ANTONIO CELIO PEREIRA DE MESQUITA

A META-HEURÍSTICA BUSCA DISPERSA EM PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS COM COLETA E ENTREGA SIMULTÂNEAS: APLICAÇÃO NA FORÇA AÉREA BRASILEIRA

São Paulo
2010

ANTONIO CELIO PEREIRA DE MESQUITA

A META-HEURÍSTICA BUSCA DISPERSA EM PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS COM COLETA E ENTREGA SIMULTÂNEAS: APLICAÇÃO NA FORÇA AÉREA BRASILEIRA

Dissertação submetida à Escola Politécnica da Universidade São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

São Paulo
2010

ANTONIO CELIO PEREIRA DE MESQUITA

A META-HEURÍSTICA BUSCA DISPERSA EM PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS COM COLETA E ENTREGA SIMULTÂNEAS: APLICAÇÃO NA FORÇA AÉREA BRASILEIRA

Dissertação submetida à Escola Politécnica da Universidade São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração:
Engenharia de Sistemas Logísticos.

Orientador:
Prof. Dr. Claudio Barbieri da Cunha.

São Paulo
2010

FICHA CATALOGRÁFICA

Mesquita, Antonio Celio Pereira de. A meta-heurística Busca Dispersa em problemas de roteirização de veículos com coleta e entrega simultâneas: aplicação na Força Aérea Brasileira / A.C.P. de Mesquita. -- São Paulo, 2010. 103p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. Departamento de Engenharia de Produção. Departamento de Engenharia Naval. Programa de Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos. 1. Logística 2. Pesquisa operacional 3. Transporte de carga 4. Roteirização 5. Heurística 6. Otimização combinatória I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. II. t.

Dedico este trabalho a Deus por ter me colocado neste mundo para viver, para amar e para aprender.

AGRADECIMENTOS

Sou grato a todos aqueles que, direta ou indiretamente, favoreceram a realização da pesquisa e a elaboração desta dissertação de mestrado.

Ao meu orientador, o Professor Doutor Claudio Barbieri da Cunha por suas valiosas contribuições e pela supervisão durante todo o período de realização da pesquisa. Sem essas orientações seria impossível a concretização deste trabalho.

Agradeço também aos membros da banca do exame de qualificação, ao Professor Doutor Hugo Tsugunobu Yoshida Yoshizaki, coordenador do Programa de Engenharia de Sistemas Logísticos, e à Professora Doutora Nélida Gladys Maquera Sosa, do Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal Fluminense e da *Universidad Peruana Union* pelas valiosas recomendações.

Agradeço ainda ao Professor PhD Abraham Duarte Muñoz, da *Universidad Rey Juan Carlos* de Madri, Espanha, pelas valiosas sugestões de experimentos a serem realizados, o que foi determinante para os excelentes resultados obtidos.

E, claro, à minha esposa Givani que, sem o suporte afetivo eu jamais conseguiria concluir este trabalho.

RESUMO

O presente trabalho trata da solução para o problema da elaboração de programações de transporte do sistema de distribuição de materiais da Força Aérea Brasileira (FAB). Essas programações de transporte consistem em definir os roteiros de entrega e coleta de materiais a serem realizadas simultaneamente em cada local de entrega/coleta a partir de um centro de distribuição, considerando-se a frota de veículos homogênea. Isto é característico de um Problema de Roteirização de Veículos com Coletas e Entregas Simultâneas (PRVCES). A gestão do sistema de distribuição física da FAB considera a complexidade desse sistema e os dados relativos às demandas de transporte de carga em cada um desses locais para elaborar as programações de transporte. Essas programações são elaboradas tendo em vista os limites de capacidade dos veículos, as características físicas das cargas e as prioridades de embarque. O gestor desse sistema possui boa visibilidade das demandas de transporte, porém, devido à grande quantidade de informações disponíveis e à elevada complexidade desse sistema, é impossível elaborarem-se manualmente programações de transporte que resultem em viagens de distribuição eficientes. O PRVCES foi resolvido por meio da meta-heurística Busca Dispersa (do inglês *Scatter Search*) integrada com a meta-heurística Descida em Vizinhança Variável (do inglês *Variable Neighborhood Descent*) utilizada como método de melhoria das soluções. Os resultados superaram ou se igualaram a alguns dos obtidos por outros autores para os mesmos problemas de teste com as mesmas restrições, o que demonstra que a Busca Dispersa implementada é competitiva para solucionar o PRVCES. Quanto à aplicação na FAB, os resultados mostraram que a utilização do método de solução desenvolvido resultará em programações de transporte elaboradas em curto tempo de processamento e que estas incidirão positivamente sobre a eficiência do sistema de distribuição de materiais da FAB.

Palavras-chave: Transporte de carga. Roteirização de veículos. Meta-heurística. Busca Dispersa.

ABSTRACT

This work deals with the solution to the problem of drawing up transport schedules in the material distribution system of the Brazilian Air Force (BAF). These transport schedules consist in defining the routes for material pickup and delivery to be accomplished simultaneously in each delivery/pickup location from a distribution center, considering a homogeneous fleet of vehicles. This is characteristic of a Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pick-up (VRPSDP). The management of the physical distribution of BAF considers the complexity of this system and the data regarding the cargo transport demands in each one of those locations to draw up transport schedules. These schedules are drawn up regarding the capacity limits of the vehicles, the physical characteristics of the cargoes and the shipping priorities. A good visibility of transport demands in each location is available to the manager of this system, but due to the great quantity of data to deal with and the high complexity of the physical distribution system of BAF, it is impossible to draw up transport schedules that result in efficient distribution trips. The VRPSDP was solved by means of the Scatter Search meta-heuristic integrated with the Variable Neighborhood Descent meta-heuristic as the solution improvement method. The results exceeded or equaled some of those obtained by other authors using the same test problems with the same restrictions, what indicates that the implemented Scatter Search is competitive to solve the VRPSDP. As for the application in the BAF, the results showed that using the solution method developed will result in schedules drawn up in short processing time and focused on the efficiency of the material distribution system of the BAF.

Key-words: Cargo transportation. Vehicle Routing. Meta-heuristic. Scatter Search.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Exemplo de rede do tipo *Hub-and-spoke*..... 22

Figura 5.1 - União de roteiros pela heurística *CW*..... 54

Figura 5.2 - Pseudocódigo do método de geração de diversificação..... 56

Figura 5.3 - Melhoramento de roteiro com 2-opt..... 59

Figura 5.4 - Possibilidade de relocação inter-rotas..... 60

Figura 5.5 - Possibilidade de relocação intrarrota..... 61

Figura 5.6 - Possibilidade de intercâmbio..... 61

Figura 5.7 - Possibilidade de cruzamento..... 62

Figura 5.8 - Distância entre uma solução e o *RefSet*..... 66

Figura 5.9 - Solução mais dispersa (a) em relação ao *RefSet*..... 67

Figura 5.10 -Esquema da meta-heurística Busca Dispersa..... 69

Figura 6.1 - Dissimilaridades do conjunto *P* gerado com VMP..... 75

Figura 6.2 - Dissimilaridades do conjunto *P* gerado com IMB..... 75

Figura 6.3 - Dissimilaridades do conjunto *P* gerado com *CW*..... 76

Figura 6.4 - Dissimilaridades do conjunto *P* gerado com VMP, IMB, CW e limiar de dissimilaridade..... 76

Figura 6.5 - Plotagem aproximada do melhor resultado obtido para o problema de Min (1989)..... 81

Figura 6.6 - Plotagem aproximada do resultado obtido por Min (1989)..... 81

Figura 6.7 - Plotagem da melhor solução para o problema CMT1X..... 84

Figura 6.8 - Entrada de dados da rotina de plotagem de soluções..... 87

Figura 6.9 - Solução para uma instância do problema da FAB com a BD..... 90

Figura 6.10 -Solução para uma instância do problema da FAB obtida manualmente pelo aluno A 90

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classificação das prioridades de transporte..... 22

Tabela 5.1 - Testes realizados por Sosa *el al*. (2008)..... 48

Tabela 5.2 - Testes realizados por Russel e Chiang (2004)..... 48

Tabela 6.1 - Valores de dispersão do conjunto *P*..... 75

Tabela 6.2 - Resultados dos experimentos com os métodos de busca local.... 77

Tabela 6.3 - Resultados dos experimentos com a meta-heurística *VND*..... 78

Tabela 6.4 - Comparação dos critérios de atualização do *RefSet*..... 79

Tabela 6.5 - Conjunto de problemas de Dethloff (2001)..... 82

Tabela 6.6 - Conjunto de problemas de Salhi e Nagy (1999)..... 83

Tabela 6.7 - Comparação com os resultados de Chen e Wu (2006)..... 85

Tabela 6.8 - Conjunto de problemas de Montané e Galvão (2006)..... 86

Tabela 6.9 - Resultado comparativo entre a solução manual e por BD..... 88

Tabela 6.10 - Dados de uma instância do problema da FAB..... 89

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

2-*opt*	- Método de busca local do tipo intrarrota
3-*opt*	- Método de busca local do tipo intrarrota
AG	- A meta-heurística Algoritmo Genético
BD	- A meta-heurística Busca Dispersa (*Scatter Search*)
BT	- A meta-heurística Busca Tabu (*Tabu Search*)
C-130	- Aeronave de transporte de carga da FAB denominada de Hércules
CAN	- Correio Aéreo Nacional
CECAN	- Centro do Correio Aéreo Nacional, órgão do Comando da Aeronáutica localizado no Rio de janeiro e responsável pela programação das missões de transporte de carga.
CW	- A heurística de Clarke e Wright (1964)
DARJ	- Depósito de Aeronáutica do Rio de Janeiro
FAB	- Força Aérea Brasileira
Gap	- Variação entre o valor obtido neste trabalho e o melhor valor existente na literatura.
GRASP	- Procedimento de busca gulosa, adaptativa e aleatória (*Greedy Random Adaptive Search Procedure*)
Lat	- Latitude
Long	- Longitude
MST	- Arvore Geradora de Peso Mínimo ou Árvore de Extensão Mínima (*Minimum Spanning Tree*)
NP	- Não Polinomial
NP-Hard	- De complexidade computacional NP-difícil, problema de otimização combinatória de difícil solução.
PCV	- Problema do Caixeiro Viajante (*Traveling Salesman Problem*)
PCVCES	- Problema de Caixeiro Viajante com Entrega e Coleta Simultâneas (*Traveling Salesman Problem with Simultaneous Delivery and*

Pickup)

PDP - Problema de Entrega e Coleta (*Pickup and Delivery Problem*)

PR - A meta-heurística Reconexão de Caminhos (*Path Relinking*)

PRV - Problema de Roteirização de Veículos (*Vehicle Routing Problems*)

PRVCES - Problema de Roteirização de Veículos com Entrega e Coleta Simultâneas (*VRP with Simultaneous Delivery and Pickup*)

Q&D - Critério de atualização do conjunto de referência da busca Dispersa por Qualidade e Diversidade proposto por Glover (1998).

Q&L - Critério de atualização do *conjunto de referência da busca Dispersa* por Qualidade e Limiar de dissimilaridade proposto por Duarte *et al.* (2009).

SILOMS - Sistema Integrado de Logística de Material e de Serviço – sistema que integra a gestão de todas as fases da logística da FAB.

SISCAN - Sistema do Correio Aéreo Nacional, o sistema de distribuição de materiais da FAB.

VMP - A heurística Vizinho Mais Próximo (*Nearest Neighbor*)

VND - A heurística de Descida em Vizinhança Variável (*Variable Neighborhood Descent*)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13

1.1 OBJETIVO DA PESQUISA 15

1.2 RELEVÂNCIA DO PROBLEMA 15

1.3 METODOLOGIA UTILIZADA 16

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO 18

2 VISÃO GERAL DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MATERIAIS DA FAB 20

2.1 DESCRIÇÃO DA INFRAESTRUTURA E DA REDE LOGÍSTICA..... 20

2.2 DELIMITAÇÃO DO ESCOPO DO PROBLEMA 23

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 25

3.1 CASOS ESPECIAIS DE PRV COM COLETA E ENTREGA MISTA 25

3.2 MÉTODOS UTILIZADOS ANTERIORMENTE NA SOLUÇÃO DO PRVCES 26

3.3 APLICAÇÕES DA BUSCA DISPERSA EM PROBLEMAS CLÁSSICOS DE ROTEIRIZAÇÃO 30

3.4 APLICAÇÕES DA BD NA SOLUÇÃO DE PRVCES 33

3.5 PRINCIPAIS PUBLICAÇÕES SOBRE A BUSCA DISPERSA..... 34

3.6 RESUMO DO CAPÍTULO 35

4 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA 36

5 ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO 40

5.1 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE A BUSCA DISPERSA 42

5.2 GERAÇÃO DAS SOLUÇÕES DIVERSAS 48

5.3 MELHORIA DAS SOLUÇÕES 57

5.4 CRIAÇÃO E ATUALIZAÇÃO DO CONJUNTO DE REFERÊNCIA..... 64

5.5 GERAÇÃO DE SUBCONJUNTOS E COMBINAÇÃO DE SOLUÇÕES 69

5.6 RESUMO DO CAPÍTULO 71

6 EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS. 72

6.1 EXPERIMENTOS PARA DEFINIÇÃO DOS MÉTODOS A SEREM UTIILIZADOS NA BUSCA DISPERSA 73

6.2 EXPERIMENTOS PARA AVALIAÇÃO DO MÉTODO IMPLEMENTADO 79

6.3 APLICAÇÃO NA FORÇA AÉREA BRASILEIRA 86

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 91

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS…….. 94

1 INTRODUÇÃO

Esta dissertação trata da solução para o problema da elaboração de programações de transporte no sistema de distribuição de materiais da Força Aérea Brasileira (FAB). Essas programações de transporte consistem em definir os roteiros de entrega e coleta de materiais a serem realizadas simultaneamente em cada local de entrega/coleta a partir de um centro de distribuição (CD), considerando-se a frota de veículos homogênea. Isto é característico de um Problema de Roteirização de Veículos com Coletas e Entregas Simultâneas (PRVCES). O método de solução utilizado foi a meta-heurística Busca Dispersa (do inglês *Scatter Search*) integrada com a meta-heurística Descida em Vizinhança Variável (do inglês *Variable Neighborhood Descent*, *VND*) como método de melhoria das soluções.

A FAB adquire suprimentos nas principais capitais do país e no exterior para atender as necessidades de cerca de 380 organizações militares distribuídas em todo o território nacional e precisa que esses materiais sejam entregues nas organizações solicitantes dentro dos prazos previstos. Para atender a esta necessidade existe o sistema de distribuição de materiais da FAB, conhecido em seu âmbito como Sistema do Correio Aéreo Nacional (SISCAN).

O SISCAN dispõe de uma frota composta de diferentes veículos aéreos e terrestres com diferentes capacidades de transporte e atende cerca de 100 locais de entrega/coleta. Esse sistema dispõe de múltiplas bases, cada base com seus veículos de transporte, sendo que a frota é homogênea em cada base e heterogênea, porém, considerando-se todo o sistema. As entregas e as coletas são realizadas simultaneamente na mesma localidade, podendo apresentar restrição de janela de tempo, como nos casos de operações combinadas com outras forças armadas. Os veículos transportam cargas para os clientes a partir da sua base ou CD de origem e coletam cargas nos clientes a serem transportadas à mesma base ou CD no final de cada viagem.

A gestão do SISCAN considera essas características e, ainda, as informações sobre as demandas de transporte de carga em cada local de entrega/coleta para realizar a

programação de transporte. Essa programação é realizada com a finalidade de definir os roteiros a serem percorridos pelos veículos, tendo em vista os limites de capacidade, as características físicas das cargas e as prioridades de embarque. Essas prioridades são relevantes porque nem sempre é possível atender a todas as solicitações de transporte de imediato.

As informações sobre as demandas de entrega/coleta estão disponíveis no sistema de informações de carga da FAB, mais especificamente o módulo de transporte do Sistema Integrado de Logística de Material e Serviço (SILOMS). O SILOMS é o sistema computacional da FAB destinado a automatizar as atividades de suprimento, de aquisição de material, seu recebimento, fornecimento, distribuição, armazenamento e a gestão do inventário. Além disso, o SILOMS dá suporte às atividades de manutenção de aeronaves, ao planejamento dos recursos necessários à manutenção e à programação dos serviços.

O módulo de transporte do SILOMS proporciona boa visibilidade das demandas de transporte, pois o gestor de cada terminal lança as cargas existentes e seus destinos, porém, devido à grande quantidade de informações disponíveis na tela do gestor do SISCAN e à complexidade deste Sistema, não se consegue elaborar uma programação do transporte adequada, voltada para a prontidão e eficiência do SISCAN.

