Solução 92

Quadro 3 - Soluções a combinar

Passo 5 – Combinação das soluções

O método de combinação de soluções a ser aplicado nos subconjuntos obtidos em P4 divide-se em duas etapas:

A primeira delas, que ocupa-se da identificação de quais rotas, pertencentes às soluções contidas em um subconjunto criado em P4, serão combinadas, é efetivada da seguinte maneira:

Dado um subconjunto com as seguintes soluções a serem combinadas, figura 14:

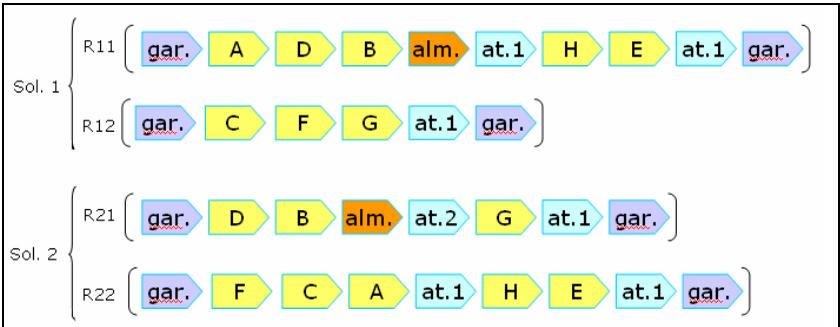


Figura 14 - Soluções a serem combinadas

Constrói-se a matriz $S_1 \times S_2$, a qual possibilitará a identificação do número de arcos direcionados comuns entre cada uma das rotas das soluções. Cabe lembrar que durante a realização desse processo as visitas às áreas de aterro, assim como a pausa para o almoço e a garagem, serão desconsideradas. Os dados obtidos pela construção da matriz $S_1 \times S_2$ definirá, a partir do número de arcos direcionados comuns

entre cada uma das rotas das soluções, quais rotas serão combinadas. Desta forma, a combinação que tiver o maior número de arcos direcionados comuns, terá preferência sobre as demais. Na Figura 15, exemplifica-se a construção da matriz de combinação de S_1 e S_2 .

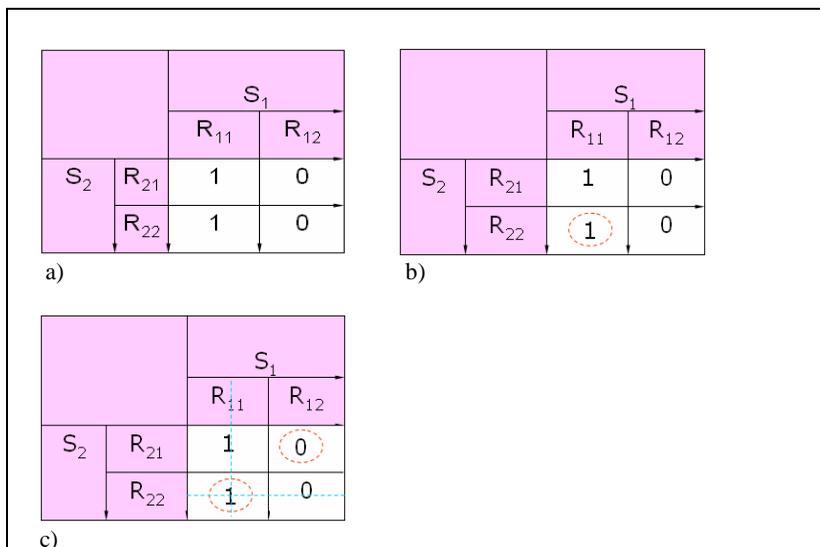


Figura 15 - Exemplo de construção da matriz de combinação.

No exemplo dado pela Figura 15, constata-se um empate entre o número de arcos direcionados comuns das rotas $R_{11} \times R_{21}$ e $R_{11} \times R_{22}$, (Figura 15a) nesse caso, opta-se por combinar qualquer uma delas, digamos, $R_{11} \times R_{22}$ (Figura 15b). Como as rotas R_{11} e R_{22} já foram combinadas e, portanto, desconsideradas na continuidade do processo, resta apenas a opção da combinação entre R_{12} e R_{21} (Figura 15c).

Existe a possibilidade de sobrar uma ou mais rotas de determinada solução sem serem combinadas, as quais serão simplesmente eliminadas sem que haja detrimento à finalização do procedimento.

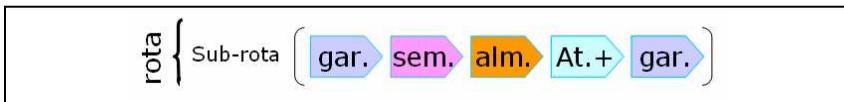
A segunda etapa, que se destina à combinação das rotas propriamente dita, é realizada da seguinte forma:

- i) os arcos direcionados comuns das duas rotas a serem combinadas são colocados em uma lista denominada “Lista de Arcos Direcionados Comuns” – LADC.

- ii) todas as paradas da solução, independentemente de estarem nas rotas combinadas ou pertencerem à LADC, são rotuladas como “não roteadas”.
- iii) é iniciada a construção de uma rota que substituirá as rotas combinadas $R_{11} \times R_{22}$ e que pertencerá à Solução Resultante. O procedimento de construção segue o mesmo princípio do primeiro passo da metaheurística Scatter Search: construção do conjunto de soluções diversas, diferindo desse em dois detalhes:
 - a) como o objetivo é construir apenas uma solução, o valor da constante k é fixado em 2;
 - b) quando a parada selecionada para ser inserida na rota pertence à LADC, então, não somente a parada é inserida, mas o(s) arco(s) ao(s) qual(ais) ela pertence, desde que a inserção do(s) mesmo(s) seja factível.

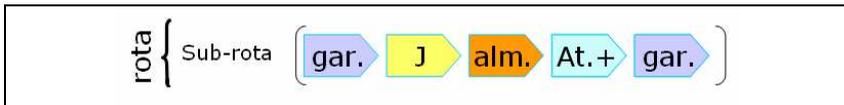
Por exemplo:

Paradas não-roteadas = A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L
 LADC = (AB, CD, EF, FG, HI)



Parada selecionada: J

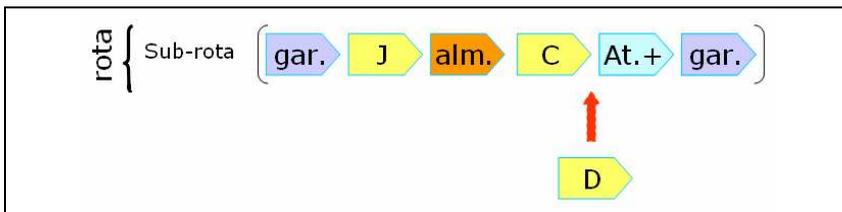
Como a parada selecionada não pertence à LADC, J é inserida na rota e uma próxima escolha é realizada;



Paradas não-roteadas = A, B, C, D, E, F, G, H, I, K, L
 LADC = (AB, CD, EF, FG, HI)
 Parada selecionada: C

Nesse caso, se factível, será inserido na rota o arco CD e não apenas a parada C. O arco CD é excluído da LADC mesmo que a parada

D não possa ser inserida devido às restrições do problema e uma próxima escolha é efetivada ;

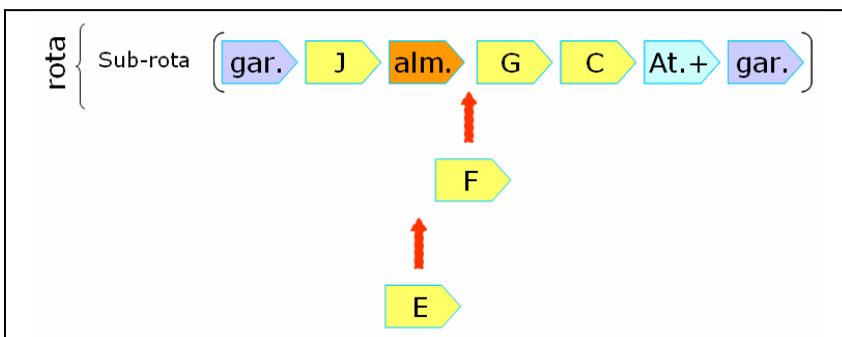


Supondo infactibilidade de inserção da parada D, apenas a parada anteriormente seleccionada, a parada "C", é inserida na rota. Retira-se o arco CD da LADC e a parada D continua na lista de paradas não roteadas.

Paradas não-roteadas = A, B, D, F, G, H, I, K, L
LADC = (AB, EF, FG, HI)

Parada seleccionada: G

Caso factível, insere-se o arco FG, que é excluído da LADC. Além disso, verifica-se a possibilidade de inserir também a parada E, que faz arco com a última parada inserida, nesse caso, a parada F.



Existe ainda a possibilidade de que a parada seleccionada pertença a mais de um arco. Digamos que, na última inserção, em vez da parada G, a parada F tenha sido seleccionada. Nesse caso, insere-se F, na seqüência verifica-se a possibilidade de inserção da parada E, já que o arco EF aparece antes na LADC e finalmente, se factível, insere-se G.

Durante a inserção, a ordem dos arcos nunca é alterada e procura-se inserir não apenas arcos, mas também, seqüência de arcos, para que a rota resultante da combinação de duas outras seja construída priorizando a permanência das características que essas tinham em comum.

A rota é construída até que todas as paradas tenham sido inseridas na rota ou até que a capacidade da mesma tenha sido atingida.

No caso em que a capacidade da rota seja atingida e haja paradas ainda não atendidas, inicia-se a construção de uma nova rota pela combinação de duas outras rotas pertencentes às soluções combinadas. Na LADC das novas rotas combinadas, serão excluídos os arcos cujas paradas já foram atendidas pela(s) rota(s) anterior(es). Quando todas as combinações de rotas tenham sido realizadas e mesmo assim sobrem paradas não roteadas, inicia-se uma nova rota, dentro da solução, para que as mesmas sejam inseridas.

Quando todas as combinações das soluções pertencentes ao conjunto de referência forem realizadas, aplica-se, em cada Solução Resultante, o Método de melhoria – segundo passo da metaheurística *Scatter Search*. Posteriormente, o conjunto de Referência será atualizado e, enquanto houver uma nova solução em ConjRef, o processo de combinação é repetido. Em caso contrário, o conjunto de referência é reconstruído excluindo-se dele as b_2 piores soluções. Uma nova escolha para compor b_2 é efetivada, levando-se em consideração as b_1 soluções do ConjRef e uma iteração do método *Scatter Search* é computada. Como critério de parada será estabelecido: a) número máximo de iterações (ainda não definido); b) um tempo máximo de processamento ou c) quando não houver alteração do ConjRef após ser realizada a reconstrução do subconjunto b_2 .