Uma possibilidade de solução para esse problema é o desenvolvimento de um método de decisão quantitativo, cumprindo todas as suas etapas, desde a compreensão do problema e a modelagem matemática até a implementação de uma solução computacional que proporcione ao gestor uma ferramenta de apoio à decisão. Essa ferramenta deve ser especializada na programação de transporte de cargas e especificamente desenhada para lidar com as características de complexidade do SISCAN, tendo em vista os aspectos financeiros e operacionais na eficiência do transporte realizado.

1.1 OBJETIVO DA PESQUISA

O problema real da distribuição de materiais da FAB possui características de grande complexidade: um Problema de Roteirização de Veículos (PRV) com múltiplas bases; frota heterogênea fixa, mas homogênea em cada base; simultaneidade nas coletas e entregas de carga; e, em algumas situações especiais, a existência de restrição de janela de tempo.

Devido à elevada complexidade do problema real e considerando que os principais Centros de Distribuição da FAB, os Parques de Material Aeronáutico do Galeão e dos Afonsos, o Parque de Material Bélico, o Parque de Material Eletrônico, o Depósito de Aeronáutica do Rio de Janeiro e o Depósito Central de Intendência, e que a base que detém a frota de veículos com maior capacidade de transporte (o C130, Hércules) estão baseados na mesma localidade, o Rio de Janeiro, escolheu-se explorar, neste trabalho, a situação que considera uma frota com um único tipo de veículo realizando entregas e coletas simultaneamente a partir de um único centro de distribuição. Isto resolverá a porção mais significativa do problema real da distribuição de materiais da FAB.

O objetivo desta pesquisa, então, é resolver um Problema de Roteirização de Veículos com Coleta e Entrega Simultâneas (PRVCES).

1.2 RELEVÂNCIA DO PROBLEMA

A FAB precisa atender às necessidades de recursos materiais de cerca de 380 organizações militares distribuídas em todo o território nacional e precisa que esses materiais sejam entregues dentro dos prazos previstos. Para isto é necessário que o Sistema de distribuição de materiais da FAB seja eficiente sob os aspectos financeiro e operacional.

A impossibilidade de se elaborar uma programação de transporte de cargas que seja voltada para a eficiência do sistema de distribuição, aliada ao fato de que não existe

no SILOMS qualquer mecanismo de apoio à decisão especializado na programação do transporte de carga, constitui o foco da ineficiência. Isto acontece devido à limitação humana em lidar com grande quantidade de informações, impedindo que as programações de transporte geradas sejam adequadas aos requisitos de prontidão e eficiência exigidos pelos clientes do sistema de distribuição.

Programações de transporte inadequadas certamente resultarão em custos elevados relativos à existência de mais roteiros do que a quantidade necessária (o que implica em aumento nos custos fixos) e, ainda, que esses roteiros não estejam otimizados (o que implica em aumento nos custos variáveis).

A ineficiência desse sistema poderá ainda ser causa de custos extras com eventuais necessidades de terceirização de transporte e, também, permitir que hajam veículos subutilizados percorrendo esses roteiros.

A fim de evitar a geração de programações de transporte inadequadas deve-se adotar um processo decisório racional. Isto é particularmente importante quando elevados custos financeiros (custos com combustíveis, lubrificantes, manutenção e operação das frotas de veículos e ainda eventuais custos com terceirização de transporte) e operacionais (prejuízo eventual às operações da FAB por falha na entrega de algum material) estão em jogo.

1.3 METODOLOGIA UTILIZADA

Com relação às suas medidas de efetividade, o desempenho do sistema de distribuição de materiais da FAB pode ser aumentado tanto por melhorias tecnológicas quanto por melhorias nos procedimentos operacionais. Os gestores geralmente identificam alternativas de solução e selecionam as ações por seu julgamento, experiência ou intuição. Neste caso, a quantidade excessiva de alternativas de solução (a grande quantidade de informações na tela do SILOMS e a grande quantidade de possibilidades de construção de roteiros) inviabiliza a análise por julgamento, experiência ou intuição. Por isso é pouco provável que a decisão tomada gere resultados com eficiência, o que requer um exame científico das

alternativas com do uso de métodos de decisão quantitativos.

Na busca pela aplicação de um método de decisão quantitativo, procurou-se, primeiramente, delimitar o problema, realizar a modelagem matemática e realizar a revisão bibliográfica com o intuito de se identificar, na literatura, alternativas de solução já utilizadas e decidir, em seguida, pelo método de solução a ser aplicado.

Conforme Cunha (2006), muitos dos problemas encontrados nas áreas de logística e de transportes são de Programação Linear Inteira e do tipo NP-Difícil (do inglês *NP-Hard*). Isto significa que possuem uma complexidade de ordem exponencial. Em outras palavras, o esforço computacional para a sua resolução cresce exponencialmente com o tamanho do problema e, portanto, os algoritmos exatos, apesar de todos os avanços, podem não permitir a obtenção de soluções ótimas, mesmo com tempos de processamento elevados. Assim, surge a necessidade de se buscar outros métodos que, embora não conduzam à solução ótima, poderão chegar a resultados bastante aceitáveis.

Neste e em diversos outros trabalhos existentes na literatura citam-se com bastante frequência os termos heurística e meta-heurística. O termo “heurística”, usualmente, refere-se a um procedimento iterativo de busca, baseado em alguma estrutura de controle repetitivo. De acordo com Silver (2004), estratégias heurísticas de solução apoiam-se, em geral, em alguma abordagem intuitiva, na qual a estrutura particular do problema pode ser explorada de forma inteligente, a fim de se obter uma solução satisfatória. Já o termo meta-heurística, segundo Voß *et al.* (1999), refere-se aos métodos de otimização combinatória constituídos de um processo mestre iterativo que guia e modifica as operações de heurísticas subordinadas para produzir soluções de alta qualidade, não necessariamente ótimas.

Neste trabalho se desenvolveu a solução para o PRVCES por meio da meta-heurística Busca Dispersa (BD). Segundo Wassan *et al.* (2007), a meta-heurística que geralmente tem apresentado os melhores resultados para solução de problemas clássicos de roteirização de veículos e suas variantes é a meta-heurística Busca Tabu (BT), introduzida por Glover em 1986. Apesar disso, resolveu-se implementar a BD para solução do PRVCES tendo-se como motivação o excelente desempenho

obtido por Sosa *et al.* (2008) cujos resultados apresentaram-se bastante semelhantes aos obtidos por Montané e Galvão (2006) e por Wassan *et al.* (2007) que utilizaram a BT para solucionar esse mesmo tipo de problema. Outra motivação para o emprego da BD foi a experiência anterior do autor na implementação desse método na solução de problemas de mochila (MESQUITA; CUNHA, 2008).

Escolhido o método, este foi implementado especificamente para solucionar o PRVCES e validado por meio da utilização dos problemas de teste existentes na literatura e da comparação com os resultados alcançados por outros autores a partir dos mesmos problemas de teste e sujeito às mesmas restrições.

O método desenvolvido, uma implementação especial da BD, foi aplicado na solução de uma instância de 33 clientes do problema da FAB com dados obtidos do Módulo de Transporte do SILOMS.

Com a finalidade de realizar uma comparação entre o resultado obtido pela BD e os resultados obtidos manualmente por operadores do Módulo de Transporte, foi desenvolvida uma rotina em planilha eletrônica com linguagem de programação *Visual Basic for Applications (VBA)*, que possibilitou a digitação das sequências de clientes dos roteiros e da visualização gráficas desses. Isto possibilitou que os operadores utilizassem heurísticas construtivas de roteirização e construíssem soluções sem utilizar algoritmos computacionais.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta dissertação está organizada da seguinte forma: O Capítulo 2 proporciona uma visão geral da infraestrutura de transporte e da rede logística da FAB e a delimitação do problema. O Capítulo 3 apresenta a pesquisa bibliográfica realizada buscando identificar problemas semelhantes na literatura e as formas de solução aplicadas. O Capítulo 4 apresenta a formulação matemática e a análise da complexidade. O Capítulo 5 estabelece a estratégia de solução, descreve a meta-heurística Busca Dispersa, a meta-heurística Descida em Vizinhança Variável e as heurísticas construtivas e de melhoria, detalhando a forma como esses métodos foram

implementados para solucionar o PRVCES. O Capítulo 6 apresenta os resultados obtidos nos experimentos computacionais e realiza as análises desses resultados e o Capítulo 7 apresenta as conclusões deste trabalho e as sugestões de estudos posteriores visando estender o método desenvolvido para abranger mais características do problema real.

2 VISÃO GERAL DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE MATERIAIS DA FAB

O objetivo do sistema de distribuição de materiais da FAB, o Sistema do Correio Aéreo Nacional (SISCAN), é atender prontamente e com eficiência às demandas de transporte de carga entre os órgãos centrais de distribuição e as demais organizações militares clientes do sistema de distribuição de materiais da FAB.

Para o alcance desse objetivo é necessário que a programação de transporte resulte na prontidão das entregas e das coletas das cargas, na minimização das distâncias percorridas e do número de veículos utilizados com a finalidade de se minimizar custos.

Em muitas aplicações práticas, o objetivo principal é minimizar a frota de veículos necessários, especialmente quando isto representa a quantidade de tripulantes a empregar. No caso da FAB, como os custos para se manter uma frota de aeronaves em um patamar aceitável de disponibilidade são elevados, e como os recursos financeiros para manutenção são escassos, certamente há um objetivo adicional que é minimizar o uso da frota existente.

2.1 DESCRIÇÃO DA INFRAESTRUTURA E DA REDE LOGÍSTICA

A FAB possui frotas de transporte compostas por aeronaves de transporte e caminhões de diferentes tipos destinados a realizar a movimentação de cargas entre os órgãos de obtenção e distribuição e as diversas outras organizações clientes do sistema de distribuição de materiais, por meio dos 32 terminais de carga do Correio Aéreo Nacional (CAN) e de diversos outros locais de carga/descarga, totalizando pouco mais de 100 nós na rede logística.

Essas cargas são compostas de materiais e equipamentos utilizados na manutenção das frotas de aeronaves e em outras atividades de apoio às operações da FAB. As demandas de transporte são geradas pelas solicitações de movimentação de

materiais entre os almoxarifados e armazéns de suprimento locais e regionais e seus órgãos centrais de suprimento.

Com base nessas solicitações, as programações diárias e semanais de transporte são elaboradas pelo gestor do SISCAN com a finalidade de atender as entregas/coletas dentro dos prazos solicitados pelos solicitantes de transporte.

Em um dado momento, em cada ponto de entrega/coleta, pode haver cargas a serem transportadas cujos atributos como peso, dimensões, prioridade de seleção para embarque (Tabela 2.1) são conhecidos, assim como as aeronaves ou caminhões disponíveis nas suas bases, com capacidades de transporte (disponibilidade em peso e cubagem) conhecidos. Depois de cumprirem um roteiro de coletas e entregas, esses veículos retornarão à sua base de origem. Essas coletas e entregas frequentemente são simultâneas, isto é, no mesmo terminal pode haver entrega e coleta de alguma carga destinada para ou originada do mesmo.

Ao sair da base, cada veículo precisa ser carregado com todas as entregas a serem realizadas, mas a limitação da capacidade do veículo nem sempre comporta o atendimento de todas as solicitações de entrega. Ao passar por cada cliente em um roteiro de entregas e coletas, a folga na capacidade do veículo nem sempre comporta o atendimento de todas as solicitações de coleta. Assim, as cargas que comporão essas entregas/coletas serão incluídas na programação de transporte com base nas prioridades descritas na Tabela 2.1.

Cada veículo deve percorrer roteiros compatíveis com a sua autonomia limitando-se às localidades situadas a alguma distância em torno da sua base de origem. Porém, há veículos que possuem grande autonomia e capacidade de transporte, que eventualmente podem executar roteiros maiores, atendendo às solicitações de transporte das outras bases. Isto sugere que esse sistema possui características de rede do tipo *Hub-and-spoke* (Figura 2.1). Isto é, veículos de grande capacidade atendendo às demandas de coleta/entrega das outras bases e os veículos de menor capacidade dessas bases atendendo às localidades circunvizinhas dentro do seu raio de ação.

Tabela 2.1 - Classificação das prioridades de transporte

Prioridade	O transporte soluciona a situação de:
1	Segurança nacional, calamidade pública e salvamento de vida humana.
2	Material para socorro de aeronave impedida de voar.
3	Material crítico do serviço de controle do espaço aéreo.
4	Material de aviação e/ou suas Ordens Técnicas.
5	Material bélico e material em garantia e/ou suas Ordens Técnicas.
6	Combustível e víveres, suprimento de viatura, malotes de correspondência e outros.
7	Material e/ou medicamentos das Forças Armadas em geral e/ou Serviço Público.
8	Mala diplomática.
9	Bagagem de militar transferido.
10	Cargas não previstas nos subitens anteriores.

Fonte: Manual do Comando da Aeronáutica referente à operação do Sistema do Correio Aéreo Nacional (NSCA 4-2, 2003).

A Figura 2.1 apresenta uma representação de uma rede do tipo *Hub-and-spoke* originada por meio de uma Árvore de Extensão Mínima (*Minimum Spanning Tree*) obtida com base nas coordenadas geográficas de 32 localidades brasileiras atendidas pelo SISCAN. Os círculos de maior diâmetro representam as bases ou *hubs*.

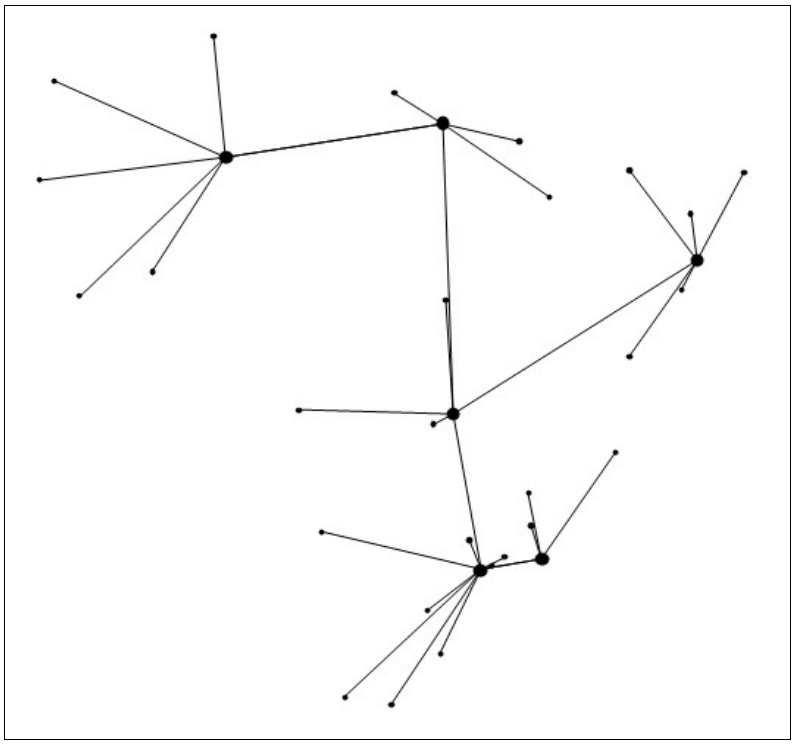

Figura 2.1 – Exemplo de rede *Hub-and-spoke*

O termo *Hub-and-spoke* é utilizado para descrever a forma com que a rede de transportes está desenhada. Em uma tradução direta, temos “cubo e raio” fazendo uma analogia com as rodas de uma carroça, por exemplo. (CUNHA; SILVA, 2005).

2.2 DELIMITAÇÃO DO ESCOPO DO PROBLEMA

Considerando a possibilidade de menor complexidade, que seria resolver um Problema de Caixeiro Viajante (PCV), a quantidade inicial de alternativas é igual ao fatorial da quantidade de clientes ($32! = 2{,}65 \times 10^{35}$). Como no problema real a complexidade é maior do que a de um PCV, isto implica que o operador é incapaz realizar uma programação de transporte eficiente porque não existe no Módulo de Transporte do SILOMS um algoritmo que o auxilie na elaboração dessa tarefa.

A elaboração manual da programação de transporte certamente permitirá que sejam criadas mais rotas do que o necessário. Consequentemente, mais veículos seriam utilizados, causando o aumento nos custos fixos. Além disso, essas rotas podem não ser as melhores percorrendo distâncias maiores e, consequentemente, consumindo mais combustível e aumentando os custos variáveis.

Tendo-se como base as demandas dos locais de coleta/entrega compostas pelas cargas consolidadas até certo nível de prioridade previamente definido pelo gestor do sistema, obter uma solução para o problema significa gerar programações de transporte, diárias ou semanais, designando veículos às rotas geradas considerando as características das cargas (destino, peso, dimensões e prioridade) e dos veículos (seu modal, sua base, dimensões úteis do compartimento de carga, capacidade máxima de peso, custo da hora de voo ou de viagem terrestre e a velocidade média), com o objetivo de atender eficientemente às solicitações de transporte dos clientes.