A seguir, na Figura 16, apresenta-se o algoritmo da metaheurística *Scatter Search* a ser implementado.

P1: Gerar o conjunto P de n soluções diversas (método de diversificação)
P2: Aplicar método de melhoria
P3: Construir o conjunto de referência: selecionar as b_1 melhores soluções e as b_2 soluções mais diversas de P para construir o ConjRef.
Número de iterações = 0
Novas Soluções = Verdadeiro
Enquanto (número de iterações < número máximo de iterações estabelecido) faça
Enquanto houver Novas Soluções em ConjRef faça
P4: Gerar subconjuntos e aplicar o método de combinação
P5: Aplicar o método de melhoria em cada solução combinada
P6: Atualizar ConjRef considerando as novas soluções
Fim Enquanto
P7: Reconstruir ConjRef: remover as b_2 piores soluções de ConjRef. Escolher as b_2 soluções mais distantes e adicioná-las ao ConjRef.
Número de Iterações = Número de iterações + 1
Fim Enquanto

Figura 16 - Algoritmo da *Scatter Search*

Fonte: Adaptado de Belfiore, 2006, Alegre, Laguna e Pacheco, 2005 e Sosa et al., 2007.

O Primeiro passo (P1) do algoritmo apresentado diz respeito à construção de um conjunto inicial P, com n elementos. P2 consiste em aplicar o método de melhoria a cada uma das soluções geradas em P1. Em P3 é construído o ConjRef, com as b_1 melhores soluções de P e as b_2 soluções com maior diversidade em relação às soluções que encontram-se em ConjRef. P4 realiza o agrupamento das soluções do ConjRef formando subconjuntos, os quais terão suas soluções combinadas. Em P5 aplica-se os procedimentos de de melhoria a cada solução combinada. Enquanto houver pelo menos uma nova solução, repete-se os passos 4, 5 e 6. O ConjRef é reconstruído por P7, o que corresponde a uma iteração do método SS. O algoritmo pára depois de atingir o número máximo de iterações; quando na reconstrução do subconjunto b_2 não for constatada nenhuma alteração no ConjRef ou ainda depois de um determinado tempo de processamento.

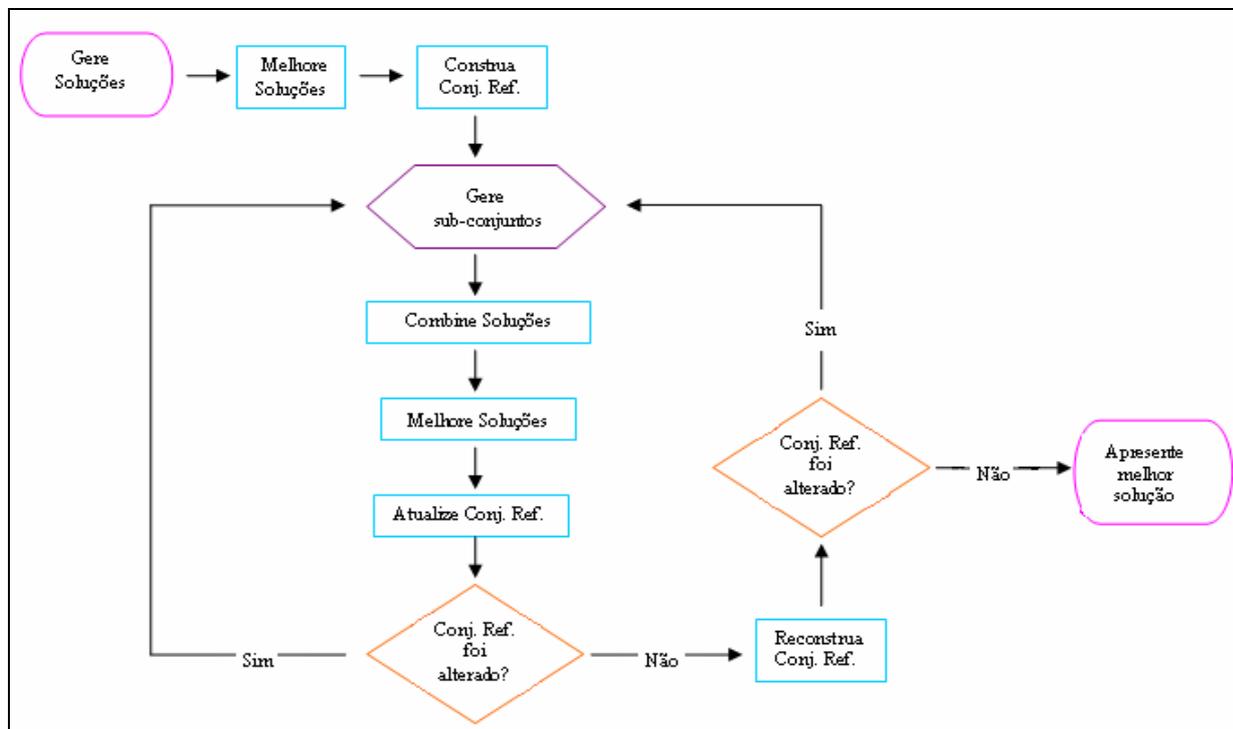


Figura 17 - Esquema da metaheurística *Scatter Search*.

CAPÍTULO VI

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com o propósito de realizar uma análise mais detalhada do comportamento do algoritmo proposto, muitos dos parâmetros envolvidos na implementação do modelo (critério da escolha da parada semente, valores de α_1 , de α_2 , de λ , de μ , do número de elementos pertencentes ao conjunto de soluções diversas e ao conjunto de referência, tipo de atualização do conjunto de referência, entre outros) são propositalmente deixados como dado de entrada. Grande parte desses parâmetros encontram-se atrelados à primeira etapa do procedimento, a qual gera as soluções que farão parte do chamado conjunto de soluções diversas. Utilizando-se de problemas de referência de Kim, Kim e Sahoo, (2006b), contendo 102, 444 e 804 paradas a serem atendidas e mais que uma área de aterro, realizou-se testes que possibilitaram a calibração dos referidos parâmetros que, posteriormente, foram utilizados nos demais problemas de referência disponibilizados pelos autores.

6.1 Calibração de Parâmetros

A seguir, encontram-se descritos os testes realizados nos parâmetros supracitados.

a) Critério da escolha da parada semente

Na escolha da parada semente, quatro opções foram testadas: na primeira delas, a escolha foi aleatória, na segunda, a escolha foi dada pelas k paradas com tempo de finalização mais cedo (menor b_i). Na terceira opção, pelas k paradas com menor janela de tempo e finalmente, pelas k paradas mais distantes da garagem. Os testes foram efetivados mediante a coleta de dez soluções geradas para cada uma das quatro

opções de critérios para a escolha da parada semente, totalizando 40 amostras. Os resultados obtidos são mostrados nos gráficos 1 e 2, a seguir.

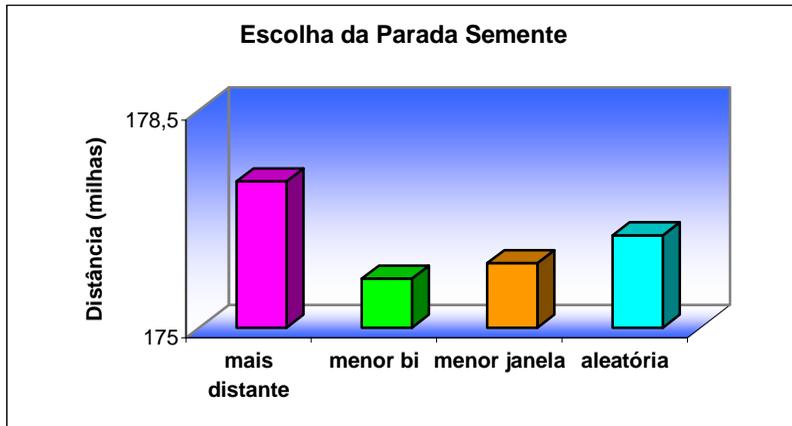


Gráfico 1 - Escolha da parada semente: problema com 102 paradas regulares.

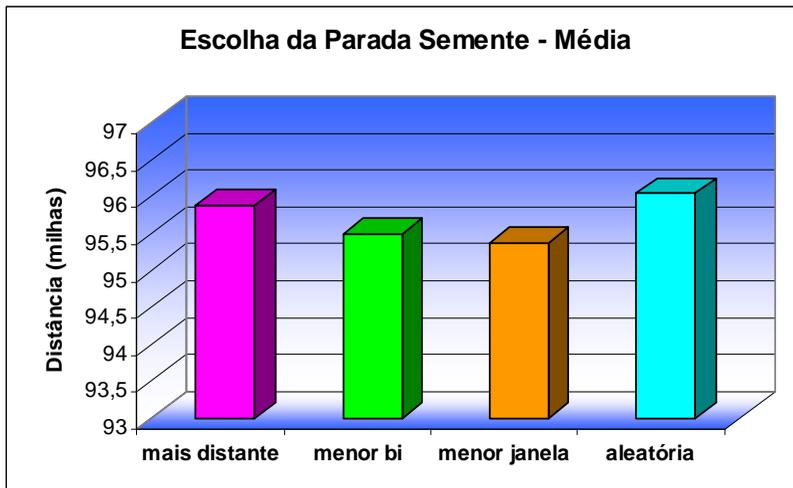


Gráfico 2 - Escolha da parada semente: problema com 444 paradas regulares.

Após coleta das amostras, as mesmas foram submetidas ao teste da ANOVA, pelo qual não se comprovou diferença entre as médias nos problemas testados. Entretanto, das opções testadas, a que obteve menor variância, foi a “menor janela de tempo”, para o problema de 102 paradas e “aleatória” para o problema de 444 paradas.

b) Variação nos valores dos parâmetros α_1 e α_2

Na escolha da próxima parada a ser inserida na rota, os parâmetros α_1 e α_2 privilegiam, respectivamente, a minimização da distância acrescida na rota pela inserção da nova parada e a minimização do acréscimo de tempo no atendimento da parada posterior à parada a ser inserida na rota. Quanto maior o valor de α_1 , maior será a preferência pela inserção de uma parada que minimize a distância a ser acrescida na rota. Por outro lado, quanto maior o valor de α_2 , maior será a preferência pela inserção de uma parada que minimize o acréscimo de tempo na inicialização do serviço da parada posterior à parada a ser inserida. Os resultados obtidos pelos testes realizados podem ser visualizados nos gráficos 3, 4 e 5, a seguir. Deve-se observar que como a soma de α_1 e α_2 é sempre igual a 1, na legenda do gráfico aparece apenas os valores de α_1 .

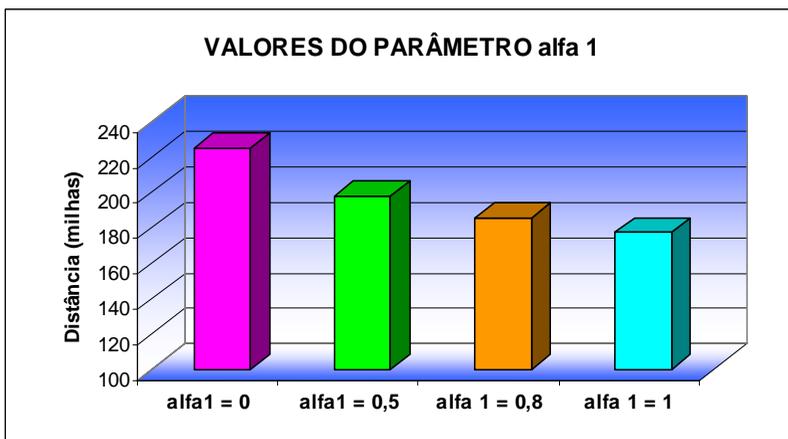


Gráfico 3 - Escolha do valor de α_1 e α_2 : problema com 102 paradas regulares.

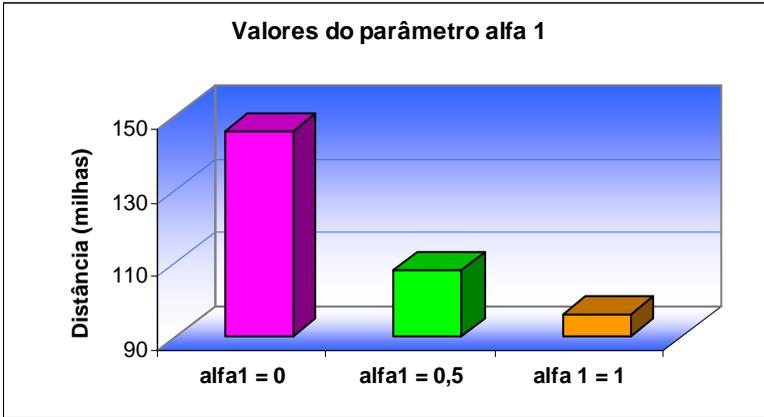


Gráfico 4 - Escolha do valor de α_1 : problema com 444 paradas regulares.

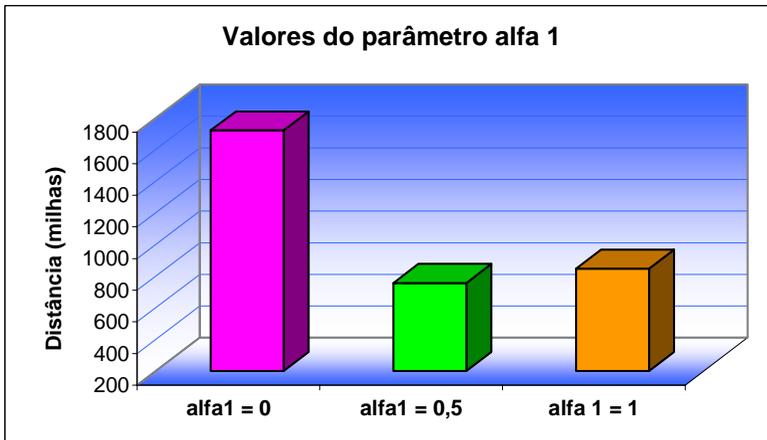


Gráfico 5 - Escolha do valor de α_1 : problema com 804 paradas regulares.

A partir do teste da ANOVA, fator único, comprovou-se diferença entre as médias para os valores testados. Nos problemas de 102 e 444 paradas, os melhores resultados foram obtidos com $\alpha_1 = 1$ e $\alpha_2 = 0$, já para o problema de 804 paradas, os melhores resultados foram obtidos com os valores α_1 e $\alpha_2 = 0,5$ – o que reflete uma possível sensibilidade no valor desse parâmetro, que pode estar associada ao

tamanho do problema e/ou à caracterização das janelas de tempo envolvidas, estreitas ou não.

c) Variação nos valores do parâmetro λ

O parâmetro λ está diretamente relacionado à relevância de se inserir, inicialmente, na rota, as paradas mais distantes da garagem. Quanto maior o valor do referido parâmetro, maior será a chance de uma parada distante da garagem ser selecionada para que seja inserida na rota. Os gráficos 6, 7 e 8 apresentam os resultados obtidos pelos testes computacionais.

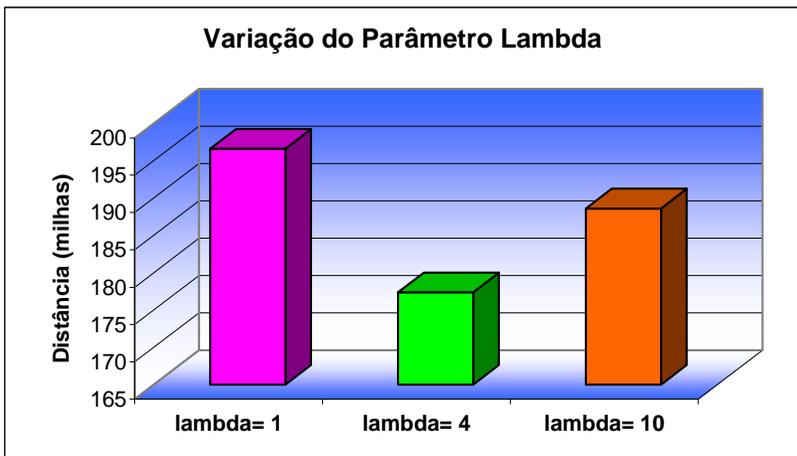


Gráfico 6 - Escolha do valor de λ : problema com 102 paradas regulares.

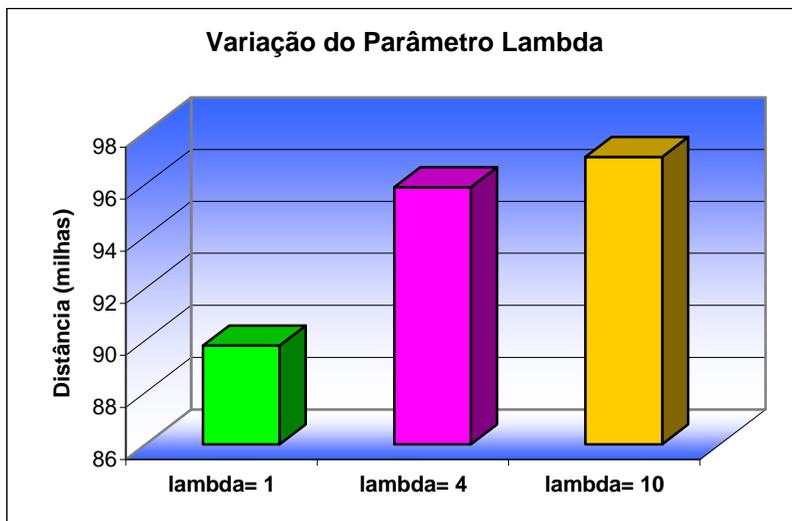


Gráfico 7 - Escolha do valor de λ : problema com 444 paradas regulares.

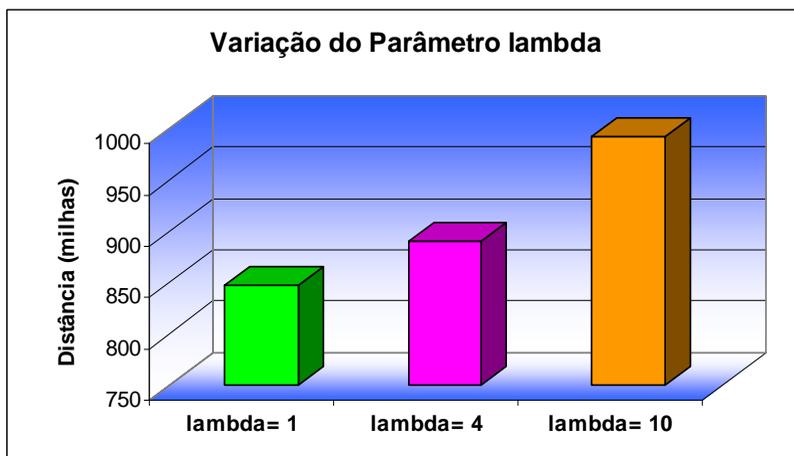


Gráfico 8 - Escolha do valor de λ : problema com 804 paradas regulares.

Após a realização do teste da ANOVA, considerando um erro de 0,05, constatou-se que se comprova diferença entre as médias. Para os problemas de 444 e 804 paradas, a melhor média foi atribuída à $\lambda = 1$, no que diz respeito ao problema de 102 paradas, $\lambda = 4$ apresentou

média mais satisfatória. Essa discrepância entre os valores mais adequados para λ nos três problemas explicitados reflete que priorizar ou não a inserção da parada mais distante da garagem é uma opção muito particular de cada problema, ou seja, não se pode convencionar um valor para o referido parâmetro.

d) Variação no tamanho do conjunto de soluções diversas

As soluções pertencentes ao referido conjunto são utilizadas na Scatter Search para a construção de novas soluções, conforme relatado no capítulo V do presente trabalho. Testes computacionais foram realizados para verificar, se nos problemas em questão, a variação do tamanho do respectivo conjunto altera significativamente o resultado final da operação. Os testes efetivados geraram conjuntos com 30, 60 e 100 soluções. Os resultados são visualizados a seguir, nos gráficos 9 e 10.