A programação de transporte, então, deve ser solução para um Problema de Roteirização de Veículos (PRV) com frota heterogênea, com múltiplas bases, com entregas e coletas realizadas simultaneamente em cada cliente, com restrição de janela de tempo e atendendo a uma rede em configuração do tipo *Hub-and-spoke*.

O PRV, por si só, é reconhecido no meio acadêmico, como de elevada complexidade (GAREY; JOHNSON, 1979). Somando-se a isto as outras características de complexidade, essas características agrupam diversos problemas reconhecidamente complexos se tratados individualmente. Tratá-los de forma integrada, então, seria de um grau de complexidade extremamente elevado, sendo esperado que o tempo computacional para solução pudesse ser longo demais para utilização em qualquer tipo de solução de aplicação operacional.

Em vista do exposto, decidiu-se restringir o problema considerando-se o caso particular de apenas um tipo de veículo e apenas um Centro de Distribuição (CD). Admite-se, então, que a rede logística é composta de clientes ou nós a serem servidos por uma frota homogênea de veículos de capacidade limitada. Os veículos transportam cargas para os clientes a partir do CD e coletam cargas a serem transportadas de volta ao CD no final da viagem. Neste trabalho foi considerado que não é permitido coletar uma carga em um cliente e entregá-la em outro. Isto configura, então, tratar-se de um Problema de Roteirização de Veículos com Coleta e Entrega Simultâneas (PRVCES).

Isto resolverá a porção mais significativa do problema real, pois os principais Centros de Distribuição da FAB e a base que detém a frota de veículos com maior capacidade de transporte estão localizados na mesma localidade, a cidade do Rio de Janeiro.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresentam-se alguns casos especiais do Problema de Roteirização de Veículos (PRV) com coleta e entrega mista; alguns métodos de solução aplicados anteriormente na solução do PRV com Coleta e Entrega Simultâneas (PRVCES); aplicações anteriores da meta-heurística Busca Dispersa (BD) em problemas de roteirização; aplicações recentes da BD na solução do PRVCES; e as principais publicações desde a sua concepção por Fred Glover em 1977 até o momento.

3.1 CASOS ESPECIAIS DE PRV COM COLETA E ENTREGA MISTA

Golden *et al.* (1985) propuseram heurísticas para o PRV com Coleta e Entrega da forma mista. Nesse tipo de problema a entrega e a coleta são realizadas separadamente. Pode ocorrer no mesmo roteiro, mas não ao mesmo tempo no mesmo cliente. Esses autores propuseram resolver um PRV e depois tentar inserir as coletas ao longo do roteiro. Para esse mesmo tipo de problema, Casco, Golden e Wasil (1988) desenvolveram um procedimento de inserção baseado em carga onde os custos de inserção dos clientes com demanda de coleta são baseados na carga ainda por entregar. Salhi e Nagy (1999) modificaram esse método ao permitir que os nós de coleta fossem inseridos de forma agrupada.

Halse (1992) adotou uma heurística de agrupar primeiro e roteirizar depois utilizando um problema relaxado com algoritmo de atribuição e procedimentos de melhoria com modificações de rota para resolver um PRV. Mosheiov (1994) abordou o mesmo problema resolvendo primeiramente um Problema de Caixeiro Viajante (PCV*)* e tentando, em seguida, reinserir o depósito. Anily e Mosheiov (1994) o resolveram por meio de uma árvore de extensão mínima (*Minimum Spanning Tree, MST*) e a transformando em PCV.

O método utilizado por Anily e Mosheiov (1994) é conhecido como o método construtivo de Christofides (1976).

Mosheiov (1998) estudou o caso particular da frota homogênea em que todas as demandas são iguais à unidade. O autor desenvolveu heurísticas construtivas com base no princípio clássico de primeiro roteirizar e depois agrupar (do inglês c*luster-first, route-second*), também denominado de particionamento do roteiro (BEASLEY, 1983).

Vistos alguns casos especiais de problemas de roteirização com coleta e entrega realizadas na forma mista, cabe a seguir apresentar os métodos de soluções desenvolvidos para o caso de coletas e entregas realizadas simultaneamente, soluções para o PRVCES.

3.2 MÉTODOS UTILIZADOS ANTERIORMENTE NA SOLUÇÃO DO PRVCES

A quantidade de estudos envolvendo o PRVCES tem crescido nos últimos anos por se tratar de um problema básico da logística reversa. Leite (1999) entende a logística reversa como a área da logística que planeja, opera e controla o fluxo e as informações logísticas correspondentes, do retorno dos bens de pós-venda e de pós-consumo ao ciclo de negócios ou ao ciclo produtivo, por meio de canais de distribuição reversos, agregando-lhes valor de diversas naturezas: econômico, ecológico, legal, logístico, de imagem corporativa, entre outros.

Na FAB, ocorre a distribuição de materiais de consumo em geral e o retorno de alguns equipamentos reparáveis para recuperação nas oficinas de manutenção das organizações militares do tipo Parque de Material Aeronáutico ou nas oficinas das empresas do suporte logístico contratado, podendo ser considerado um caso especial da logística reversa.

Min (1989), no contexto de um sistema de distribuição para bibliotecas públicas e considerando exatamente dois veículos de igual capacidade, propôs uma heurística clássica de agrupar primeiro e roteirizar depois. O agrupamento dos clientes foi realizado com base em sua proximidade geográfica, enquanto que o roteamento consistiu em resolver uma extensão do problema do caixeiro viajante com restrições de capacidade adicionais de coleta e entrega realizadas simultaneamente, dois Problemas de Caixeiro Viajante com Coleta e Entrega Simultâneas (PCVCES). Este autor comenta que seu trabalho propôs a primeira formulação matemática para o PRVCES disponível na literatura.

Para Savelsberg e Sol (1995) o PRVCES é um tipo de Problema de Coleta e Entrega (*Pickup and Delivery Problem, PDP*) onde todas as origens e todos os destinos ficam no depósito. Esses autores propuseram uma formulação genérica para o *PDP*.

Durante esta pesquisa foram encontradas pouquíssimas referências sobre procedimentos de solução exata para o PRVCES, exceto algumas sugestões no trabalho de Halse (1992), o algoritmo introduzido por Angelelli e Mansini (2002) e o algoritmo de Dell'Amico, R*ighini e Salani,* (2006) que resolveram um PRVCES com 40 clientes até a otimalidade. Gribkovskaia *et al*. (2006) também consideraram a possibilidade de solução exata no caso particular do PRVCES com apenas um veículo, um PCVCES. Esses autores propuseram um modelo de Programação Inteira Mista que admite que as coletas e entregas sejam realizadas tanto de forma mista como simultaneamente ao longo da rota.

Salhi e Nagy (1999) propuseram uma heurística construtiva, que consiste basicamente em construir uma solução parcial, contendo somente clientes de entrega e em seguida inserir clientes de coleta segundo diferentes critérios de inserção até produzir uma solução completa. Dethloff (2001) modificou a abordagem desses autores e desenvolveu um algoritmo de construção baseado no conceito de inserção mais barata. Nessa abordagem, clientes são sucessivamente inseridos nas rotas. Primeiramente, um cliente é escolhido, sendo a rota inicial criada. Para todos os clientes, não ainda inseridos, o valor de um critério de inserção para todas as posições

possíveis é computado e a melhor inserção, dentre as viáveis, é realizada. O critério de inserção consiste de três fatores: (i) da distância extra a ser percorrida, a distância do cliente candidato à base, (ii) da capacidade remanescente do veículo calculada após a inserção candidata e (iii) uma parcela relativa à distância da base, priorizando, segundo certo peso, os clientes mais distantes da base. Esta fase é repetida até que nenhum cliente possa ser inserido na rota. Então, a próxima rota é construída com um novo cliente dentre os clientes ainda não inseridos. Novamente, as inserções são realizadas como descrito até que não haja mais inserções viáveis. Esta construção de rotas e procedimentos de inserção é repetida até que todos os clientes sejam inseridos.

Vural (2003) aplicou dois métodos com base em Algoritmos Genéticos. Este autor comenta que é a primeira aplicação de uma meta-heurística para solução do PRVCES.

Crispim e Brandão (2005) apresentaram um algoritmo híbrido composto da meta-heurística Busca Tabu (BT) e da meta-heurística de Descida em Vizinhança Variável (*Variable Neighbourhood Descent, VND*) na solução de PRV com entrega e coleta realizadas de forma mista e de forma simultânea. Segundo esses autores esse trabalho constitui a primeira utilização de meta-heurística híbrida para solução de PRVCES e de PRV com coleta e entrega realizadas na forma mista.

Nagy e Salhi (2005) propuseram um método de solução para o PRVCES considerando a restrição de limite de tempo para percorrer cada rota. Este consiste de quatro fases. (i) Uma solução inicial viável é gerada. (ii) Essa solução é melhorada por meio dos seguintes procedimentos: reversão de rota, 2-opt , 3-opt e relocação inter-rotas. (iii) As rotas são reparadas e (iv) é tentado, novamente, melhorar a qualidade da solução.

Gökçe (2004) implementou a meta-heurística Colônia de Formigas para solução do PRVCES, tendo obtido o excepcional resultado de 89 milhas para o problema de Min (1989), cujo melhor resultado conhecido até essa data era de 91 milhas obtido por

Dethloff (2001). Nessa meta-heurística, métodos computacionais denominados de formigas artificiais são utilizados para construir uma solução para o problema utilizando os valores de certos parâmetros, denominados de feromônio, calculados a partir das soluções geradas anteriormente. Vários experimentos foram realizados com os problemas de teste disponíveis na literatura, tendo-se obtido resultados comparáveis aos melhores obtidos anteriormente para os mesmos problemas de teste. Gajpal e Prakash (2009) também utilizaram a meta-heurística Colônia de Formigas na solução do PRVCES.

Montané e Galvão (2006) implementaram a meta-heurística Busca Tabu (BT) para resolver o PRVCES com frota homogênea. O algoritmo utiliza uma vizinhança composta com base em três movimentos de busca local inter-rotas: relocação, intercâmbio e cruzamento. Os parâmetros Tabu são ajustados no inicio do algoritmo e são mantidos fixos durante a execução. Conjuntos de problemas com até 400 nós foram resolvidos. Os autores calcularam os limites inferiores (do inglês *Lower Bound*) para medir a qualidade de seus resultados. Esse algoritmo foi estendido em Montané (2006) mediante a incorporação de um mecanismo de busca adaptativa cujo objetivo é ajustar os parâmetros Tabu de maneira dinâmica (BT Adaptativa, BTA). Este mecanismo consiste em identificar padrões na trajetória de busca e em perturbar os valores dos parâmetros da Busca Tabu de acordo com o padrão observado.

Chen e Wu (2006) propuseram uma heurística de inserção híbrida com listas Tabu e com uma metodologia por estes denominada de *record-to-record travel*, uma variante da técnica *Simulated Annealing* que apresentou resultados para os problemas de Salhi e Nagy (1999) bastante semelhantes aos resultados obtidos por Montané e galvão (2006) para esses mesmos problemas.

Bianchessi e Righini (2007) propuseram uma meta-heurística semelhante à Busca Tabu Adaptativa de Montané e Galvão (2006) na qual se destaca o uso do principio de particionamento do roteiro não consecutivo para o cálculo das soluções iniciais, a implementação de um movimento que combina trios de rotas e o ajuste dinâmico dos parâmetros da BT.

Subranian, Ochi e Cabral (2008) propuseram um procedimento baseado na meta-heurística Busca Local Iterativa (*Iterated Local Search, ILS*) que utiliza a meta-heurística *VND* como método de busca local. Esse trabalho produziu resultados altamente competitivos quando comparados com as outras meta-heurísticas utilizadas na solução do PRVCES com restrição de tempo de serviço na rota.

Zachariadis, Tarantilis e Kiranoudis (2009) propuseram uma abordagem híbrida de solução para o PRVCES incorporando a lógica de duas meta-heurísticas bem conhecidas e reconhecidas como eficazes para solucionar praticamente todas as variantes de problemas de roteirização, a Busca Tabu e a Busca Local Dirigida (do inglês G*uided Local Search*). Vários experimentos foram realizados com os problemas de teste disponíveis na literatura, tendo-se obtido resultados comparáveis aos melhores obtidos anteriormente.

Mine *et al.* (2009) propuseram resolver o PRVCES com um algoritmo heurístico híbrido, denominado *GENILS*, baseado nas técnicas *ILS*, *VND* e *GENIUS (método* desenvolvido por Gendreau, Hertz e Laporte em 1992). O algoritmo proposto foi testado em três conjuntos de problemas de teste da literatura e se mostrou competitivo com as melhores abordagens existentes. Dos 72 problemas teste desse conjunto, em 49 o *GENILS* foi capaz de gerar as melhores soluções existentes e, em 9, superou os melhores resultados da literatura.

3.3 APLICAÇÕES DA BUSCA DISPERSA EM PROBLEMAS CLÁSSICOS DE ROTEIRIZAÇÃO

A Busca Dispersa (BD) é uma meta-heurística cuja concepção inicial foi proposta por Fred Glover em 1977. Essa meta-heurística teve seu desenvolvimento e aplicações paralisadas por cerca de 20 anos. Contudo, nos últimos doze anos, o interesse da pesquisa acadêmica pelo método foi intensificado, tendo sido classificada por Rego e Leão (2002) como um método de busca evolucionária ou método baseado em

população, tal qual o algoritmo genético (AG), embora haja significativa diferença entre esses métodos, principalmente com relação ao uso da aleatoriedade, inexistente na maioria das implementações da BD.

Dois anos após a publicação por Glover (1998) do livro *A Template for Scatter Search and Path Relinking*, Rego (2000) aplicou a BD na solução de um PRV clássico e propôs a combinação das soluções do Conjunto de Referência por meio de um mecanismo de arcos comuns entre soluções. O Conjunto de Referência é parte da infraestrutura da BD e constitui o conjunto de partida da busca por melhores soluções.

Corberan *et al.* (2002) utilizaram uma abordagem multiobjetivo na solução de um PRV com ônibus escolares em áreas rurais. Desenvolvem um procedimento de solução que considera cada objetivo separadamente e busca por um conjunto de soluções eficientes ao invés de uma única solução ótima. Seu procedimento de solução é baseado em construção, melhoria e combinação de soluções seguindo uma lógica semelhante à da BD. Testes experimentais com dados reais foram utilizados para validar o procedimento.

Greistorfer (2003) apresentou uma aplicação para o Problema do Carteiro Chinês Capacitado (*Capacitated Chinese Postman Problem, CCPP*) de uma meta-heurística híbrida com BT e BD, obtendo resultados bastante competitivos comparados com os resultados obtidos, na época, por meio de outros métodos.

Russel e Chiang (2004) resolveram um PRV com janela de tempo com a BD. Seu objetivo foi gerar soluções de forma eficiente e investigar os efeitos dos parâmetros do conjunto de referência relativos a tamanho, qualidade e diversidade. Tanto o método de arcos comuns como um modelo de otimização baseado em cobertura de conjunto foram utilizados para realizar a combinação de soluções.

Alegre, Laguna e Pacheco (2005) construíram um procedimento de solução para o caso especial do PRV Periódico (*Periodic Vehicle Routing Problem, PVRP*), em que gerentes de operações de um fabricante de autopeças no norte da Espanha

descreveram um problema em que o fabricante precisava coletar matéria bruta e peças de locais geograficamente dispersos. As peças eram coletadas periodicamente segundo uma programação. O problema consistiu em atribuir uma programação de coleta a cada localidade e também estabelecer rotas diárias com o objetivo de minimizar os custos totais de transporte. Esses autores demonstraram que a BD é capaz de encontrar soluções de alta qualidade em tempo computacional aceitável.

Wendolsky e Scheurer (2006) resolveram um PRV com a BD. Eles utilizaram a Reconexão por Caminhos (do inglês *Path Relinking*, *PR*) como mecanismo de combinação de soluções. Ao longo do tempo, várias estratégias foram desenvolvidas para auxiliar a obtenção de melhores soluções durante a busca. A *PR* é uma delas. Trabalhando a partir do princípio de que boas soluções possuem características semelhantes, a *PR* permite gerar soluções explorando caminhos entre uma solução corrente e uma solução de elite mediante movimentos que introduzem elementos da solução de elite na solução corrente. Esses autores afirmaram que a BD híbrida com a *PR* apresentou um excelente desempenho, se comparada com outras meta-heurísticas na solução dos mesmos problemas de teste disponíveis na literatura.