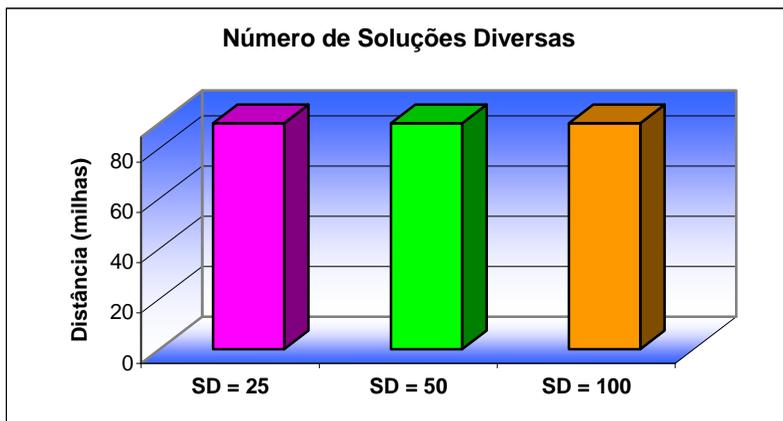


Gráfico 9 - Variação no tamanho do conjunto de soluções diversas: problema com 102 paradas regulares.

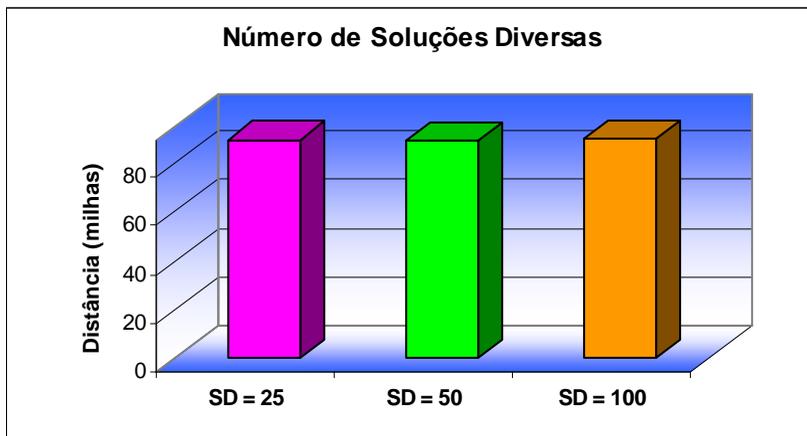


Gráfico 10 - Variação no tamanho do conjunto de soluções diversas: problema com 444 paradas regulares.

O teste da ANOVA permitiu constatar que não se comprova diferença entre as médias obtidas a partir dos testes realizados com diferentes valores para o número de soluções do conjunto de soluções diversas. No entanto, nos testes em que o tamanho do conjunto de soluções diversas foi igual a 25, algumas soluções recaíram em um mínimo local gerado na primeira etapa do procedimento *Scatter Search*. O mesmo foi constatado em problemas de grande porte quando o número de soluções diversas foi inferior a 70. Diante disso, sugere-se que o valor para o referido parâmetro fique em torno de 100. Um valor maior acaba por aumentar consideravelmente o tempo de processamento, contudo, sem trazer uma melhoria significativa na solução final.

e) Atualização do conjunto de referência

O programa implementado permite realizar a escolha do critério para atualização do Conjunto de Referência, que pode ser efetivada incluindo no respectivo conjunto apenas as soluções de melhor qualidade, ou ainda, as de melhor qualidade e diversidade. Os testes podem ser visualizados nos gráficos 11 e 12 abaixo.

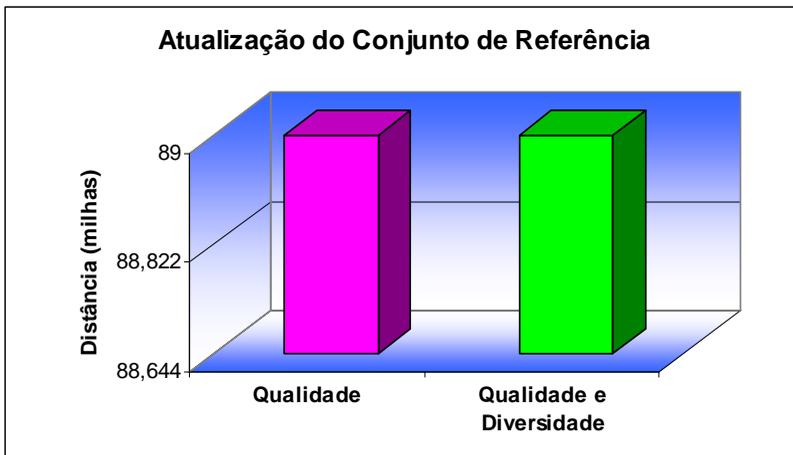


Gráfico 11 - Atualização do conjunto de referência: problema com 102 paradas regulares.

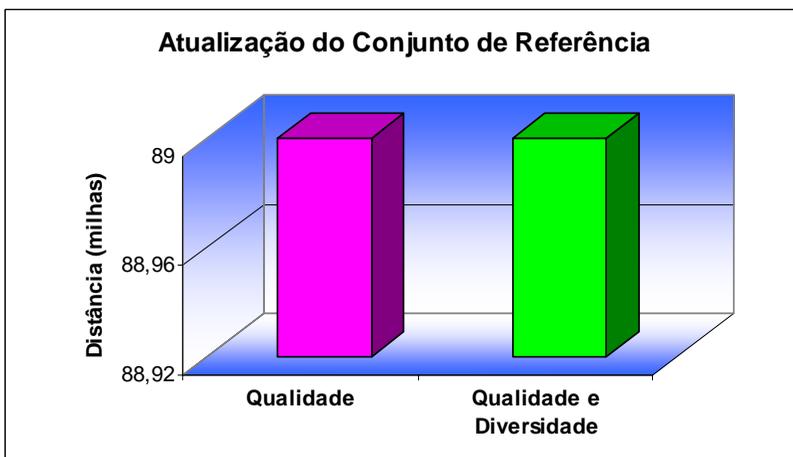


Gráfico 12 - Atualização do conjunto de referência: problema com 444 paradas regulares.

A partir do teste da ANOVA, não se comprovou diferença entre as médias.

Foram ainda realizados testes para estipular o melhor valor para o parâmetro k , e também para estipular o número de elementos a ser

utilizado no conjunto de referência. Em ambos os testes não se comprovou diferença entre as médias.

No que diz respeito ao número máximo de paradas atendidas em cada rota, esse é projetado da seguinte forma: a) roda-se o programa colocando para o número máximo de paradas atendidas o próprio número de paradas a serem atendidas, verifica-se quantos veículos foram utilizados (NU) nessa solução; b) divide-se o número total de paradas a serem atendidas por NU e arredonda-se o resultado, o qual será utilizado como ponto de partida para pequenos testes computacionais a fim de estipular o número máximo de paradas atendidas em cada rota. Nesse processo pode-se priorizar tanto a distância total percorrida pelos veículos para cobrir uma rota quanto o número de veículos a serem utilizados ou, ainda, o equilíbrio entre as rotas.

À luz dos testes realizados para calibrar os parâmetros explicitados anteriormente, optou-se pela seleção dos valores apresentados no Quadro 4, a seguir.

Parâmetros / N° de paradas	102	277	335	444	804	1051	1932	2100
α_1	1	1	1	1	0,5	1	1	1
α_2	0	0	0	0	0,5	0	0	0
λ	4	1	1	1	1	1	1	1
μ	1	1	1	1	1	1	1	1
K	10	10	10	10	10	10	10	10
Número de soluções diversas	100	100	100	100	100	100	100	100
b1	5	5	5	5	5	5	5	5
B2	3	3	3	3	3	3	3	3
Atualização do conjunto de referência	Qualid. e divers.							
Parada semente	Mais distante							
Número máximo de paradas atendidas em cada rota.	37	170	60	45	165	65	120	130

Quadro 4 - Valores selecionados para os parâmetros

Para os casos em que foi comprovada a diferença entre as médias, realizou-se testes para os problemas de 102, 444 e 804 paradas. Já para os casos em que a diferença não foi comprovada, a realização dos testes limitaram-se aos problemas de 102 e 444 paradas.

Embora o presente estudo esteja vinculado ao VRPTW, o método proposto foi testado também para o TSP e para o VRP. Na seqüência visualiza-se alguns dos resultados encontrados para os referidos problemas.

6.2 ANÁLISE PARA O TSP

Visualização da solução gerada para o atendimento de 48 paradas regulares, Figura 18.

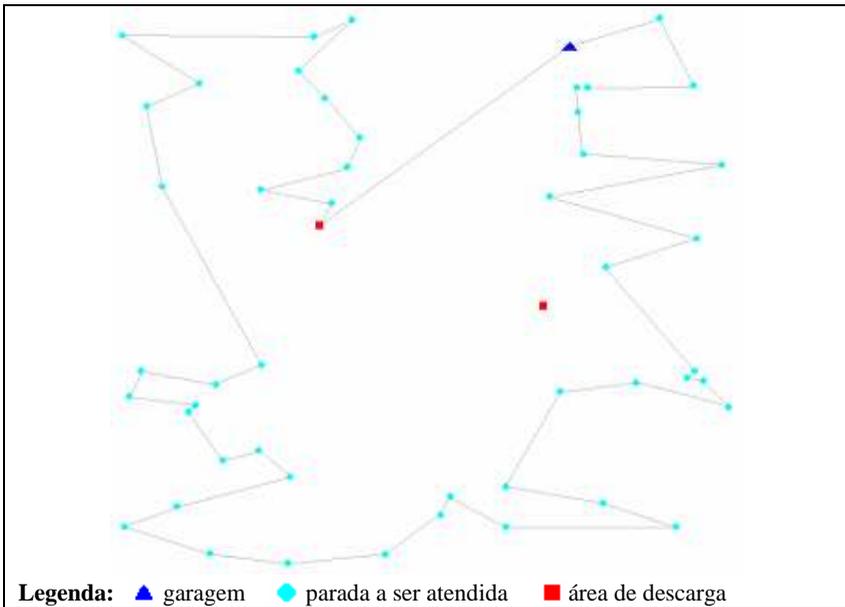


Figura 18 - Rota gerada para o TSP (48 paradas).

Visualização da solução gerada para o atendimento de 100 paradas regulares, sem restrições de capacidade e janelas de tempo, Figura 19.