Belfiore (2006) resolveu um PRV com frota heterogênea, entregas fracionadas e com restrição de janela de tempo com a BD utilizando um procedimento de busca gulosa, adaptativa e aleatória (do inglês *Greedy Random Adaptive Search Procedure, GRASP*, FEO; RESENDE, 1995) modificado especialmente para a geração das soluções iniciais diversas. Primeiramente, foi implementada uma heurística construtiva (adaptação da heurística de inserção de Dullaert *et al.*, 2002). As soluções do conjunto de referência são geradas por meio da incorporação de elementos aleatórios na heurística construtiva. Nesse tipo de problema, cada cliente pode ser abastecido por mais de um veículo, há um único centro de distribuição, a demanda de cada cliente pode ser maior que a capacidade dos veículos e, além das restrições de janelas de tempo, há também as restrições de capacidade dos veículos e acessibilidade (alguns clientes não podem ser atendidos por alguns tipos de veículos). Os modelos foram aplicados em um dos maiores grupos varejistas brasileiros, que abastece 519 clientes distribuídos em 12 estados brasileiros. Os resultados mostraram melhorias no caso

real da empresa, reduzindo em até 8% o custo total da operação.

Belfiore e Fávero (2007) resolveram problemas semelhantes ao anterior com a BD, as 168 instâncias de teste de Liu e Shen (1999) e as instâncias de Solomon (1987), sendo que os resultados computacionais revelaram que sua implementação obteve melhores resultados do que outros métodos publicados na literatura.

Campos, Corberán e Mota (2007) resolveram um PRV com entrega fracionada com a BD. Os resultados obtidos comparam-se aos melhores resultados conhecidos até essa data para os problemas de teste utilizados por Archetti e Esperanza (2006) na solução por BT.

Sosa, Galvão e Gandelman (2007) resolveram um PRV clássico com a BD. Experimentos computacionais foram realizados em quatro conjuntos de dados disponíveis na literatura. Os resultados mostraram que a BD é robusta e competitiva para solucionar o PRV Clássico em termos de qualidade das soluções obtidas e tempo computacional aceitável para os conjuntos de problemas de teste utilizados.

Convergindo a revisão bibliográfica para o problema e o método de solução abordados neste trabalho, apresentam-se a seguir as aplicações realizadas anteriormente para solução do PRVCES por meio da BD.

3.4 APLICAÇÕES DA BD NA SOLUÇÃO DE PRVCES

Sosa, Gandelman e Sant'anna (2008) investigaram o comportamento de quatro diferentes métodos de geração de soluções diversas baseados em GRASP e nas heurísticas de Beasley (1983), de varredura de Wren e Holliday (1972) e de economias de Clarke e Wright (1964). O desempenho de diferentes implementações de BD nas soluções de três diferentes conjuntos de problemas da literatura foi medido e os experimentos computacionais realizados demonstraram que a BD é flexível,

robusta e uma alternativa competitiva em termos de qualidade das soluções geradas em tempos computacionais aceitáveis.

Sosa *et al.* (2008, 2009) desenvolveram novas formas de geração de soluções diversas bem como um mecanismo de medição de distância entre soluções. Esses autores desenvolveram novas formas de combinação das soluções do conjunto de referência. Os experimentos computacionais foram realizados em três conjuntos de teste disponíveis na literatura tendo demonstrado que a BD constitui uma robusta alternativa para solução de instâncias PRVCES.

3.5 PRINCIPAIS PUBLICAÇÕES SOBRE A BUSCA DISPERSA

Diversos pesquisadores apresentaram estudos e aplicações da BD, porém, há de se conferir especial destaque às publicações de Fred Glover, de Manuel Laguna e de Rafael Martí. Estes autores estabeleceram o conjunto de métodos desta meta-heurística amplamente aplicada, nesta última década, na solução de problemas de otimização combinatória em diversas nas áreas, principalmente na Engenharia de Produção, na Logística, na Ciência da Computação e na Engenharia de Transportes:

- Glover (1977) lançou os fundamentos da BD, porém, o início real ocorreu quando Fred Glover estudava o problema do escalonamento de tarefas em máquinas (do inglês *Job Shop Scheduling*) em 1963.
- Glover (1998) lançou o livro: A Template for Scatter Search and Path Relinking.
- Glover, Laguna e Martí (2000) lançaram o livro: *Fundamentals of Scatter Search and Path Relinking*.
- Glover, Laguna e Martí (2003) lançaram o livro: *Scatter Search and Path Relinking: Advances and Applications*.
- Laguna e Martí (2003) lançaram o livro: *Scatter Search: Methodology and Implementations in C*.
- Glover, Laguna e Martí (2004) lançaram o livro: *New Ideas and Applications of Scatter Search and Path Relinking*.

- Glover, Laguna e Marti (2004) lançaram o livro: *Scatter Search and Path Relinking: Foundations and Advanced Designs*.
- Laguna e Armentano (2001) escreveram um artigo que posteriormente foi reescrito no Capítulo 10 do livro *Metaheuristic Optimization Via Adaptive Memory and Evolution: Tabu Search and Scatter Search,* de Rego (2005). Esses autores relatam as suas experiências com a implementação da Busca Dispersa nas soluções de diversos problemas de otimização combinatória.
- Martí, Laguna e Glover (2006) publicaram o artigo: *Principles of Scatter Searc*h.

3.6 RESUMO DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou uma revisão bibliográfica abrangendo alguns casos especiais de PRV com coleta e entrega mista; algumas soluções desenvolvidas anteriormente para o PRVCES, sendo concluído que diversos métodos heurísticos foram introduzidos, tendo-se iniciado no trabalho de Min (1989), que apresentou a primeira proposta de formulação matemática para o problema; aplicações anteriores da BD em problemas de roteirização, sendo importante destacar que a primeira aplicação foi realizada por Rego (2000), que introduziu o método de combinação de soluções mediante a contagem e registro dos arcos comuns entre soluções; aplicações recentes da BD na solução do PRVCES, sendo concluído que há diversos outros métodos competitivos, mas que os resultados obtidos por meio da BD apresentaram resultados bastante promissores; e as principais publicações sobre a BD desde a sua concepção por Fred Glover em 1977 até o momento.

4 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

O problema objeto da presente pesquisa refere-se a uma única base ou sistema de distribuição/coleta atendendo a um conjunto de clientes por meio de uma frota homogênea de veículos, que partem e retornam a uma base central distinta dos demais pontos. Cada cliente pode requerer até dois tipos de serviço: uma coleta e uma entrega.

O elemento crítico deste tipo de problema é que ambas as atividades precisam ser realizadas simultaneamente pelo mesmo veículo. Isto é crítico porque a inserção de um cliente em qualquer ponto de um roteiro precisa ser precedida de uma verificação do seu impacto na viabilidade física desse roteiro. Isto é, a demanda de entrega do cliente candidato à inserção precisa ser menor do que a folga na capacidade do veículo ao sair da base e a demanda de coleta deste cliente precisa ser menor do que a folga na capacidade do veículo no último cliente visitado subtraído do que seria entregue no cliente candidato.

Assim, como os itens a serem entregues são carregados no depósito a fim de serem transportados aos seus destinos, analogamente, os itens a serem coletados são carregados nos pontos de origem e transportados ao depósito. O objetivo é encontrar o conjunto de rotas atendendo a todos os clientes com um custo mínimo (ANGELLELI; MANSINI, 2002).

O problema pode ser formulado da seguinte forma (GÖKÇE, 2004). Sejam:

Conjuntos:

- N Conjunto de todos os nós. Os clientes e a base.
- C Conjunto dos clientes
- V Veículos

Parâmetros:

- Q Capacidade do veículo
- n Número de clientes

D_{iv} Demanda total de entregas remanescentes ainda a bordo do veículo $v \in V$ após atender o cliente $i \in C$.

P_{iv} Quantidade coletada pelo veículo $v \in V$ até chegar ao cliente $i \in C$, inclusive.

c_{ij} distância entre o vértice $i \in C$ e o vértice $j \in C$.

d_i demanda de entrega no vértice $i \in C$.

p_i demanda de coleta no vértice $i \in C$.

Variáveis de decisão:

$x_{ij}^v = 1$, se cliente $j \in C$ é atendido imediatamente após o cliente $i \in C$ pelo veículo $v \in V$, caso contrário $x_{ij}^v = 0$.

Matematicamente, o PRVCES pode ser descrito da seguinte forma: Seja V um conjunto de veículos homogêneos, C um conjunto de clientes e $G(N, A)$ um grafo direcionado. O conjunto $N = \{0, ..., n+1\}$ denota um conjunto de vértices. O grafo consiste de $|C|+2$ vértices onde os clientes são denotados por $1, 2, ..., n$ e a base é representada por 0 e $n+1$. O conjunto $A = \{(i, j): i \neq j\}$ denota o conjunto de arcos que representa as conexões entre a base e os clientes e também entre clientes. Nenhum arco termina no vértice *0* e nenhum arco se origina no vértice *(n+1)*.

Se P é um caminho elementar em G, $P = \{0 = i_0, i_1, ..., i_p, i_{p+1} = n+1\}$, com p clientes. Uma solução viável para o problema pode ser representada por um conjunto de caminhos elementares originados em *0* e terminados *(n+1)*, esse caminho inicia e termina na base. Esses caminhos visitam cada cliente exatamente uma vez satisfazendo as restrições de capacidade dos veículos. Ou seja, a soma da demanda de coletas já atendidas (P_{iv}) com as quantidades a serem entregues (D_{iv}) não pode exceder a capacidade do veículo. O objetivo é minimizar a distância total percorrida pelos veículos.

A formulação matemática é apresentada a seguir:

$$Min \sum_{v \in V} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} c_{ij} x_{ij}^{v} \tag{4.1}$$

Sujeito a:

$$\sum_{v \in V} \sum_{i \in N} x_{ij}^{v} = 1 \qquad \forall j \in C \tag{4.2}$$

$$\sum_{i \in N} x_{ih}^{v} - \sum_{j \in N} x_{hj}^{v} = 0 \qquad \forall h \in C, \forall v \in V \tag{4.3}$$

$$D_{iv} + P_{iv} \leq Q \qquad \forall v \in V, \forall i \in C \tag{4.4}$$

$$D_{(n+1)v} = 0 \qquad \forall v \in V \tag{4.5}$$

$$P_{(n+1)v} = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} x_{ij}^{v} p_i \qquad \forall v \in V \tag{4.6}$$

$$D_{0v} = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} x_{ij}^{v} d_i \qquad \forall v \in V \tag{4.7}$$

$$P_{0v} = 0 \qquad \forall v \in V \tag{4.8}$$

$$x_{ij}^{v} \left(P_i^{v} + p_j - P_j^{v} \right) = 0 \qquad \forall i, j \in C, \forall v \in V \tag{4.9}$$

$$x_{ij}^{v} \left(D_i^{v} + d_j - D_j^{v} \right) = 0 \qquad \forall i, j \in C, \forall v \in V \tag{4.10}$$

$$D_i^{v} \geq 0 \qquad \forall i \in C, \forall v \in V \tag{4.11}$$

$$P_i^{v} \geq 0 \qquad \forall i \in C, \forall v \in V \tag{4.12}$$

$$x_{ij}^{v} \in \{0,1\} \qquad \forall i, j \in C, \forall v \in V \tag{4.13}$$

A função objetivo (4.1) visa minimizar a distância total de viagem. As restrições (4.2) garantem que cada cliente seja atendido exatamente uma vez. Já as restrições (4.3) garantem que se um veículo chega a um cliente *h* o mesmo veículo deixa esse cliente. O conjunto de restrições (4.4) estabelece os limites de capacidade dos veículos. As restrições (4.5) e (4.6) garantem que quando os veículos retornam à base, eles tenham realizado todas as entregas e estejam carregados com todas as cargas coletadas. Por outro lado, o conjunto das restrições (4.7) e (4.8) estabelecem que cada veículo deixe a base carregado com todos os itens a serem distribuídos. O conjunto de equações não lineares (4.9) e (4.10) estabelecem que se o arco (*i, j*) é percorrido pelo veículo *v* então a quantidade a ser entregue pelo veículo decrescerá em d_i enquanto a quantidade coletada aumentará em p_i. Finalmente, as restrições (4.11) e (4.12) denotam as restrições de não negatividade e (4.13) estabelece que x_{ij}^{v}

é binário.

Diferentemente da formulação matemática apresentada, Nagy e Salhi (2005), Crispim e Brandão (2005) e Ropke e Pisinger (2006) consideraram, na sua formulação, minimizar a frota necessária e, em seguida, a distância percorrida.

Quanto à complexidade computacional, Anily (1996) provou que o PRVCES é *NP-Hard* demonstrando primeiramente que o Problema de Roteirização de Veículos com *Backhaul* (*Vehicle Routing Problem with Backhaul, VRPB*) é *NP-hard* da seguinte forma: Se a demanda de coleta (p_i) no cliente *j* for nula, $p_i = 0 \ (j \in C)$, ou ainda que seja menor ou igual à demanda de entrega (d_i), $p_i \leq d_i \ \ (j \in C)$, então o problema se reduz a um PRV que reconhecidamente é *NP-hard*. Assim, conclui-se que o *VRPB* também é *NP-hard*. Como o *VRPB* pode ser considerado um caso especial do PRVCES onde a demanda de entrega d_i de cada cliente seja nula, o PRVCES, que é mais complexo, também é *NP-hard*.

A conclusão anterior implica que, devido à expectativa de tempos computacionais excessivamente longos de solução por métodos exatos e como se prevê a aplicação operacional do método, a solução do PRVCES deverá ser realizada por meio de métodos não exatos, mais especificamente heurísticas. Propõe-se, então, uma estratégia de solução baseada na meta-heurística Busca Dispersa para resolver esse problema, que é apresentada no próximo capítulo.

5 ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO

Na revisão bibliográfica foram apresentadas algumas possibilidades de solução exata para o Problema de Roteirização de Veículos com Coleta e Entrega Simultâneas (PRVCES) tais como: o trabalho de Halse (1992), o algoritmo introduzido por Angelelli e Mansini (2001) e o algoritmo desenvolvido por Dell'Amicco (2006). Entretanto, a utilização desses métodos foi descartada devido à natureza *NP-Hard* do PRVCES (ANILY, 1996), tendo em vista que se pretende escolher um método de solução que possibilite a obtenção de soluções em tempos de processamento reduzidos, compatíveis com as necessidades operacionais da aplicação à qual se destina.

Diversos métodos de solução aproximada foram encontrados na literatura que poderiam ter sido utilizados na solução desse problema:

- a Heurística construtiva de Salhi e Nagy (1999);
- a heurística construtiva de Dethloff (2001);
- o Algoritmo Genético utilizado por Vural (2003);
- o método das quatro fases de busca local de Salhi e Nagy (2004);
- a meta-heurística Colônia de Formigas utilizada por Gökçe (2004) e por Gajpal e Prakash (2009);
- a meta-heurística híbrida Busca Tabu (BT) com busca em vizinhança variável (*Variable Neighborhood Search, VNS*) utilizada por Crispim e Brandão (2005);
- o método com BT Adaptativo desenvolvido por Montané e Galvão (2006); e
- a heurística híbrida *record-to-record travel* com lista tabu de Chen e Wu (2006).

Todos utilizados para solucionar o PRVCES.

A decisão pelo desenvolvimento da solução com a Busca Dispersa (BD), também conhecida como *Scatter Search* (GLOVER, 1977, 1998), deveu-se, principalmente, à experiência anterior na solução de problemas de mochila com este método (MESQUITA; CUNHA, 2008) e a diversos outros resultados de sucessos

encontrados na literatura para solução de problemas gerais de roteirização:

- Rego (2000);
- Corberan *et al.* (2002);
- Greistorffer (2003);
- Russel e Chiang (2004);
- Alegre, Laguna e Pacheco (2005);
- Wendolsky e Scheurer (2006);
- Belfiore (2006);
- Belfiore e Fávero (2007);
- Campos, Corberán e Mota (2007);
- Sosa, Galvão e Gandelman (2007); e
- também aplicações recentes do método com sucesso na solução de PRVCES:
  - Sosa, Gandelman e Sant'Anna (2008);
  - Sosa, Laguna, Gandelman e Sant'Anna (2008, 2009).

No presente trabalho, propõe-se solucionar o PRVCES por meio da BD e de maneira integrada com a meta-heurística Descida em Vizinhança Variável (*Variable Neighborhood Descent, VND*), proposta por Mladenovic e Hansen (1997), a ser utilizada como Método de Melhoria da BD.

Pretende-se também utilizar as heurísticas construtivas: Clarke-Wright (CW), proposta por Clarke e Wright (1964), Vizinho Mais Próximo (VMP), proposta por Belmore e Nemhauser (1968) e a heurística Inserção Mais Barata (IMB), proposta por Rosenkrantz, Stearns e Lewis (1977), associadas na composição do Método de Geração de Soluções Diversas da BD.

Nas seções seguintes serão apresentados os detalhes de implementação das etapas da BD proposta por Glover (1998) mais as recomendações de diversos outros autores que a utilizaram na solução de Problemas de Roteirização de Veículos (PRV) e de PRVCES.

Serão apresentadas também as necessidades de experimentos complementares

destinados a estabelecer as técnicas mais eficientes a serem utilizadas nas implementações das etapas da BD especificamente para solucionar o PRVCES.

5.1 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE A BUSCA DISPERSA

Segundo Rego e Leão (2002), a Busca Dispersa é uma modalidade de algoritmo evolucionário. Ou seja, um método que se inspira em mecanismos evolucionários naturais para desenvolver algoritmos computacionais (YAO, 1996). Os algoritmos desenvolvidos segundo esse método utilizam um repositório de informações codificado em um formato que imita a informação genética (cromossomos) e opera segundo uma lógica que permite que tais repositórios troquem informação entre si.

Holland (1975) se refere aos algoritmos evolucionários como métodos baseados em população e que essas técnicas de solução iterativas manipulam uma população de indivíduos (de soluções) e as fazem evoluir de acordo com algumas regras que precisam estar claramente especificadas. Por evoluir entende-se as alterações realizadas nas características da solução no sentido de torná-la uma solução mais próxima do ótimo global.

Além da Busca Dispersa, proposta por Glover (1977, 1998), destacam-se ainda os seguintes métodos heurísticos baseados em população:

- O Algoritmo Genético (Fogel *et al.*, 1966; Holland, 1962; Rechenberg, 1965);
- A meta-heurística Colônia de Formigas (Colorni *et al.*, 1994; Costa e Hertz, 1997; Dorigo e Gambardella, 1997; Gambardella e Dorigo, 1996; Maniezzo *et al*., 1994);
- A meta-heurística Memória Adaptativa (Golden *et al.*, 1997; Rochat e Taillard, 1995; Taillard *et al.*, 1997) e
- A meta-heurística Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization, PSO*) desenvolvida por Eberhart e Kennedy (1995).

Segundo Glover (1998), a estratégia da BD consiste em gerar um conjunto de soluções dispersas no espaço de soluções a partir de um determinado conjunto de

soluções de referência. Isto é realizado por meio de combinações lineares entre as soluções do conjunto de referência.

Essas combinações originam soluções que herdam características (arcos, clientes ou trechos de roteiros, no caso de problema de roteirização) das soluções de origem. Um algoritmo de melhoria é, então, aplicado em cada nova solução com o objetivo de se tentar gerar soluções com qualidade ainda melhor. Essas soluções melhoradas formam um novo conjunto de soluções dispersas. Assim, o novo conjunto de soluções de referência a ser utilizado na próxima iteração é selecionado dentre as soluções de referência atuais e dentre as soluções dispersas.

Ainda segundo Glover (1998), a BD consiste em combinar as soluções existentes no chamado conjunto de referência (*RefSet)*. Este conjunto possui dois subconjuntos chamados *RefSet1* e *RefSet2* (*RefSet* = *RefSet1* U *RefSet2*). Durante o processo de busca por meio de combinações, as novas boas soluções que forem sendo encontradas substituirão soluções do *RefSet1* e as soluções com elevado grau de diversidade, segundo critério específico de medida, substituirão soluções do *RefSet2*, dando origem ao *RefSet* a ser utilizado na iteração seguinte.

O critério específico de medida do grau de diversidade comentado no parágrafo anterior é referido, neste trabalho, como dissimilaridade ou distância entre soluções. É um número que indica o quanto uma solução difere da outra. O método de cálculo de dissimilaridade adotado será detalhado logo adiante, na seção 5.1.3.

5.1.1 Passos da meta-heurística Busca Dispersa

De acordo com Glover (1998), o método consiste basicamente dos cinco passos descritos a seguir:

Passo 1. **Método de geração de soluções diversas:**
O método consiste em gerar um repositório de soluções, referido como conjunto *P*, com *PSize* soluções viáveis e diversas.

Duarte *et al.* (2009) recomendam que as soluções candidatas a fazerem parte do conjunto *P* sejam aceitas somente se superarem um limiar inferior de dissimilaridade (vide seção seguinte).

Passo 2. **Método de melhoria:**
Trata-se de um método de busca local para melhorar as soluções diversas do conjunto *P* e as soluções a serem submetidas à atualização do Conjunto de Referência (*RefSet*).

Martí (2003) recomenda que este método seja aplicado a apenas uma parcela das soluções, a fim de melhorar o desempenho computacional, além de preservar a diversidade.

Passo 3. **Método de criação e atualização do conjunto de referência :**
É o método destinado a criar e atualizar o *RefSet* extraindo-se do conjunto *P* as soluções que comporão o *RefSet*.

Passo 3.1 Criação do *RefSet*:
O *RefSet* é iniciado com as *b1* melhores soluções de *P pelo critério de qualidade*. As *b2* soluções restantes são selecionadas dentre as soluções em *P* ainda não incluídas, da seguinte forma: mede-se a dissimilaridade entre todas as soluções não inseridas e o *RefSet* atual, selecionando-se a solução mais dispersa para inclusão no *RefSet2*. Repete-se este passo até que haja *(b1+b2)* soluções no *RefSet*.

Passo 3.2 Atualização do *RefSet*:
As soluções resultantes das combinações, no caso de melhoria (na qualidade ou na diversidade), substituem as piores soluções do *RefSet*. Existem dois aspectos que devem ser considerados na atualização de *RefSet*.

O primeiro aspecto considera duas estratégias de atualização:

Tipo 1 - Atualização estática (S): Na atualização estática, o *RefSet* não muda até que todas as combinações de soluções de *RefSet* tenham sido realizadas. As soluções são armazenadas em um *pool* de soluções oriundas do Método de Combinação de Soluções.

Tipo 2 - Atualização dinâmica (D): Na atualização dinâmica, o *RefSet é*

atualizado sempre que uma nova solução, gerada por uma combinação, qualifica-se para entrar em *RefSet*.

O segundo aspecto considera dois critérios de atualização: por qualidade e diversidade (Q&D) e apenas por qualidade (Q).

Critério 1 - Atualização Q&D: Se a nova solução resultante da combinação for melhor do que a pior solução de *RefSet1*, então a nova solução a substitui. Caso contrário verifica-se se a dissimilaridade dessa solução é maior do que a dissimilaridade da pior solução do *RefSet2*. Caso isto seja verdadeiro a nova solução a substitui.

Critério 2 - Atualização Q: Se a nova solução resultante da combinação for melhor do que a pior solução de *RefSet* pelo critério de qualidade, então a nova solução a substitui.

Passo 4. **Método de geração de subconjuntos :**
Este método especifica a forma pela qual são selecionados os subconjuntos para a aplicação do método de combinação das soluções do *RefSet*.

Passo 5. **Método de combinação das soluções :**
Busca combinar as soluções do *RefSet*. Para isso, consideram-se os subconjuntos formados no Passo 4.

5.1.2 Símbolos utilizados na apresentação dos métodos da BD

Foi adotada a seguinte notação para a descrição detalhada da BD:

P - *Conjunto de soluções produzidas pelo Método de Geração de Diversificação.*
PSize - *Tamanho do conjunto P. Quantidade de soluções de P.*
Refset - *Conjunto de Referência.*
Refset1 - *Subconjunto de qualidade do RefSet.*
Refset2 - *Subconjunto de diversidade do Refset.*
Pool - *Conjunto de soluções geradas pelo Método de Combinação de Soluções utilizado quando o critério for de Atualização Estática.*
b - *Tamanho do RefSet.*

b1 - *Tamanho do Refset1.*

b2 - *Tamanho do Refset2.*

5.1.3 Limiar inferior de dissimilaridade

Neste trabalho, utiliza-se com frequência o termo dissimilaridade. Este termo é um critério específico de medida do grau de diversidade entre soluções, referido por Sosa *et al.* (2008) como distância entre soluções. É um número que indica o quanto uma solução difere da outra.

Tendo em vista o método de cálculo de dissimilaridade proposto neste trabalho e descrito na seção seguinte, o limiar inferior de dissimilaridade é o valor mínimo de dissimilaridade que uma solução deve possuir para ingressar no Conjunto *P* e no *Refset*. Duarte *et al.* (2009) propuseram um terceiro critério de atualização do *RefSet*. Uma nova técnica em que as atualizações do *Refset* ocorrem somente por qualidade, porém considerando um limiar inferior de dissimilaridade. Isto é, atualizar por qualidade, sem prejudicar a diversidade, substituindo as piores soluções por soluções melhores e dispersas.

Entende-se que soluções muito próximas ou similares, quando combinadas, gerariam soluções também muito próximas ou similares, prejudicando a exploração do espaço de soluções.

5.1.4 Método de cálculo da dissimilaridade entre soluções

Rego (2000), Russel e Chiang (2006), Belfiore (2006) e Corberan *et al.* (2007) diferenciaram uma solução de outra em problemas de roteirização de veículos, por meio da contagem de arcos não comuns entre soluções, a soma da quantidade de arcos da primeira solução inexistentes na segunda solução com a quantidade de arcos da segunda solução inexistentes na primeira.

Foram observados nos experimentos com esse método que havia pares de soluções

com diferentes valores de função objetivo apresentando a mesma contagem de arcos não comuns, e também que havia soluções de igual contagem de arcos não comuns com diferente estrutura de roteiros resultando em soluções distintas. De acordo com o método da contagem de arcos não comuns, essas soluções seriam iguais. Isto evidencia que esse método não é totalmente adequado para medição da dissimilaridade, pois, nesses dois casos, essas soluções são diferentes.

Este fato provocou a modificação, neste trabalho, do método tradicional utilizado por esses autores com a multiplicação da quantidade de arcos não comuns pelo valor do arco médio das duas soluções, sendo ainda somada uma parcela relativa à diferença entre os valores de função objetivo de cada solução (expressão 5.1). Isto conferiu melhor discriminação entre as soluções e obteve assim, melhor controle sobre a medida da dispersão no espaço de soluções.

Foi adotada a seguinte notação (5.1):

dis_{ab} - Dissimilaridade entre as soluções *a* e *b*
d_{ab} - Quantidade de arcos não comuns entre as soluções *a* e *b*
$\bar{A}_{ab}$ - Média dos comprimentos dos arcos das soluções *a* e *b*
FO_a - Valor da função objetivo da solução *a*
FO_b - Valor da função objetivo da solução *b*
N - Quantidade de clientes do problema

A dissimilaridade entre as soluções “a” e “b” pode ser calculada da seguinte forma:

$$dis_{ab} = d_{ab} \; x \; \bar{A}_{ab} + \left| \frac{(FO_a - FO_b)}{N} \right| \qquad (5.1)$$

5.1.5 Valores dos parâmetros da BD

Um fator crítico da BD é o ajuste dos parâmetros *PSize*, *b1* e *b2*. Experimentos foram realizados por Sosa *et al.* (2008) com o objetivo de avaliar o conjunto de parâmetros para os problemas de teste de Salhi e Nagy (1999). A Tabela 5.1 apresenta os resultados desses experimentos, indicando que ao utilizar (*b1*=10) e (*b2*=10) há melhoria geral de 1,34% nos resultados, sendo que o tempo de

processamento aumenta em 82%.

Tabela 5.1 – Testes realizados por Sosa *et al.* (2008)

b1	b2	*Gap* (%)	Diferença (%)	Tempo (s)	Variação (%)
5	5	13,60	-	189,4	-
10	10	13,42	-1,34	344,8	82%

Testes semelhantes foram realizados por Belfiore (2006) com as instâncias de Solomon (1987), tendo utilizado (*b1*=5) e (*b2*=5).

Russel e Chiang (2004) ao solucionar PRV com janela de tempo realizaram testes com os problemas R1 e RC1 de Solomon (1987) e chegaram aos resultados apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Testes realizados por Russel e Chiang (2004)

b1+b2	Distância	%	Veículos	Minutos
20	25642	-	241	51
10	25524	-0,46	242	13
5	25654	0,05	243	3

Apesar de Russel e Chiang terem decidido utilizar (*b1+b2*) igual a 20, os resultados da Tabela 5.2 corroboram a escolha de (*b1+b2*) igual a 10 utilizados nos trabalhos de Belfiore (2006), de Sosa *et al.* (2008) e também neste trabalho.

Laguna e Armentano (2001) recomendam inicializar o *RefSet* com metade das soluções pelo critério de qualidade e metade pelo critério de diversidade, ou seja, (*b1=b2*). Segundo esses autores um balanço adequado entre intensificação e diversificação é um atributo desejável dos mecanismos de busca em geral e da BD especialmente.

5.2 GERAÇÃO DAS SOLUÇÕES DIVERSAS

Rego e Leão (2002) orientam que o conjunto *P* de soluções precisa ser constituído de soluções que difiram significativamente uma da outra e que é apropriado o uso de um procedimento sistemático para se gerar essas soluções.

Duarte *et al.* (2009) recomendam que as soluções a serem submetidas á inserção no conjunto *P* sejam aceitas somente se superarem um limiar inferior de

dissimilaridade. Ou seja, que difiram uma da outra pelo menos no valor do limiar de dissimilaridade.

Considerando a possibilidade da existência de um conjunto *P* de soluções diversas que fosse perfeito, suas soluções estariam perfeitamente distribuídas no espaço de soluções. Ao se plotar as dissimilaridades de cada solução em relação ao conjunto *P* em um plano cartesiano, isto apresentaria, como gráfico, uma linha reta horizontal.

Com base nesse raciocínio, definiu-se o processo de avaliação das alternativas para o Método de Geração de Diversificação a ser utilizado neste trabalho. As alternativas foram obtidas por meio de diversos experimentos com a geração de 30 soluções com cada heurística construtiva (VMP, IMB e *CW*) e com a geração de 30 soluções com essas heurísticas combinadas. Propõem-se, neste trabalho, ordenar e plotar as dissimilaridades de cada solução *s* gerada em relação a *P-{s}* no plano cartesiano e medir o coeficiente de correlação (*R*) e o coeficiente angular da linha de tendência (a).

A expressão (5.2) apresenta a fórmula proposta, neste trabalho, a ser utilizada para avaliação da dispersão do conjunto *P* (*DP*). Inspecionando-se essa expressão verifica-se que quanto mais próximo da unidade for o valor de *DP,* melhor será a dispersão do conjunto *P*.

$$DP = \frac{R}{1 + a} \tag{5.2}$$

5.2.1 Composição do Conjunto *P* de soluções diversas

Esta seção destina-se a validar o Método de Geração de Soluções Diversas a ser utilizado neste trabalho.

O conjunto *P* será composto de *PSize* soluções diversas e viáveis para o PRVCES. Esse conjunto constitui um repositório de soluções de partida para a Busca Dispersa. Essas soluções precisam ser construídas, uma a uma, por meio de uma ou mais heurísticas construtivas de roteirização contemplando as restrições do

PRVCES explicitadas na formulação matemática do Capítulo 4.

Segundo Schopf (2004), heurísticas construtivas são aquelas que utilizam técnicas de adição na construção da solução do problema. A cada iteração vão sendo agregados novos elementos à solução até sua completude, configurando um processo de construção contínuo e gradativo.

Segundo Laporte *et al.* (1999), as heurísticas construtivas clássicas de roteirização são:

- Heurística de economias de Clarke e Wright (1964),
- Heurística de varredura de Wren e Holiday (1972) e a
- Heurística de agrupar e roteirizar (do inglês *Cluster-First, Route-Second*) de Fisher e Jaikumar (1981).

Além das construtivas clássicas estudas por Laporte *et al.* (1999) podem-se utilizar também outras heurísticas construtivas bastante conhecidas: Vizinho Mais Próximo (VMP), proposta por Belmore e Nemhauser (1968), Inserção Mais Barata (IMB), originalmente desenvolvida por Rosenkrantz, Stearns e Lewis (1977), mas melhor detalhada em Campbell e Savelsberg (2004) e a Heurística do tipo rotear primeiro – agrupar depois (do inglês *Cluster-First, Route-Second*) proposta por Beasley (1983).

Neste trabalho, escolheu-se utilizar as heurísticas VMP e IMB devido à sua facilidade de implementação.

Também a escolha da heurística de economias de Clarke e Wright (1964) deveu-se à sua precisão, pois segundo Balou (1983), pode-se chegar a obter resultados a 2% em relação à solução ótima absoluta.

A heurística de varredura de Wren e Holiday (1972), bastante disseminada por Gillet e Miller (1974), não foi escolhida porque os problemas de teste de Dethloff (2001) e de Min (1989) estão disponíveis em forma de tabelas de distâncias entre os nós, não estando disponíveis as coordenadas geográficas necessárias ao cálculo das coordenadas polares utilizadas nesta heurística.