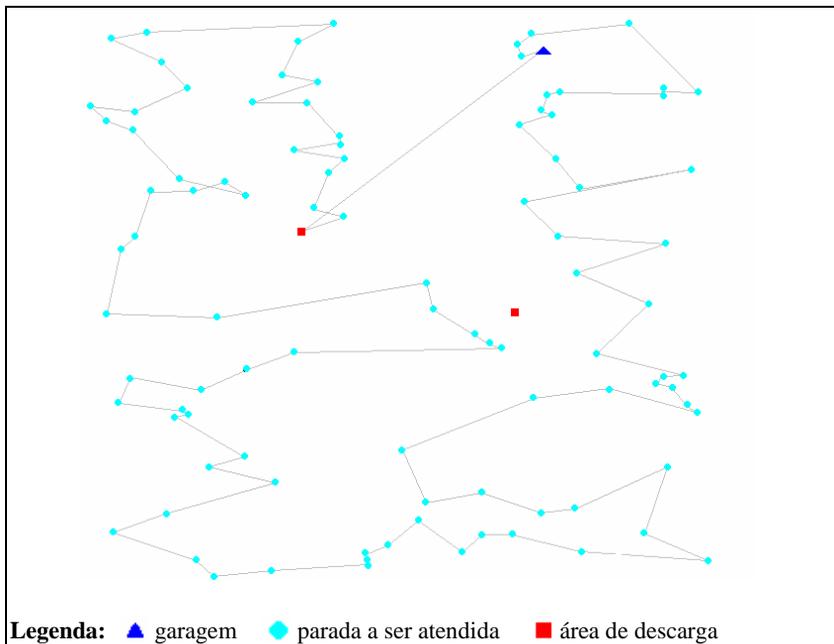


Figura 19 - Rota gerada para TSP (100 paradas).

A partir das Figuras 18 e 19, apresentadas anteriormente, tem-se uma idéia do comportamento da metaheurística para a resolução do TSP, que aparenta ser de qualidade, uma vez que as rotas não tem um número significativo de cruzamentos. Em todas as vezes que o programa foi rodado para o TSP, as soluções encontradas foram muito semelhantes, tanto para o problema com 50 paradas quando para o de 100 paradas, independentemente das configurações dos parâmetros de entrada.

6.3 ANÁLISE PARA O VRP

Nessa análise utilizou-se das mesmas 48 paradas do TSP, apenas acrescentou-se uma demanda igual para todos eles e restringiu-se a capacidade da rota. A solução gerada possui 3 rotas com apenas uma sub- rota cada, Figura 20, 21 e 22.

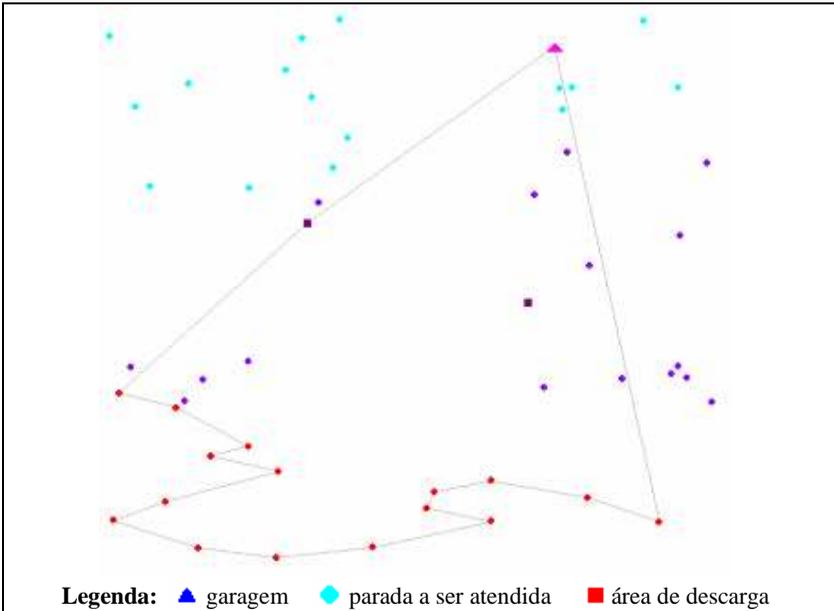


Figura 20 - Primeira sub-rotas gerada para VRP (48 paradas).

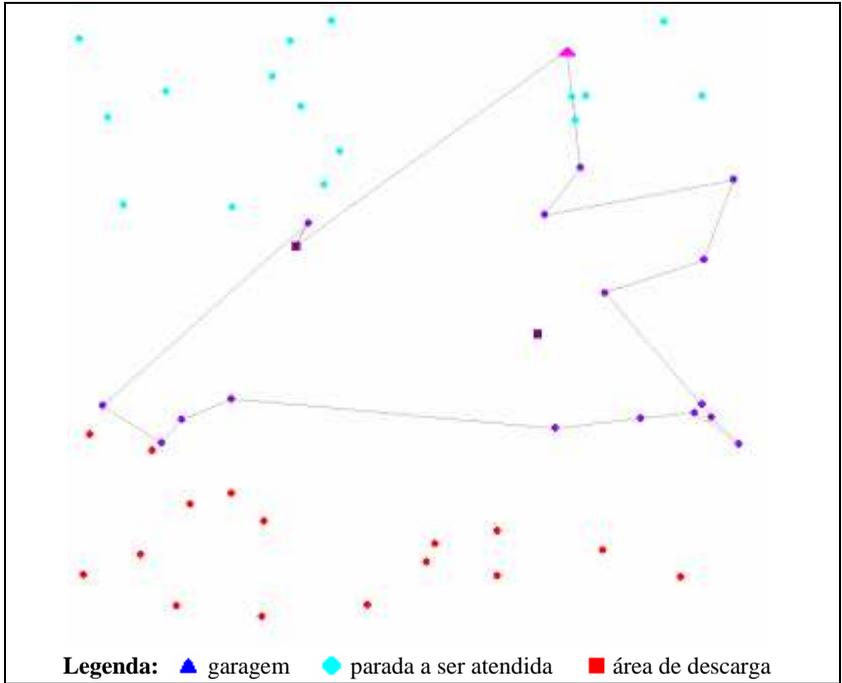


Figura 21 - Segunda sub-rotas gerada para VRP (48 paradas).

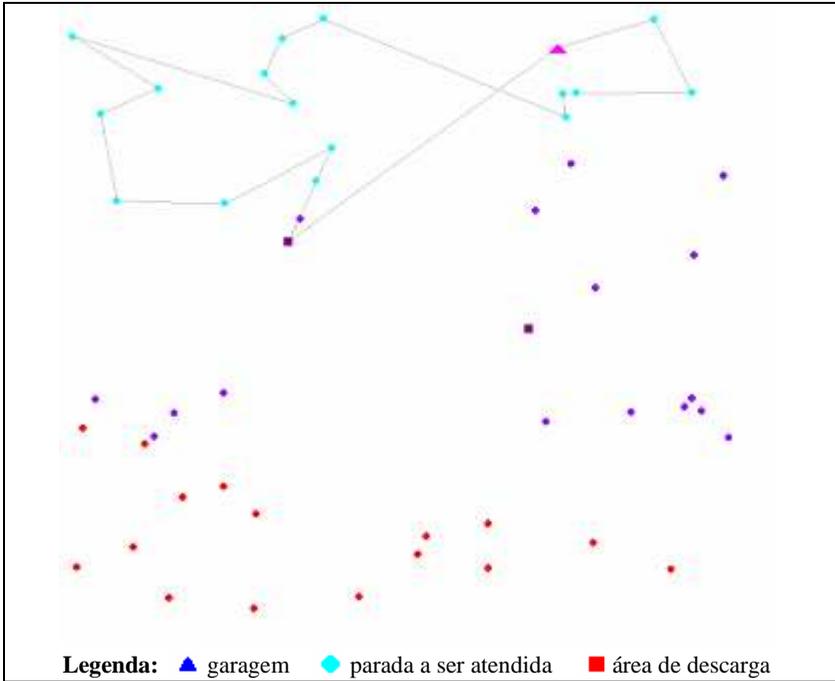


Figura 22 - Terceira sub-rota gerada para VRP (48 paradas).

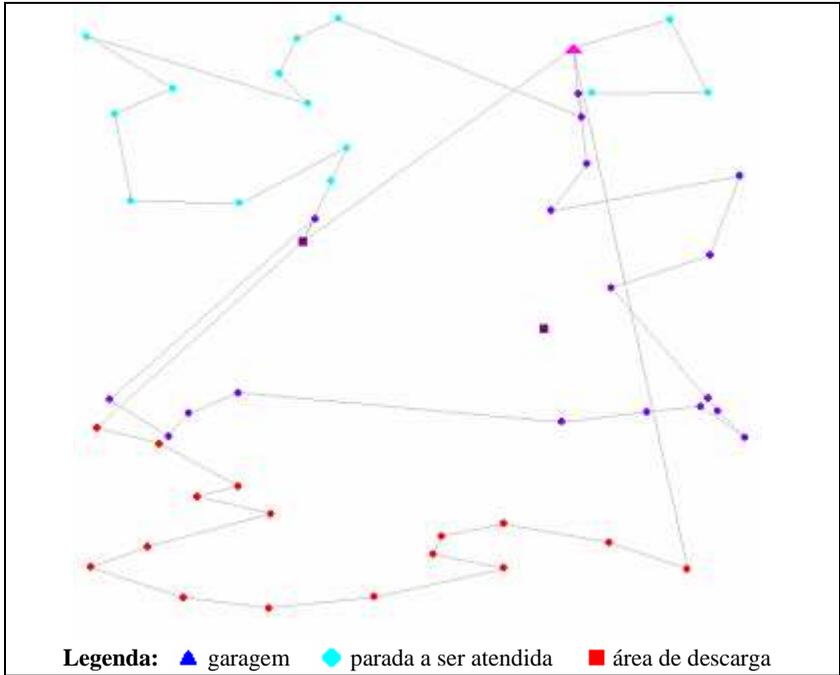


Figura 23 - Rota completa gerada para VRP (48 paradas).

A sobreposição das rotas, observada na Figura 23, é devido às visitas à área de aterro e também à saída e retorno da garagem.

Observa-se que a metaheurística procura, inicialmente, inserir na rota os pontos mais distantes da garagem (triângulo rosa). Na formação da segunda rota, observa-se o mesmo processo e finalmente, sobram para serem inseridos os pontos mais próximos da garagem, isso devido ao fato de que o critério da escolha da parada semente selecionado foi o “parada mais distante da garagem” e também, pelo valor imposto ao parâmetro λ . O equilíbrio entre o tamanho das rotas é obtido pela adequada calibração da capacidade da rota.