A seguir são apresentadas as heurísticas VMP, IMB e CW, as particularidades consideradas para solucionar o PRVCES e o método de se gerar soluções diversas com cada uma essas heurísticas isoladamente e em conjunto.

5.2.1.1 Geração de soluções diversas com a heurística VMP

Desenvolvida por Belmore e Nemhauser (1968), a heurística VMP consiste em partir de um vértice inicial e construir uma solução escolhendo, a cada iteração, o vértice mais próximo do último vértice escolhido para compor o roteiro. Este processo é realizado até que se tenha visitado todos os clientes.

A implementação do VMP para solução do PRVCES, implementada neste trabalho, insere clientes durante a construção dos roteiros enquanto, em cada cliente, a soma dos pesos das cargas a serem entregues mais a soma dos pesos das cargas coletadas não ultrapasse a capacidade do veículo. Ou seja, a demanda de entrega do cliente candidato precisa ser inferior à folga na capacidade do veículo ao sair da base e a demanda de coleta precisa ser inferior à folga na capacidade do veículo no cliente atual somada com a demanda de entrega para que a inserção seja factível.

Sempre que a capacidade do veículo é superada com uma inserção, verifica-se a possibilidade de viabilizar essa inserção com a inversão do roteiro. Caso essa inversão torne o roteiro viável, o cliente é inserido e o roteiro é invertido. Finalmente, o roteiro é finalizado e um novo roteiro é criado a partir do cliente mais próximo não visitado, até que todos os clientes sejam visitados exatamente uma vez.

Nos experimentos utilizando-se somente a heurística VMP na geração de soluções diversas, a solução *s* foi gerada considerando-se um conjunto de soluções $P = \{1, 2, 3, ..., s, ..., PSize\}$, sendo que a solução *s* é iniciada com a criação do primeiro roteiro a partir do *s-ésimo* vizinho mais próximo da base inserindo-se clientes por VMP até que todos os clientes sejam visitados exatamente uma vez.

Exemplificando, caso a próxima solução a ser gerada seja a 13ª, essa solução é iniciada no 13º cliente mais próximo da base, até que todos tenham sido visitados.

As distâncias de cada cliente à base são ordenadas de forma crescente antes de se iniciar a geração das soluções por VMP.

5.2.1.2 Geração de soluções diversas com a heurística IMB.

Segundo Campbell e Savelsberg (2004), há várias possibilidades de construção de soluções com a heurística IMB que podem ser caracterizadas por meio das respostas aos seguintes questionamentos:

- Como construir o roteiro inicial?
- Qual o próximo cliente a ser inserido?
- Onde inserir o cliente escolhido?

No caso da construção de uma solução para o PRVCES, precisa-se ainda responder às seguintes questões:

- O veículo precisa sair da base com todas as cargas a serem entregues. A demanda de entrega do cliente a ser inserido é inferior à folga na capacidade do veículo ao sair da base?
- A demanda de coleta do cliente a ser inserido é inferior à folga na capacidade do veículo ao sair do cliente atual menos o que será entregue?
- Caso o ponto de inserção seja anterior ao cliente final do roteiro, como isto afetaria os clientes seguintes? O roteiro continuaria viável?

Durante a construção de uma solução para o PRVCES, a inserção poderá ser realizada desde que a capacidade remanescente do veículo a comporte. Há então três aspectos que precisam ser verificados: (i) Se a demanda de entrega do cliente candidato é inferior à folga na capacidade do veículo ao sair da base, (ii) se a demanda de coleta é inferior à folga na capacidade do veículo no cliente que antecede a inserção e (iii) se a alteração na capacidade remanescente do veículo, devido à inserção desse cliente, compromete a viabilidade do roteiro nos arcos seguintes. É preciso verificar todo o roteiro considerando a inserção do cliente candidato antes de realizar a inserção.

Sempre que um cliente candidato *j* superar a capacidade do veículo imediatamente após o atendimento de um cliente *i* é verificada a possibilidade de viabilizar a inserção com a inversão do roteiro. Caso a inversão torne o roteiro viável, o cliente é inserido e o roteiro é invertido.

Nos experimentos utilizando-se somente a heurística IMB na geração de soluções diversas, as *PSize* soluções foram geradas considerando-se um conjunto de soluções *P* = {1, 2, 3,*..., s,..., PSize*}, sendo que a solução *s* é iniciada com a criação de um roteiro pelo *s-ésimo* vizinho mais próximo da base e pelo cliente mais distante destes. A seguir, criam-se ou outros roteiros a partir do cliente não visitado mais próximo da base e o segundo nó é o cliente não visitado mais distante deste e da base. O processo de IMB em cada roteiro é continuado enquanto o roteiro seja viável. Quando essa construção atingir a inviabilidade inicia-se a construção de outro roteiro caso ainda hajam clientes não visitados.

Exemplificando, caso a próxima solução a ser gerada seja a 17ª, essa solução é iniciada com um roteiro definido pelo 17º cliente mais próximo da base e o cliente mais distante destes (da base e do 17º cliente), continuando com as inserções até que todos os clientes tenham sido inseridos. Os roteiros seguintes desta solução são iniciados pelo cliente não visitado mais próximo da base.

5.2.1.3 Geração de soluções diversas com a heurística *CW*

Segundo Lysgaard (1997), a heurística de economias *CW* foi originalmente desenvolvida para solucionar o PRV por Clarke e Wright (1964). Esta heurística sucessivamente une roteiros formando ciclos hamiltonianos, a depender das restrições do problema.

A heurística de economias é iniciada com a adoção da pior solução possível para resolver o problema de roteirização. A pior solução é considerada aquela a qual cada cliente é atendido por um veículo em rotas independentes entre o depósito (ponto inicial) e cada cliente. A seguir calcula-se e ordena-se de forma decrescente os ganhos que se obteria com a união de cada par de roteiros (LYSGAARD, 1997).

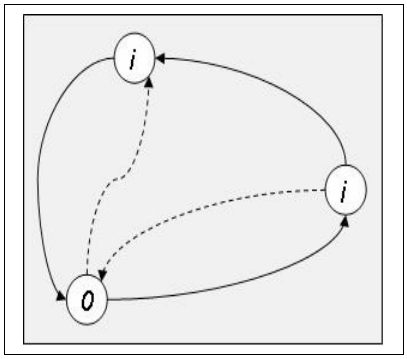

Figura 5.1 - União de roteiros pela heurística CW

Seja s_{ij} o ganho ou economia (*s* do inglês *savings*) que seria obtido com a união dos roteiros do cliente *i* e do cliente *j* e c_{ij} o custo do deslocamento no trecho *i-j*.
Em cada iteração, todas as combinações de rotas possíveis são analisadas através da fórmula $s_{ij} = c_{0i} + c_{0j} - c_{ij}$, onde *0* representa o depósito. As rotas serão unidas aos pares, a iniciar pelo par de maior economia (Figura 5.1).

Segundo Liu e Shen (1999), dois roteiros contendo os clientes *i* e *j* podem ser combinados, desde que *i* e *j* estejam ou na primeira ou na última posição de seus respectivos roteiros.

Segundo Cordeau *et al.* (2002), há duas possibilidades de implementação para a heurística *CW*: A versão paralela e a versão sequencial. Na versão paralela iniciam-se as uniões de roteiros a partir do topo da lista de economias, realizando-se as uniões seguindo estritamente a ordem decrescente de economias e construindo roteiros paralelamente.

A versão sequencial, descrita em Cordeau *et al.* (2002), consiste na combinação de roteiros a um mesmo roteiro inicialmente escolhido, até que não seja mais possível a combinação deste com nenhum outro, passando então para outro roteiro que será tomado como referência.

Segundo Cordeau *et al.* (2002), a versão paralela, cuja maior economia é sempre escolhida, obtém melhores resultados que a versão sequencial. Neste trabalho optou-se por implementar a versão paralela da heurística *CW*.

Nos experimentos utilizando-se somente a heurística *CW* na construção de soluções para o PRVCES será necessário verificar, a cada tentativa de união de roteiros, se a soma do que falta entregar (e que ainda está embarcado) com o que já foi coletado em cada cliente do roteiro resultante dessa união não ultrapassa a capacidade do veículo.

Sempre que as demandas de algum cliente no roteiro resultante dessa união tornem o roteiro inviável é verificada a possibilidade de viabilizá-lo com a inversão. Caso a inversão o torne viável, a união é realizada e o roteiro resultante é invertido. Caso contrário, o roteiro resultante é descartado, passando-se a avaliar o par de roteiros da próxima economia, até que toda a lista de economias tenha sido percorrida.

Nos experimentos utilizando-se somente a heurística *CW* na geração de soluções diversas, as *PSize* soluções serão geradas considerando-se um conjunto de soluções *P* = {1, 2, 3*,..., s,..., PSize*}, sendo que a solução *s* é iniciada com a união dos roteiros cujas extremidades contêm os clientes da *s-ésima* economia.

Exemplificando, caso a próxima solução a ser gerada seja a 23ª, essa solução é iniciada com a união dos roteiros da 23ª economia, considerando que as economias já estejam ordenadas de forma decrescente. Após realizar a união da última economia continuam-se as uniões de roteiros a partir da primeira economia até que toda a lista de economias tenha sido percorrida.

5.2.1.4 Geração mista de soluções diversas com limiar de dissimilaridade.

A consideração de um limite mínimo de dissimilaridade (Limiar) para que uma solução seja aceita no conjunto *P* de soluções diversas baseia-se na proposta de Duarte *et al.* (2009), cujo pseudocódigo encontra-se na Figura 5.2. O cálculo do limiar (*L*) é realizado por meio da expressão (5.3), cujos parâmetros são: *dis* a dissimilaridade entre duas soluções, *MinDis* a dissimilaridade mínima, *MaxDis* a dissimilaridade máxima e *p* o percentual definido na inicialização da BD.

$$L = MinDis + p * (MaxDis - MinDis) \tag{5.3}$$

```
1. Inicie com P = ∅
While ( |P| < PSize )
{
  2. Construa uma solução x
  3. Se x ∉ P e d(x,P) > Limiar então inclua x em P (i.e. P = P ∪ {x}),
     caso contrário, descarte x.
}
```

Figura 5.2 - Pseudocódigo do método de geração de diversificação.

Este método consiste em gerar as *PSize* soluções com as heurísticas VMP, IMB e CW mediante os seguintes passos:

Passo 1: - Gerar três soluções iniciais, uma com cada heurística e incluí-las no Conjunto *P*.

Passo 2: - Determinar a dissimilaridade entre essas soluções (*dis*).

Passo 3: - Determinar *MinDis* e *MaxDis*

Passo 4: - Calcular a Limiar por meio da expressão (5.3). Quanto ao valor de *p*, pode-se realizar experimentos a fim de se determinar o valor mais adequado. Os experimentos mostraram que o valor de *p* não é crítico, tendo-se variado de 10% a 25% sem alterações significativas no resultado.

Passo 5: - Gerar a próxima solução com IMB*.

Passo 6: - Medir a menor dissimilaridade desta solução em relação às soluções em *P*.

Passo 7: - Se *dis* for maior do que *MaxDis*, atualizar *MaxDis.* Se *dis* for menor do que *MinDis*, atualizar *MinDis.* Atualizar o limiar conforme a expressão 5.3.

Passo 8: - Se *dis* for maior do que o limiar incluir a solução em *P* e seguir para o passo 9. Caso contrário, gerar uma solução com VMP e uma com CW, escolher a solução de maior dissimilaridade e ir para o Passo 7.

Passo 9: - Repetir a partir do passo 5 até que haja *PSize* soluções diversas no conjunto *P.*

*A escolha do método IMB como heurística base, a heurística que será utilizada com maior frequência neste método, deve-se à melhor capacidade de gerar soluções dispersas, conforme pode ser observado na Tabela 6.1 e na Figura 6.2.

Com base na análise das Figuras 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4, juntamente com a Tabela 6.1. pode-se concluir que os experimentos apresentaram resultados favoráveis ao uso misto das heurísticas VMP, IMB e CW, escolhendo-se soluções que possuam dissimilaridade superior ao limiar para inclusão no conjunto *P*, como Método de Geração de Soluções diversas.

5.3 MELHORIA DAS SOLUÇÕES

Neste trabalho foram implementadas seis estruturas de vizinhança que podem ser utilizadas no Método de Melhoria da BD. Adota-se uma relação de precedência entre as estruturas de vizinhanças determinada experimentalmente. Essas estruturas de vizinhança foram utilizadas na composição da meta-heurística *VND*.

Segundo Freitas *et al.* (2007), a meta-heurística *VND*, desenvolvida por Mladenovic e Hansen (1997), é um método de busca local que consiste em explorar o espaço de soluções por meio de trocas sistemáticas de estruturas de vizinhança. O método *VND* utiliza uma estrutura de vizinhança principal visando melhorar a solução corrente, quando não é mais possível, o método troca a vizinhança corrente por outra, retornando à primeira vizinhança sempre que houver melhoria e passando para a vizinhança seguinte quando não houver melhoria. O algoritmo termina após utilizar todas as estruturas de vizinhança sem conseguir melhorar a solução corrente.

Estruturas de vizinhança implementadas neste trabalho:

- 2-opt (CROES, 1958) e 3-opt (LIN, 1965).
- Relocação inter-rotas ou *shift* – tenta mover um cliente de uma rota para outra (SOSA *et al.*, 2007).
- Relocação intrarrota ou *local shift* – tenta mover um cliente na mesma rota (SOSA *et al.*, 2007).

- Intercâmbio ou *swap* – tenta trocar dois clientes em rotas diferentes (SOSA *et al.*, 2007).
- Cruzamento ou *crossover* – tenta trocar os trechos finais entre roteiros que se cruzem com o objetivo de eliminar o cruzamento e encurtar as distâncias (SOSA *et al.*, 2007).

É importante salientar que as implementações de todos esses movimentos de busca local foram especialmente realizadas para lidar com o PRVCES. Os movimentos somente são efetivados se as restrições de capacidade do veículo forem atendidas.

As seções seguintes tratam das descrições desses movimentos, especialmente com relação à verificação da viabilidade das modificações a serem realizadas nos roteiros. O procedimento de verificação desta viabilidade o faz em duas etapas: (i) totaliza todas as demandas de entrega a serem realizadas e a confronta com a capacidade do veículo, pois este precisa sair da base carregado com todas as entregas a serem realizadas, (ii) verifica, arco a arco, até o retorno à base, se o que estava carregado no cliente anterior menos o que irá ser entregue mais o que irá ser coletado no cliente seguinte, não ultrapassa a capacidade do veículo (expressões 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 da formulação matemática do Capítulo 4).

5.3.1 Heurísticas de melhoria 2-opt e 3-opt

Os procedimentos de melhoria intrarrota 2-opt e 3-opt funcionam de maneira semelhante, sendo que a única diferença está no número de arcos envolvidos na análise (dois ou três). Esses procedimentos buscam eliminar cruzamentos entre trechos de um mesmo roteiro por meio da inversão do trecho interior ao laço formado.

A ideia desses procedimentos de melhoria é bastante simples e pode ser mais bem explicada pelo 2-opt: elimine duas arestas do roteiro e insira novamente duas arestas de forma cruzada. Se esta nova configuração for melhor que a anterior, ou seja, se a distância diminuir, inverta o sentido do trecho existente entre essas duas arestas e mantenha a nova rota (Figura 5.2). Caso contrário, escolha novamente

duas arestas para análise.

Para o procedimento 3-opt, o número de arcos envolvidos aumenta. São eliminadas três arestas e são testadas todas as combinações de ligações novas entre estas cidades. As novas rotas são testadas e, assim como no 2-opt, caso alguma se mostre de custo inferior à rota atual, a troca é mantida.