6.4 ANÁLISE PARA O VRPTW

Como o objetivo central do trabalho encontra-se atrelado ao problema de coleta de resíduos comerciais, no qual se considera a pausa para o almoço e a existência de múltiplos depósitos, utilizou-se dos problemas de referência disponibilizados por Kim, Kim e Sahoo, (2006b), para testar o comportamento do método proposto, o qual baseia-se na utilização da metaheurística *Scatter Search*. As soluções iniciais foram obtidas a partir da heurística de inserção sequencial estendida adaptada, que executa o primeiro passo da *Scatter Search*. Conforme já explicitado no capítulo 5, durante a execução desse passo, para que se obtenha inúmeras soluções, é inserida na rota, uma entre as k melhores paradas. Nas soluções obtidas a partir da heurística, optou-se sempre pela melhor parada a ser inserida e não pelas k melhores, dessa forma, obteve-se mais uma ferramenta capaz de solucionar o problema abordado. Uma comparação entre os resultados pode ser observada no Quadro 5, a seguir.

Número de paradas	Heurística de Inserção Estendida (Kim, Kim e Sahoo)								Heurística de inserção Estendida e Adaptada			Scatter Search		
	Sem clusterização				Com clusterização				Distância (milhas)	Num. de veículos	Diferença em relação ao melhor resultado (%)	Distância (milhas)	Num. de veículos	Diferença em relação ao melhor resultado (%)
	Sem S.A. (milhas)	Num. de veículos	Com S.A. (milhas)	Num. de veículos	Sem S.A. (milhas)	Num. de veículos	Com S.A. (milhas)	Num. de veículos						
102	-	-	-	-	*	-	205,1	3	200,24	3	-2,4	172,55	3	-15,9
277	-	-	-	-	521,9	2	527,3	3	487,02	3	-6,7	480,19	3	-8
335	-	-	-	-	*	-	205,0	6	215,34	6	4,8	216,56	6	5,5
444	-	-	-	-	82,9	10	87,0	11	98,97	11	13,7	89,35	11	7,8
804	807,3	5	798,9	5	798,9	5	769,5	5	910,46	8	18,3	727,40	6	-5,4
1051	-	-	-	-	2.874,0	17	2.370	18	2.828,0	17	19,3	2.837,6	18	19,7
1932	-	-	-	-	1.524,9	15	1.395,3	17	1.415,8	18	1,5	1.524,2	18	9,2
2100	-	-	-	-	2.401,2	16	1.833,8	16	2.038,6	18	11,1	2.194,5	19	19,6

* O resultado não foi considerado por não atender à restrição de capacidade dos veículos.

Quadro 2 - Comparação entre método proposto e problemas de referência.

Os resultados obtidos pela *Scatter Search* superaram os encontrados por Kim, Kim e Sahoo, (2006a), nos problemas envolvendo 102 e 277 paradas. Além disso, pelo teste *t de student*, constatou-se que os resultados obtidos para esses problemas apresentam um nível de estabilidade muito bom. Verificou-se ainda, que as soluções geradas apresentaram um equilíbrio entre as rotas satisfatório. A seguir, nas Figura 24 e 25, podem ser visualizados, respectivamente, um dos resultados encontrados para os problemas de 102 e 277 paradas.

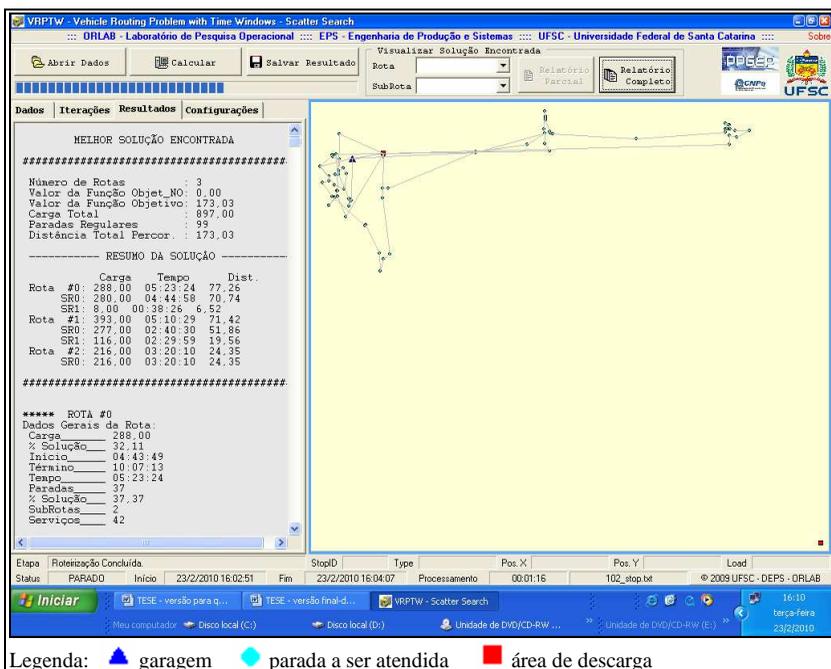


Figura 24 – Solução obtida para o problema de 102 paradas.

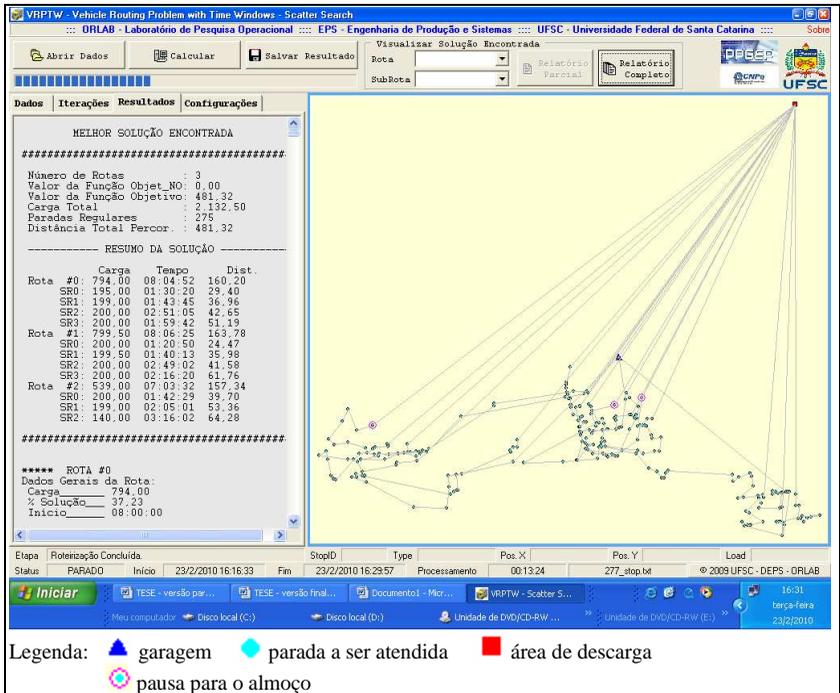


Figura 25 - Solução obtida para o problema de 277 paradas.

Nos problemas de maior porte, alguns dos resultados foram próximos aos obtidos por Kim, Kim e Sahoo, (2006), o de 335 e o de 444 paradas. No problema envolvendo 804 paradas, a *Scatter Search* superou os resultados de Kim em relação à distância mas utilizou um veículo a mais. Nos problemas de 1932 e 2100 paradas, a *Scatter Search* deixou a desejar em relação à distância e ao número de veículos utilizados. Apenas um dos problemas de referência, o de 804 paradas, apresenta solução sem clusterização, 798,9 milhas. Para esse mesmo problema, o resultado encontrado pela *Scatter Search* foi 742,41 milhas.

Como Kim e seus co-autores não esclarecem a partir de quantos testes a solução apresentada foi obtida, apenas relatam que soluções baseadas na abordagem proposta foram aplicadas na prática com sucesso, optou-se por inserir no quadro comparativo (Quadro 5), a melhor entre cinco soluções geradas.

CAPÍTULO VII

7 CONCLUSÕES

Nesse capítulo são delineadas as considerações finais e elencadas as sugestões para futuros trabalhos.

7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho descreveu o estado da arte do Problema de Roteirização de Veículos com Restrições de Janelas de Tempo, elencando as publicações mais relevantes dos últimos anos, bem como os trabalhos iniciais vinculados a ele. Na seqüência foi estabelecido um breve relato a respeito de alguns dos métodos de solução utilizados para o VRPTW e minuciosamente apresentadas a adaptação da Heurística de Inserção Seqüencial II de Solomon, (1987) e a reestruturação da Metaheurística *Scatter Search*, ambas utilizadas na implementação do modelo o qual vislumbrou cumprir o objetivo principal desse trabalho que foi a determinação dos roteiros a serem seguidos pelos veículos coletores de resíduo comercial, de forma a minimizar o número de veículos e o tempo de viagem destes, em uma solução, levando em consideração a existência de múltiplos locais de descarga e de pausa para o almoço dos motoristas e da guarnição.

A reformulação dos passos da metaheurística *Scatter Search* foi necessária uma vez que as particularidades inerentes ao problema de coleta de resíduos comerciais não são contempladas em um VRPTW padrão. As alterações promovidas foram primordiais pois permitiram a busca de novos espaços de soluções e evitaram paradas prematuras, as quais poderiam desencadear a convergência para um mínimo local.

A formulação matemática, outro objetivo proposto, apresentou certo grau de dificuldade devido a existência de restrições que exigiam um cauteloso refinamento. Ainda que a formulação tenha sido colocada na seção 4.2, partiu-se para a solução por meio de métodos heurísticos, como os demais pesquisadores, devido às dificuldades intrínsecas ao problema.

A viabilidade da estratégia de solução foi avaliada mediante a alteração de alguns de seus dados de entrada, seguidos de exaustivos

testes computacionais. A partir dos resultados de nossos experimentos, inferimos que a adequada calibração de alguns parâmetros reflete significativamente na melhoria da qualidade das soluções, bem como na estabilidade dessas.

O desempenho do algoritmo proposto obtido pela adaptação da metaheurística *Scatter Search* foi avaliado a partir de um conjunto de problemas de referência reais, disponibilizado na literatura. Pela comparação dos resultados evidenciou-se que a *Scatter Search* mostra-se bastante competitiva em problemas de pequeno e de médio porte, mas deixa a desejar em problemas de grande porte, acima de 1000 paradas, tanto em relação à qualidade de soluções, quanto ao tempo computacional necessário para gerar uma solução. Provavelmente esse fato tenha relação com o processo de combinação de rotas, quinto passo da metaheurística, no qual são considerados os arcos comuns de duas rotas a serem combinadas para gerar uma nova solução. Como o número de paradas a serem atendidas é grande, são necessários mais veículos (rotas) para realizar o atendimento às mesmas, conseqüentemente, o número de arcos comuns entre as rotas de duas soluções torna-se bastante pequeno, o que não contribui para garantir uma melhoria efetiva na solução resultante.

Reitera-se que o VRPTW, abordado inicialmente por Solomon (1987) há pouco mais de duas décadas, apresenta elevado grau de dificuldade de tratamento por ser NP-Hard. Segundo Alvarenga, Mateus e Tomi, (2007), que o classifica como um dos mais difíceis da otimização combinatória, das 56 instâncias de Solomon, (1987) com 100 clientes, 24 continuam sem solução ótima. Diante de um contexto que apresenta tal complexidade, adaptar uma metaheurística, a *Scatter Search*, para tratar do VRPTW com restrições adicionais e conseguir resultados que em alguns casos superaram ou se aproximaram daqueles conseguidos pelo único conjunto de referência disponível na literatura, pode ser considerado como um ponto de partida prolífero para novas pesquisas relacionadas ao tema.

7.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O que apontamos no presente trabalho não é uma conclusão definitiva, visto que estudos futuros podem ser encaminhados no sentido

de contemplar outras restrições e também de melhorar a performance da metaheurística *Scatter Search*.

Uma das sugestões para novas pesquisas concentra-se na inserção da clusterização antes do processo de formação das rotas, com a possibilidade de reduzir, dessa forma, o tempo computacional despendido, e ainda, melhorar a qualidade de soluções nos problemas de grande porte.

Outra sugestão encontra-se atrelada ao segundo passo da metaheurística *Scatter Search*, na qual outros processos de melhoria podem ser testados.

Além disso, uma alteração na estrutura de dados na implementação, pode contribuir para a redução do tempo de processamento despendido ao gerar uma solução.

REFERÊNCIAS

- ADENSO-DÍAZ, B.; GARCIA-CARBAJAL, S.; LOZANO, S. **An empirical investigation on parallelization strategies for scatter search**. European Journal of Operational Research, v. 169, p. 490-507, 2006.
- ALEGRE, J.; LAGUNA, M.; PACHECO, J. **Optimizing the periodic pick-up of raw materials for a manufacturer of auto parts**. European Journal of Operational Research, v. 179, n.3, p. 736-746, 2005.
- ALVARENGA, G.B.; MATEUS, G.R.; TOMI, G. **A genetic and set partitioning two-phase approach for the vehicle routing problem with time windows**. Computers & Operations Research, v. 34, n.6, p. 1561-1584, 2007.
- AZI, N.; GENDREAU, M.; POTVIN, J. **An exact algorithm for a single-vehicle routing problem with time windows and multiple routes**. European Journal of Operational Research, v.178, n.3, p. 755-766, 2007.
- BADEAU, P.; GUERTIN, F.; GENDREAU, M.; POTVIN, J. Y.; TAILLARD, E. A. **Parallel tabu search heuristic for the vehicle routing problem with time windows**. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, v.5, n.2, p.109-122, 1997.
- BAKER, E.K. **Vehicle routing with time windows constraints. Logistics and Transportation Review**. v. 18, n.4, p. 385-401, 1982. In: BELFIORE, P. P. Redução de custos em logística, Ed. Saint Paul. São Paulo, 2006.
- BARD, J.F.; KONTORAVDIS, G.; YU, G. **A branch-and-cut procedure for the vehicle routing problem with time windows**. Transportation Science, v. 36, n.2, p. 250-269, 2002.
- BEAUSOLEIL, R.P. **“MOSS” multiobjective scatter search applied to non-linear multiple criteria optimization**. European Journal of Operational Research, v. 169, p. 426-449, 2006.
- BELFIORE, P. P. **Redução de custos em logística**, Ed. Saint Paul. São Paulo, 2006.

BELFIORE, P. P.; YOSHIKAZI, H. T. Y. **Scatter search for a real-life heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows and split deliveries in Brazil.** European Journal of Operational Research, v.199, p.750-758, 2009.

BRÄYSY, O.; HASLE, G.; DULLAERT, W. **A multi-start local search algorithm for the vehicle routing problem with time windows.** European Journal of Operational Research, v.157, n.3, p. 586-605, 2004.

BREDSTRÖM, D.; RÖNNQVIST, M. **Combined vehicle routing and scheduling with temporal precedence and synchronization constraints.** European Journal of Operational Research, v.191, p. 19-31, 2008.

BODIN, L.; GOLDEN, B.; ASSAD, A.; BALL, M. **Routing and scheduling of vehicles and crews.** Computers & Operations Research, v.10, n.2, 1983.

CALVETE, H. I.; GALE, C.; OLIVEROS, M. **A goal programming approach to vehicle routing problems with soft time windows.** European Journal of Operational Research, v.177, n.3, p.1720-1733, 2007.

CAMPOS, V.; GLOVER, F.; LAGUNA, M.; MARTÍ, R. **An experimental evaluation of a scatter search for the linear ordering problem.** Journal of Global Optimization, v. 21, n.4, p. 397- 414, 2001.

CARAMIA, M.; ITALIANO, G. F., ORIOLO, G.; PACIFICI, A.; PERUGIA, A. **Routing a fleet of vehicles for dynamic combined pickup and delivery services.** Proceedings of the Symposium on Operation Research 2001, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg (2001), p. 3-8. In: FABRI, A.; RECHT, P. On dynamic pickup and delivery vehicle routing with several time windows and waiting times. Transportation Research Part B: Methodological, v. 40, n.4, p. 335-350, 2006.

CHIANG, W.C.; RUSSEL, R.A. **A reactive tabu search metaheuristic for the vehicle routing problem with time windows.** INFORMS Journal on Computing, v.9, n.4, p. 417- 430, 1997.

CHU, F.; LABADI, N.; PRINS, C. **A scatter search for the periodic capacitated arc routing problem.** European Journal of Operational Research, v. 169, p. 586-605, 2006.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. **O Caminho Para o Transporte no Brasil**. COPPEAD. Rio de Janeiro, UFRJ, 2002.

CUNHA, C. B. **Uma contribuição para o problema de roteirização de veículos com restrições operacionais**. São Paulo, 1997. 222 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1997.

CUNHA, C.B. **Aspectos práticos da aplicação de modelos de roteirização de veículos a problemas reais**. Transportes, Rio de Janeiro, v.8, n.2, p.51-74, 2000.

COTTA, C. **Scatter search with path relinking for phylogenetic inference**. European Journal of Operational Research, v. 169, p. 520-532, 2006.

CORBERÁN, A.; FERNÁNDEZ, E.; LAGUNA, M.; MARTÍ, R. **Heuristic solutions to the problem of routing school buses with multiple objectives**. Journal of the operational research society, v. 53, n.4, p. 427-435, 2002.

CORDEAU, J.F.; LAPORTE, G. **A tabu search heuristic for the static multi-vehicle dial-a-ride problem**. Transportation Research Part B: Methodological, v. 37, n. 6, p. 579-594, 2003.

DEBELS, D.; DE REYCK, B.; LEUS, R.; VANHOUCKE, M. **A hybrid scatter search/electromagnetism meta-heuristic for project scheduling**. European Journal of Operational Research, v. 169, p. 638-653, 2006.

DELL'AMICO, M.; IORI, M.; MARTELLO, S.; MONACI, M. **Lower bounds and heuristic algorithms for the ki-partitioning problem**. European Journal of Operational Research, v. 171, p. 725 -742, 2006.

DESAULNIERS, G.; LAVIGNE, J.; SOUMIS F. **Multi-depot vehicle scheduling problems with time windows and waiting costs**. European Journal of Operational Research, v.111, p. 479-494, 1998.

DESROCHERS, M. DESROSIERS, J.; SOLOMON, M. **A new optimization algorithm for the vehicle routing problem with time windows**. Operations Research, v.40, n.2, p. 342-354, 1992.

DIANA, M.; DESSOUKY, M. M. **A new regret insertion heuristic for solving large-scale dial-a-ride problems with time windows**.

Transportation Research Part B: Methodological, v. 38, p. 539-557, 2004.

DULLAERT, W.; JANSSENS, G. K.; SÖRENSEN, K.; VERNIMMEN, B. **New heuristics for the fleet size and mix vehicle routing problem with time windows.** Journal of the Operational Research Society, v.53, n.11, p. 1232-1238, 2002.

DÝAZ, J. A.; FERNÁNDEZ, E. **Hybrid scatter search and path relinking for the capacitated p-median problem.** European Journal of Operational Research, v. 169, p. 570-585, 2006.

FABRI, A.; RECHT, P. **On dynamic pickup and delivery vehicle routing with several time windows and waiting times.** Transportation Research Part B: Methodological, v. 40, n.4, p. 335-350, 2006.

FAGERHOLT, K. **Ship scheduling with soft time windows: an optimization based approach.** European Journal of Operational Research, v.131, p. 559-571, 2001.

GOLDEN, B.; DOYKE, T.; STEWART JR, W. **Approximate traveling salesman algorithms.** Operations Research, v.28, n.3, parte II, 1980.

HERRERA, F.; LOZANO, M.; MOLINA, D. **Continuous scatter search: an analysis of the integration of some combination methods and improvement strategies.** European Journal of Operational Research, v. 169, p. 450 - 476, 2006.

HO, S. C.; HAUGLAND, D. **A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with time windows and split deliveries.** Computers & Operations Research, v. 31, n. 12, p.1947-1964, 2004.

HOMBERGER, J.; GEHRING, H. **A two-phase hybrid metaheuristic for the vehicle routing problem with time windows.** European Journal of Operational Research, v.162, p. 220-238, 2005.

Karp R. **Reducibility among combinatorial problems.** Complexity of Computer Computations, Edited by R. Miller and J. Thatcher, 85-104, Plenum Press, New York, 1972.

KESKIN, B.B.; ÜSTER, H. **Meta-heuristic approaches with memory and evolution for a multi-product production/distribution system design problem.** European Journal of Operational Research, v. 182, n.2, p. 663-682, 2006.

KIM B.; KIM, S.; SAHOO, S. **Waste collection vehicle routing problem with time windows**. Computers & Operations Research, v. 33, n. 12, p. 3624- 3642, 2006a.