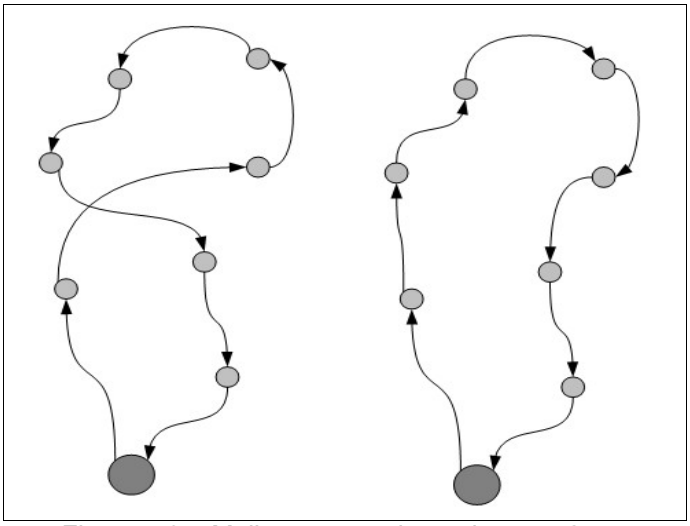

Figura 5.3 – Melhoramento de roteiro com 2-opt

Na melhoria de uma solução para o PRVCES por meio de 2-opt ou de 3-opt, a inversão do trecho interior ao laço formado pelo cruzamento com a intenção de eliminá-lo (Figura 5.3) pode resultar na inviabilidade do roteiro. Essa inviabilidade não se deve à extrapolação na capacidade do veículo ao sair da base, porque a soma total das demandas de entrega não é alterada. Porém, as folgas na capacidade do veículo em cada cliente do trecho invertido e do trecho seguinte precisam ser recalculadas e confrontadas com as entregas e coletas realizadas por meio do procedimento de verificação da viabilidade do roteiro. Caso este procedimento resulte inviável, o roteiro resultante é descartado.

5.3.2 Movimento de relocação inter-rotas na solução de PRVCES

Esse movimento procura mover um cliente de um roteiro para outro com a finalidade de tentar encurtar esses roteiros. Observa-se na Figura 5.4 que haveria redução das distâncias da solução se o cliente “x” pertencesse ao roteiro da esquerda.

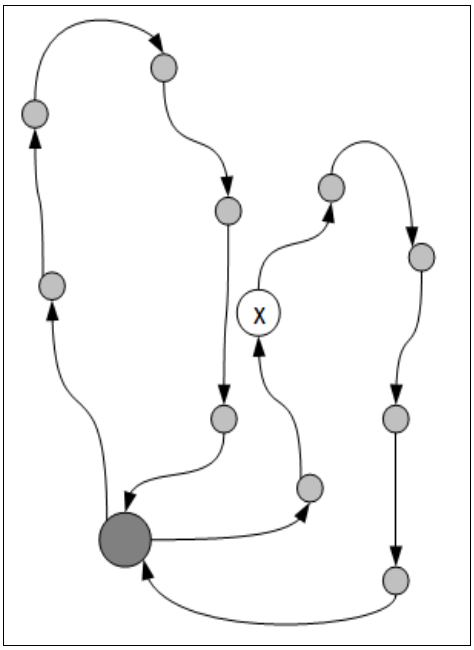

Figura 5.4 – Possibilidade de relocação Inter-rotas

Neste caso, não haveria prejuízo algum para o roteiro que cede o cliente. Entretanto, precisa-se verificar, no roteiro que recebe o cliente, se a demanda de entrega é inferior à folga na capacidade do veículo ao sair da base e recalcular as novas folgas até o final do roteiro por meio do procedimento de verificação da viabilidade do roteiro. Caso este procedimento resulte inviável, o roteiro resultante é descartado.

5.3.3 Movimento de relocação intrarrota na solução de PRVCES

Esse movimento procura mover um cliente para outra posição no mesmo roteiro, com a finalidade de tentar encurtá-lo. Observa-se na Figura 5.5 que se o cliente “x” fosse movido para depois do cliente “y” haveria encurtamento desse roteiro.

Neste caso, como a soma de todas as demandas de entrega não é alterada, não é necessário verificar se a folga na capacidade do veículo ao sair da base é superada. Entretanto, precisam-se recalcular todas as folgas na capacidade do veículo, desde o cliente “x” da Figura 5.5 até o final do roteiro, por meio do procedimento de verificação da viabilidade do roteiro. Caso este procedimento resulte inviável, o roteiro resultante é descartado.

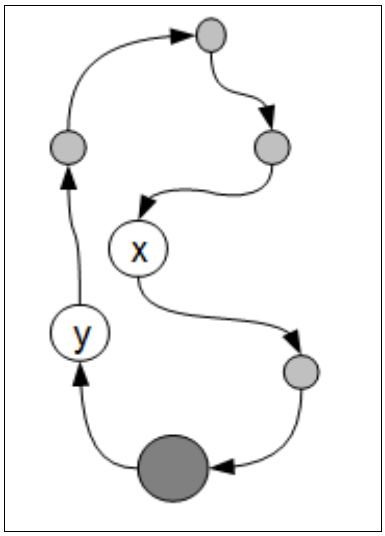

Figura 5.5 – Possibilidade de relocação Intrarrota

5.3.4 Movimento de intercâmbio na solução de PRVCES

Esse movimento procura trocar clientes entre roteiros com a finalidade de tentar reduzir a distância percorrida. Observa-se na Figura 5.6 que haveria encurtamento das distâncias de ambos os roteiros se o cliente “x” pertencesse ao roteiro da esquerda e o cliente “y” pertencesse ao roteiro da direita.

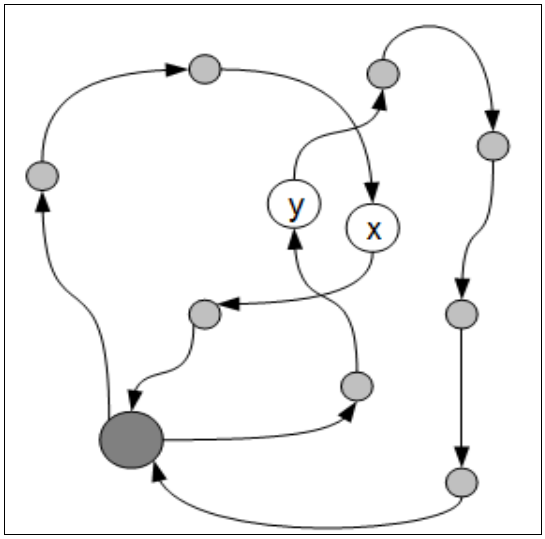

Figura 5.6 – Possibilidade de intercâmbio de clientes

Neste caso, a soma de todas as demandas de entrega em cada roteiro é alterada, sendo necessário verificar se as folgas nas capacidades dos veículos ao saírem da base são superadas. Precisam-se recalcular todas as folgas nas capacidades dos

veículos até o final de cada roteiro por meio do procedimento de verificação da viabilidade do roteiro. Caso este procedimento resulte inviável, o roteiro resultante é descartado.

5.3.5 Movimento de cruzamento na solução de PRVCES

Este movimento é semelhante ao 2-opt com a diferença que as trocas de arcos são realizadas entre roteiros diferentes. Essas trocas visam eliminar cruzamentos nesses roteiros com a finalidade de reduzir a distância total percorrida (Figura 5.7).

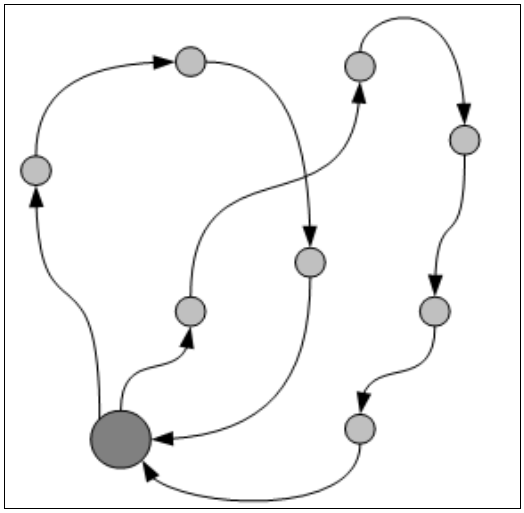

Figura 5.7 – Possibilidade de cruzamento

Neste caso, a soma de todas as demandas de entrega em cada roteiro é alterada, sendo necessário verificar se as folgas nas capacidades dos veículos ao saírem da base são superadas. É necessário recalcular todas as folgas nas capacidades dos veículos até o final de cada roteiro por meio do procedimento de verificação da viabilidade do roteiro. Caso este procedimento resulte inviável, o roteiro resultante é descartado.

5.3.6 Necessidade de experimentos computacionais

Com o objetivo de eleger um grupo de movimentos de busca local eficiente para compor o método de melhoria com *VND* a ser utilizado na BD para os problemas de teste utilizados, realizou-se uma série de experimentos descrita de forma detalhada

no capítulo 6.

Os experimentos mostraram que o conjunto de movimentos que apresentou melhor desempenho foi 2-opt, cruzamento*,* relocação inter-rotas e relocação Intrarrota, nesta ordem, concluindo-se então que este conjunto de movimentos de busca local é o mais adequado para compor o método de melhoria com *VND* a ser utilizado neste trabalho.

5.3.7 Funcionamento do Método de Melhoria

Com o objetivo de controlar as vizinhanças na aplicação do *VND*, o método de melhoria com *VND* implementado recebe um parâmetro, denominado "Nível", sendo que executa as buscas locais de acordo com o valor do "Nível" da seguinte forma:

Nível 1: - Executa somente 2-opt até alcançar o ótimo local.

Nível 2: - Executa 2-opt e cruzamento até alcançar o ótimo local.

Nível 3: - Executa 2-opt, cruzamento e relocação inter-rotas até alcançar o ótimo local.

Nível 4: - Executa 2-opt, cruzamento, relocação inter-rotas e relocação intrarrota até alcançar o ótimo local.

É importante lembrar que, em cada nível, o *VND* alterna as vizinhanças sempre que ocorre uma melhoria e interrompe a busca ao alcançar um ótimo local.

5.3.8 Utilização do Método de Melhoria na geração do Conjunto P

Martí (2003) sugere que, ao se melhorar as *PSize* soluções do conjunto *P*, deve-se buscar não prejudicar a diversidade. Assim, resolveu-se utilizar o método de melhoria com VND da seguinte forma: As *b1* primeiras soluções geradas são submetidas ao *VND* com nível 3. As (*b1+b2*) soluções seguintes são submetidas ao *VND* com nível 2 e nas demais soluções se utiliza o *VND* com nível 1.

5.3.9 Utilização do Método de Melhoria na atualização do *Refset*.

Com o objetivo de se melhorar as soluções combinadas antes de submetê-las ao Método de Atualização do *RefSet*, buscando, ao mesmo tempo, não prejudicar a diversidade de soluções e não aumentar significativamente o tempo de processamento (MARTÍ, 2003), utilizou-se o método de melhoria com *VND* da seguinte forma: As *b1* primeiras soluções geradas foram submetidas ao *VND* com nível 4. As (*b1*+*b2*) soluções seguintes foram submetidas ao *VND* com nível 3. As demais soluções foram submetidas ao *VND* com nível 2.

5.4 CRIAÇÃO E ATUALIZAÇÃO DO CONJUNTO DE REFERÊNCIA

Tanto na criação como na atualização do *RefSet* é preciso avaliar a solução candidata a entrar nesse conjunto pelos critérios de qualidade e de diversidade. Quanto à qualidade avalia-se a viabilidade e o valor de função objetivo. Soluções inviáveis não são aceitas no *RefSet*. Quanto ao critério de diversidade avalia-se o valor da dissimilaridade entre a solução candidata e o *RefSet*.

5.4.1 Avaliação das soluções

A avaliação das soluções geradas quanto ao valor da função objetivo é realizada de forma incremental. O valor da distância total percorrida é incrementado ou decrementado à medida que sejam realizadas alterações na estrutura da solução. Esta alternativa é mais eficiente do que se deixar para avaliar a solução ao final de cada modificação realizada, pois podem acontecer muitas alterações durante a busca local e isto prejudicaria o desempenho computacional.

Outro procedimento bastante utilizado, tanto durante a geração de soluções pelas heurísticas construtivas como durante os movimentos de busca local, é a verificação das restrições de peso. Este método foi especialmente implementado para lidar com as restrições do PRVCES e funciona da seguinte forma: recebe o índice de um roteiro e um indicador do sentido de tráfego que se quer avaliar, verifica se a soma

de todas as entregas a serem realizadas neste roteiro não supera a capacidade do veículo e verifica de forma sequencial, em cada cliente, se a folga na capacidade do veículo comporta a entrega e a coleta a ser realizada no cliente seguinte.

Durante a geração de soluções pelas heurísticas construtivas, e também durante os movimentos de busca local, surgem necessidades de mudanças na estrutura de um ou mais roteiros. Antes de se efetivar a mudança, cada roteiro é avaliado conjuntamente com a mudança pretendida. Caso o roteiro seja viável no sentido atual, efetiva-se a mudança. Caso contrário verifica-se a viabilidade deste percorrendo-o no sentido inverso. Caso seja viável no sentido inverso, efetiva-se a mudança e reverte-se o roteiro. Obviamente, no caso de inviabilidade nos dois sentidos, essa mudança é descartada.

Antes de se submeter qualquer solução para inclusão no conjunto *P* ou no *Refset* torna-se necessário verificar se esta é viável. A avaliação da viabilidade verifica o seguinte: se há algum cliente não visitado, se há algum cliente visitado mais de uma vez e se há algum roteiro inviável por restrição de capacidade do veículo.

5.4.2 Método de criação do *RefSet1*

Criadas as soluções do conjunto *P,* o repositório de soluções diversas da BD, essas soluções são ordenadas de forma crescente pelo valor da função objetivo. Então, as *b1* melhores soluções de *P* são diretamente inseridas no *RefSet1*, exatamente como proposto por Glover (1998).

Convém lembrar que, conforme Glover (1998), para se determinar a dissimilaridade de cada solução *s* do conjunto *P* ao *RefSet* é necessário registrar todas as dissimilaridades entre essas soluções e cada solução do *RefSet*, selecionando-se a mínima, sendo esta mínima a dissimilaridade da solução considerada ao *RefSet* como um todo.

Conforme se pode observar na Figura 5.8, o círculo branco representa uma solução do conjunto *P* e os demais círculos representam as soluções do *RefSet*. A seta

contínua representa a dissimilaridade entre essa solução e o *RefSet*, ou seja, a menor dissimilaridade entre a solução candidata e as soluções do *RefSet*.

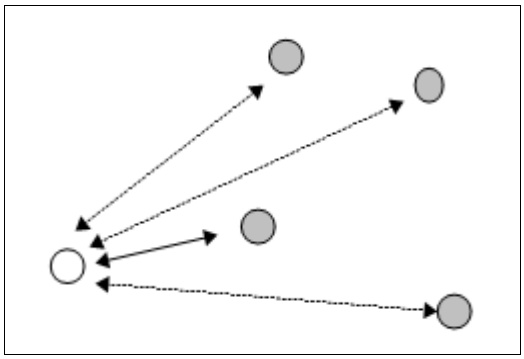

Figura 5.8 - Distância entre uma solução e o *RefSet*.

Convém lembrar que *RefSet* atual é o conjunto de todas as soluções já inseridas no *RefSet1* e no *RefSet2*.

5.4.3 Método de criação do *RefSet2*

O método proposto por Glover (1998) para criação do *RefSet2* segue os seguintes passos:

Passo 1: - Selecionar a solução mais dispersa do repositório *P* dentre as não inseridas e inserí-la no *RefSet2*. Observando-se a Figura 5.9, a solução “a” seria inserida no *RefSet2*.

Passo 2: - Atualizar as dissimilaridades das soluções do repositório *P* não inseridas em relação à solução inserida por último.

Passo 3: - Inserir a próxima solução de máxima dissimilaridade em relação ao *RefSet* dentre as soluções de *P* ainda não inseridas.

Passo 4: - Repetir a partir do passo 1 até que o *RefSet2* possua *b2* soluções.

Considerando-se os círculos em tom cinza da Figura 5.9 o *RefSet* atual e os círculos brancos soluções de *P* não inseridas, observa-se que a solução “a” é mais dissimilar ao *RefSet* do que a solução “b”. A solução “a” é mais dispersa.

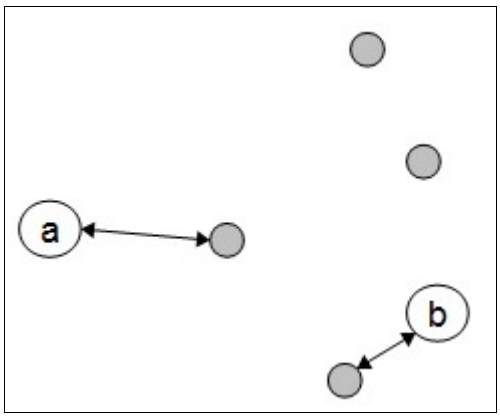

Figura 5.9 - Solução mais dispersa (a) em relação ao *RefSet*.

Depois de completado o *RefSet*, realizadas as combinações nos subconjuntos de soluções e as soluções geradas forem armazenadas no *pool* de soluções (no caso de atualização estática), essas soluções são submetidas aos métodos de melhoria, de atualização do *RefSet1* e de atualização do *RefSet2*, nesta ordem.