KIM B.; KIM, S.; SAHOO, S. **Problemas de referência**. Disponibilizados em: http://www.postech.ac.kr/lab/ie/logistics/WCVRPTW_Problem/benchmark.html. 2006b. Acesso em 15/02/2007.

KOLEN, W.J.; RINNOOY KAN, A. H. G.; TRIENEKENS, H.W.J.M. **Vehicle routing with time windows**. Operations Research, v. 35, n.2, 1987.

KONTORAVDIS, G.; BARD, J. F. **A GRASP for the vehicle routing problem with time windows**. ORSA Journal on Computing, v.7, n.1, p. 10-23, 1995.

LAGUNA, M.; LINO, M.; PEREZ, A.; QUINTANILLA, S.; VALLS, V. **Minimizing weighted tardiness of jobs with stochastic interruptions in parallel machines**. European Journal of Operational Research, v. 127, p. 444-457, 2000.

LAMBERT, D. M.; STOCK, J. R.; VANTINE, J.G. **Administração estratégica da logística**. São Paulo: Vantine Consultoria,1998.

LANDRIEU, A.;MATI, Y.,BINDER, Z. **A tabu search heuristic for the single vehicle pickup and delivery problem with time windows**. Journal of Intelligent Manufacturing, v.12, n. 5 e 6, p.497-508, 2001.

LAO, H.C.,LIANG, Z. **Pickup and delivery with time windows: algorithms and test case generation**. International Journal on Artificial Intelligence Tools (Architectures, Languages, Algorithms), v.11, n.3, p.455-472, 2002.

LARSEN, J. **Parallelization of the vehicle routing problem with time windows**. Ph. D. Thesis, IMM – Technical University of Denmark, 2001.

LARSON, R. C.; ODONI, A. R. **Urban: operations research**. New Jersey: Prentice-Hall, 1981.

LAU, H. C. L.; SIM, M.; TEO, K. M. **Vehicle routing problem with time windows and a limited number of vehicles**. European Journal of Operational Research, v.148, n.3, p.559-569, 2003.

LI, H. e LIM, A. **Local search with annealing-like restarts to solve the VRPTW**. European Journal of Operational Research, v.150, n.1, p.115 –127, 2003.

LI,J-Q; MIRCHANDANI, P. B.; BORENSTEIN, D. **Real-time vehicle rerouting problems with time windows**. European Journal of Operational Research, 2008.

LIU, F. H.; SHEN, S. **A route-neighborhood-based metaheuristic for vehicle routing problem with time windows**. European Journal of Operational Research, v.118, n.3, p. 485-504, 1999a.

LIU, F. H.; SHEN, S. **The fleet size and mix vehicle routing problem with time windows**. Journal of the Operational Research Society, v.50, n.7, p.721-732, 1999b.

LIU, Y. **Diversified local search strategy under scatter search framework for the probabilistic traveling salesman problem**. European Journal of Operational Research, v. 191, n. 2, p. 332-346, 2008.

LÓPEZ, F. G.; TORRES, M. G.; BATISTA, B. M.; PÉREZ, J. A. M.; MORENO-VEGA, J. M. **Solving feature subset selection problem by a Parallel Scatter Search**. European Journal of Operational Research, v. 169, p. 477-489, 2006.

LU, Q.; DESSOUKY, M. M. **A new insertion-based construction heuristic for solving the pickup and delivery problem with time windows**. European Journal of Operational Research, v.175, n.2, p. 672-687, 2006.

Manual Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos. 2001. Disponibilizado em: <http://www.etg.ufmg.br/manualrsu.pdf>.

MARTÍ, R.; LAGUNA, M. **Scatter search: diseño básico y estrategias avanzadas**. Revista Iberoamericana de Inteligência Artificial, v.19, n.2, p. 123-130, 2003.

MARTÍ, R. **Scatter search – wellsprings and challenges**. European Journal of Operational Research, v. 169, p. 351-358, 2006.

MARTÍ, R.; LAGUNA, M.; GLOVER, F. **Principles of scatter search**. European Journal of Operational Research, v. 169, p. 359-372, 2006.

MITROVIC-MINIC, S.; LAPORTE, G. **Waiting strategies for the dynamic pickup and delivery problem with time windows.** Transportation Research Part B: Methodological, v. 38, p. 635-655, 2004.

MULLASERIL, P.A.; DROR, M.; LEUNG, J. **Split-delivery routing heuristics in livestock feed distribution.** Journal of the Operational Research Society, v.48, n.2, p.107-116, 1997.

NOVAES, A. G. **Logística e Gerenciamento da Cadeia de Distribuição.** 3ª ed. Rio de Janeiro: Editora Campus, 2007.

NOWICKI, E.; SMUTNICKI, C. **Some aspects of scatter search in the flow-shop problem.** European Journal of Operational Research, v. 169, p. 654-666.

PARASKEVOPOULOS D. C.; REPOUSSIS, P. P.; TARANTILIS, C. D.; IANNOU, G.; PRASTACOS, G. P. **A reactive variable neighborhood tabu search for the heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows.** 2008.

PINOL, H.; BEASLEY, J.E.; O.R. **Applications Scatter Search and Bionomic Algorithms for the aircraft landing problem.** European Journal of Operational Research, v. 171, p. 439-462, 2006.

PISINGER, D.; ROPKE, S. **A general heuristic for vehicle routing problems.** Computers & Operations Research, v. 34, n.8, p. 2403-2007, 2007.

POOT A.;KANT, G.; WAGELMANS, A.P.M. **A savings based method for real-life vehicle routing problems.** Journal of the Operational Research Society, v.53, n. 1, p. 57-68, 2002.

POTVIN, J.Y.; ROUSSEAU, J.M. **A parallel route building algorithm for the vehicle routing and scheduling problem with time windows.** European Journal of Operational Research, v. 66, n.3, p. 331-340, 1993.

RANJAR, M.; REYCK, B.; KIANFAR, F. **A hybrid scatter search for the discrete time/resource trade-off problem in project scheduling.** European Journal of Operational Research, v. 193, n. 1, p. 35-48, 2009.

REGO, C.; LEÃO, P. **A scatter search tutorial for graph-based permutation problems.** Hearin for enterprise, University of Mississippi,

HCES-10-00, USA, 2000. In: BELFIORE, P. P. **Redução de Custos em Logística**. Ed. Saint Paul. São Paulo, 2006.

RUSSEL, R.A. **Hybrid heuristics for the vehicle routing problem with time windows**. *Transportation Science*, v. 29, n.2, p. 156-166, 1995.

RUSSELL, R.A.; CHIANG, W-C. **Scatter search for the vehicle routing problem with time windows**. *European Journal of Operational Research*, v.169, n.2, p.606-622, 2006.

RODRIGUES, Paulo Roberto Ambrosio. **Introdução aos Sistemas de Transporte no Brasil e à Logística Internacional**. São Paulo: Aduaneiras, 2003.

SAGARNA, R.; LOZANO, J.A.; **Scatter search in software testing, comparison and collaboration with estimation of distribution algorithms**. *European Journal of Operational Research*, v. 169, p. 392-412, 2006.

SCHEUERER, S.; WENDOLSKY, R. **A scatter search heuristic for the capacitated clustering problem**. *European Journal of Operational Research*, v. 169, p. 533-547, 2006.

SILVA, C.G.; FIGUEIRA, J.; CLÍMACO, J.; **Integrating partial optimization scatter search solving for bi-criteria {0,1}-knapsack problems**. *European Journal of Operational Research*, v. 177, p. 1656–1677, 2007.

SIMCHI-LEVI, D.; CHEN, X.; BRAMEL, J. **The logic of logistics**. Stanford: Springer, 1997.

SOLOMON, M. M. **On the worst-case performance of some heuristics for the vehicle routing and scheduling with time windows constraints**. *Networks*, v.16, n.2, p. 161-174, 1986.

SOLOMON, M. M. **Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time windows constraints**. *Operations Research*, v.35, n.2, p. 254-265, 1987.

SOLOMON, M.M.; DESROSIERS, J. **Time windows constrained routing and scheduling problem**. *Transportation Science*, v.22, n.1, p. 1-13, 1988.

- SOSA, N. G. M.; GALVÃO, R. D.; GANDELMAN, A. **Algoritmo Scatter Search aplicado ao problema clássico de roteamento de veículos**. Pesquisa Operacional, v.27, n. 2, 2007.
- TAILLARD, E.; BADEAU, P.; GENDREAU, M.; GUERTIN, F.; POTVIN, J.Y. **A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows**. Transportation Science, v. 31, n.2, p.170-185, 1997.
- TAN, K. C.; LEE, L.H.; ZHU, Q. L.; OU, K. **Heuristics methods for vehicle routing problem with time windows**. Artificial Intelligence in Engineering, v.15, n.3, p. 281-295, 2001.
- TOMPSON, P.M.; PSARAFTIS, H.N. **Cyclic transfer algorithms for multivehicle routing and scheduling problems**. Operations Research, v.41, n.5, 1993.
- TOTH, P., VIGO, D. **Heuristic algorithm for the handi-capped persons transportation problem**. Transportation Science, v.31, n.1, p. 60-71, 1997.
- TUNG, D.V.; PINNOI, A. **Vehicle routing-scheduling for waste collection in Hanoi**. European Journal of Operational Research, v. 125, p. 449-468, 2000.
- WEIGEL, D.; CAO, B. **Applying GIS and OR techniques to solve Sears technician-dispatching and home-delivery problems**, Interfaces 29, v.1, p. 112-130, 1999.
- VELOSSO, M. P.; SANTOS, E. M.; ANJOS, L. A. **Processo de trabalho e acidentes de trabalho em coletores de lixo domiciliar na cidade do Rio de Janeiro, Brasil**. Caderno de Saúde Pública., v.13(4), p. 693-700, Rio de Janeiro, 1997.

APÊNDICE 1

Especificações dos problemas de referência de Kim, Kim e Sahoo, (2006b).

Grupo problema	Número de paradas	Capacidade do veículo (jardas cúbicas)	Capacidade/dia da rota em (jardas cúbicas)	Número de áreas de aterro	Horário de operação do depósito
102_parada.txt	102	280	400	2	11
277_parada.txt	277	200	2200	1	9
335_parada.txt	335	243	400	4	9
444_parada.txt	444	200	400	1	9
804_parada.txt	804	280	10000	19	11
1051_parada.txt	1051	200	800	2	13
1932_parada.txt	1932	462	2000	4	14
2100_parada.txt	2100	462	2000	7	11

Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

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

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

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