5.4.4 Estratégias de atualização do *RefSet*.

Existem duas estratégias de atualização do *RefSet*: Estática e dinâmica (GLOVER, 1998). Na atualização estática, as soluções combinadas são armazenadas em um *pool* de soluções até que todas as combinações sejam realizadas, para depois serem submetidas aos métodos de atualização do *RefSet1* e do *RefSet2.*

Conforme Laguna e Martí (1999), a atualização dinâmica é mais agressiva, de forma que as boas soluções entram rapidamente no *RefSet* e o método tende a convergir mais rapidamente. Como o *RefSet* é de tamanho fixo, isto implica que há soluções que saem sem terem sido combinadas. Isto pode impedir que características boas dessas soluções sejam aproveitadas pelo método de combinação de soluções. Ou seja, pode haver prejuízo na exploração do espaço de soluções.

Foi observado nos experimentos de avaliação da BD para solucionar o PRVCES que a atualização estática apresentou melhores resultados com acréscimo médio de 15% ao tempo de processamento na resolução dos problemas de Salhi e Nagy (1999). Decidiu-se utilizar somente a atualização estática no restante dos experimentos, tendo em vista que esse aumento no tempo de processamento não

prejudica a aplicabilidade da estratégia de solução proposta às instâncias de problemas da FAB.

5.4.5 Critérios de atualização do *RefSet*.

Segundo Glover (1998), o método de atualização do *RefSet1* tenta substituir alguma solução pelo critério de qualidade. Caso não o consiga, o método de atualização do *RefSet2* tenta substituir alguma solução do *Refset2* pelo critério de diversidade, ou seja, se houver alguma solução com maior valor de dissimilaridade do que as existentes, essa substitui a pior solução do *RefSet2* pelo critério de diversidade e o processo de combinação é reiniciado.

A cada nova solução inserida no *RefSet* é registrado que essa solução ainda não foi combinada, para que o reinício do processo de combinação atue somente sobre as soluções não combinadas no passado. Segundo Glover (1998), cada subconjunto de soluções a combinar precisa possuir pelo menos uma solução nova.

No critério de atualização do *RefSet* proposto por Duarte *et al.* (2009), as atualizações a serem realizadas durante o processo de busca dispersa no subconjunto de soluções de alta qualidade deverá ocorrer apenas por qualidade quando a solução candidata for melhor do que a melhor solução do *RefSet1*. As outras soluções do *RefSet* deverão ser substituídas também por qualidade, mas apenas se a solução candidata tiver um valor de dissimilaridade superior a um limite mínimo pré-estabelecido.

O capítulo 6 apresenta os resultados dos experimentos comparando-se esses critérios de atualização. Os resultados dos experimentos foram favoráveis ao uso do critério de atualização proposto por Duarte *et al.* (2009).

5.4.6 Método de regeneração do *RefSet2*.

Quando todas as soluções do *RefSet* tiverem sido combinadas o processo vai para a

próxima iteração, cujo passo mais importante é a regeneração do *RefSet2* a partir das soluções remanescentes no conjunto *P*, iniciando novamente um ciclo de combinações e tentativas de atualização do *RefSet*, até que seja atingida a contagem máxima de iterações ou que não mais haja soluções disponíveis em *P* para regeneração do *Refset2*.

5.5 GERAÇÃO DE SUBCONJUNTOS E COMBINAÇÃO DE SOLUÇÕES

A Figura 5.10 apresenta o esquema da BD segundo Martí e Laguna (2003). Nesse esquema, verifica-se que as soluções do *RefSet* são selecionadas pelo Método de Geração de Subconjuntos, para submissão ao Método de Combinação e, posteriormente, ao Método de Melhoria e ao Método de Atualização do *RefSet*, com o objetivo de se tentar substituir alguma solução do *RefSet* segundo o critério adotado.

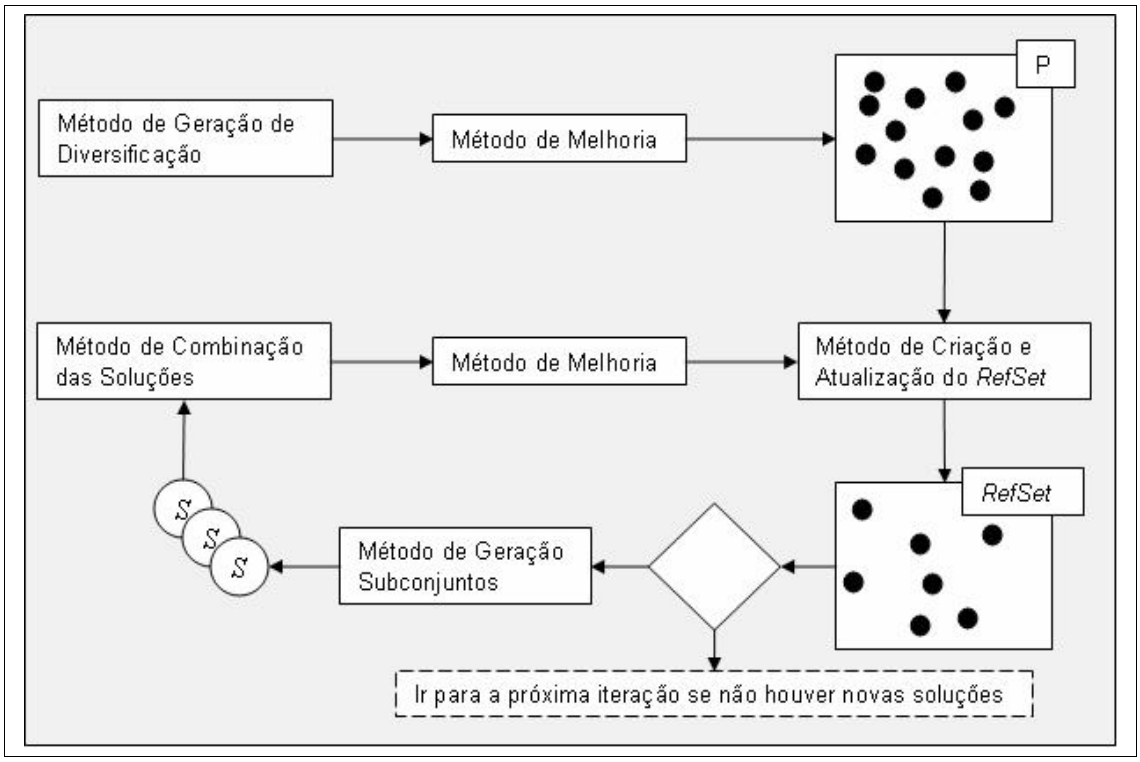

Figura 5.10 - Esquema da meta-heurística Busca Dispersa
Fonte: Martí e Laguna (2003)

5.5.1 Método de Geração de Subconjuntos

Belfiore (2006) e Sosa *et al.* (2007, 2008) utilizaram o Método de Geração de Subconjuntos de soluções que realiza a geração de todos os pares possíveis obtidos com as soluções do *RefSet1*, mais todos os pares possíveis obtidos entre as soluções do *Refset1* e as do *RefSet2*, mais todos os pares possíveis obtidos com as soluções do *RefSet2*.

Laguna e Armentano (2001), baseados na sua experiência na implementação da BD, comentam que a cerca de 80% do poder de busca pode ser atribuído aos subconjuntos de dois elementos.

Neste trabalho, este método foi implementado para gerar subconjuntos de dois elementos. Foi implementada uma rotina de controle dessas combinações com o objetivo de impedir que combinações realizadas no passado fossem realizadas novamente. Este procedimento garante que somente sejam realizadas combinações com, pelo menos, uma nova solução em cada par de soluções. Isto constitui um requisito da BD conforme proposto por Glover (1998).

5.5.2 Método de Combinação de Soluções

A seguir descreve-se o método de combinação de soluções pelo mecanismo de arcos comuns proposto por Rego (2000) e utilizado neste trabalho.

Depois de se selecionar o subconjunto de soluções a serem combinadas (gerado pelo Método de Geração de Subconjuntos), aplica-se o Método de Combinação de Soluções por arcos comuns. Esse método, conforme implementado neste trabalho, possui os seguintes passos:

Passo 1: - Identificar os arcos comuns entre as soluções.
Passo 2: - Inicializar uma nova solução com esses arcos.
Passo 3: - Criar um roteiro para cada trecho formado com esses arcos.
Passo 4: - Criar um roteiro para cada cliente não visitado.

Passo 5: - Finalizar a solução com a heurística CW.

É importante que os arcos da nova solução provenientes das soluções de origem sejam preservados (Passo 3), pois o princípio do algoritmo evolutivo é que as boas características sejam passadas de geração em geração.

5.6 RESUMO DO CAPÍTULO

Os principais tópicos abordados neste capítulo foram:

- A justificativa da utilização da meta-heurística Busca Dispersa como método de solução para o PRVCES.
- A descrição genérica do método conforme proposto por Glover (1977, 1998), juntamente com as recomendações de Laguna e Martí (1999), Rego (2000), Rego e Leão (2002), Martí (2003), Laguna e Armentano (2001) e Duarte *et al.* (2009).
- A descrição do Método de Geração de Diversificação com o uso das heurísticas VMP, IMB e CW e da necessidade de experimentos que justifiquem o uso misto dessas três heurísticas.
- A descrição do Método de Melhoria com *VND* e da necessidade de experimentos que justifiquem o uso os métodos de busca local escolhidos para a composição do *VND*.
- A descrição do Método de Criação do *RefSet*, dos procedimentos de avaliação de soluções e do método de cálculo da dissimilaridade entre soluções.
- A descrição dos Critérios de Atualização do *RefSet*, da atualização Q&D proposta por Glover (1998) e da atualização Q&L proposta por Duarte *et al.* (2009), das estratégias de atualização estática e dinâmica, do método de regeneração do *RefSet2* e dos experimentos que justifiquem o uso da atualização Q&D ou da atualização Q&L.

6 EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

A estratégia de solução para o PRVCES com meta-heurística Busca Dispersa (BD) foi codificada em linguagem C++ seguindo as orientações de Glover (1998), Rego (2000), Laguna e Armentano (2001), Laguna e Martí (2003) e Duarte *et al.* (2009). Foi utilizado o *Microsoft Visual Studio Express 2008* em um microcomputador com processador *Intel Centrino* de 1,6 GHz e 1,5 GB de memória RAM.

O primeiro problema de teste utilizado foi um problema real resolvido pela primeira vez por Min (1989). É um problema constituído de 22 clientes e um depósito. A frota de veículos é homogênea com dois veículos que possuem capacidade de transportar 10.500 libras, a quantidade total a ser entregue é de 20.300 libras e a quantidade total a ser coletada é de 19.950 libras. É fornecida uma matriz assimétrica das distâncias, não estando disponíveis as coordenadas dos clientes.

Foram também utilizados nos experimentos computacionais os conjuntos de problemas de teste de Salhi e Nagy (1999), de Dethloff (2001) e de Montané e Galvão (2006).

O conjunto de problemas de teste elaborado por Salhi e Nagy (1999) é constituído de 28 problemas de 50, 75, 100, 120, 150 e 199 nós, sendo que 14 problemas foram resolvidos neste trabalho, os problemas sem restrições de tempo de serviço na rota.

O conjunto de problemas de teste elaborado por Dethloff (2001) é constituído de 20 problemas, sendo que todos correspondem a instâncias de teste geradas aleatoriamente com 50 clientes considerando dois diferentes cenários geográficos: o cenário SCA (*scattered* ou disperso), onde as coordenadas dos clientes são distribuídas uniformemente no intervalo de 0 a 100, o cenário CON (*concentrated* ou agrupado) onde a metade dos clientes é distribuída da mesma forma que o cenário SCA, enquanto que as coordenadas da outra metade são distribuídas no intervalo de 100/3 a 200/3, de modo a representar agrupamentos de clientes. As distâncias são calculadas pela métrica euclidiana em ambos os casos.

O conjunto de problemas de teste de Montané e Galvão (2006) é constituído de 18 problemas elaborados anteriormente por Solomon (1987) e por Gehring e Homberger (1999) que foram adaptados por Montané e Galvão (2006) para o PRVCES. Esses problemas envolvem 100, 200 e 400 clientes, sendo que foram considerados, neste trabalho, os problemas com até 200 clientes, uma vez que instâncias com mais de 200 clientes não ocorrem no caso da FAB.

Os problemas utilizados já possuem histórico de soluções por diversos autores, tornando possível a comparação dos resultados desta pesquisa com os resultados obtidos por Min (1989), Dethloff (2001), Montané e Galvão (2006), Chen e Wu (2006), Sosa *et al.* (2008) e Mine *et al.* (2009).

6.1 EXPERIMENTOS PARA DEFINIÇÃO DOS MÉTODOS A SEREM UTILIZADOS NA BUSCA DISPERSA

Nesta seção são apresentados os resultados de diversos experimentos realizados com a finalidade de justificar a utilização das heurísticas construtivas para o método de geração de diversificação, das heurísticas de melhoramento para o Método de Melhoria de Soluções da BD com a meta-heurística VND e do critério de atualização do *RefSet* a ser adotado.

São avaliados os desempenhos das heurísticas Vizinho Mais Próximo (VMP), Inserção Mais Barata (IMB) e Clarke-Wright (CW), utilizadas isoladamente para produzir soluções diversas e também pelo Método Misto, se utilizadas em conjunto na geração de soluções diversas com limiar de dissimilaridade. Esses desempenhos são avaliados por meio da análise da dispersão dos valores de dissimilaridade obtidos por cada heurística e pelo Método Misto utilizando-se a expressão (5.2).

São testadas seis heurísticas de melhoramento de soluções, 2-opt, 3-opt, relocação inter-rotas, relocação intrarrota, intercâmbio e cruzamento, com a finalidade de determinar as heurísticas mais eficientes e a melhor sequência de vizinhanças a serem exploradas pela meta-heurística VND a ser utilizada como Método de Melhoria da BD.

Outros experimentos são realizados com a finalidade de comparar as eficiências entre o critério de atualização do *RefSet* por Qualidade e Diversidade (Q&D) proposto por Glover (1998) e o critério de atualização por Qualidade e Limiar de dissimilaridade (Q&L) proposto por Duarte *et al.* (2009).

Os experimentos apresentados nesta seção foram realizados com os seguintes problemas:

CMT1X - Problema de Salhi e Nagy (1999) com 50 clientes.
CMT3X - Problema de Salhi e Nagy (1999) com 100 clientes.
CMT12X - Problema de Salhi e Nagy (1999) com 100 clientes.
r101 - Problema de Montané e Galvão (2006) com 100 clientes.
rc201 - Problema de Montané e Galvão (2006) com 100 clientes.

Com o objetivo de se visualizar graficamente as soluções para os problemas cujos dados dispunham das coordenadas, foi elaborado uma rotina em planilha eletrônica com linguagem de programação *Visual Basic for Aplications* (*VBA*). Essa rotina permite que os roteiros sejam digitados na planilha e que a estrutura da solução seja visualizada graficamente.

A princípio foram selecionados apenas um problema de cada tipo com 100 clientes, tendo em vista que esta é a quantidade máxima de clientes das instâncias do problema da FAB. Posteriormente foi incluído o problema CMT1X, com 50 clientes, com o objetivo de utilizar a rotina desenvolvida em planilha eletrônica na verificação visual do funcionamento dos métodos de busca local.

6.1.1 Experimentos com o método proposto para geração de soluções diversas

As Figuras 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4 apresentam as plotagens das dissimilaridades das soluções obtidas com as alternativas utilizadas para geração de 30 soluções, respectivamente com as heurísticas VMP, IMB, CW e com o Método Misto, sendo que o eixo horizontal apresenta os índices das soluções do Conjunto *P* e o eixo vertical os valores de dissimilaridade. Cada gráfico apresenta também a função linear da linha de tendência.

Os coeficientes angulares obtidos em cada gráfico foram utilizados no cálculo da dispersão do conjunto *P* obtido por cada alternativa de geração de soluções diversas segundo a expressão (5.1). Esses valores são apresentados na Tabela 6.1.

Verifica-se na Tabela 6.1 que a composição do conjunto *P* de soluções diversas obtido pelo Método Misto, utilizando as três heurísticas e somente aceitando soluções cuja dissimilaridade seja superior a um limiar inferior, apresentou o maior valor de dispersão. Conclui-se, então, que esta é a melhor alternativa para geração de soluções diversas dentre as quatro propostas.

Tabela 6.1 - Valores de dispersão do conjunto P (*DP*)

Alternativa de diversificação	*a*	*b*	*R*	*DP*
Mista com Limiar	0,35	17,48	0,99	**0,67**
IMB	0,66	10,21	0,97	0,53
VMP	0,86	3,87	0,95	0,51
CW	1,22	-8,61	0,94	0,42

a – coeficiente angular da função linear da linha de tendência
b – coeficiente linear
R – coeficiente de correlação
DP – dispersão do conjunto P obtido por meio da equação (5.2)

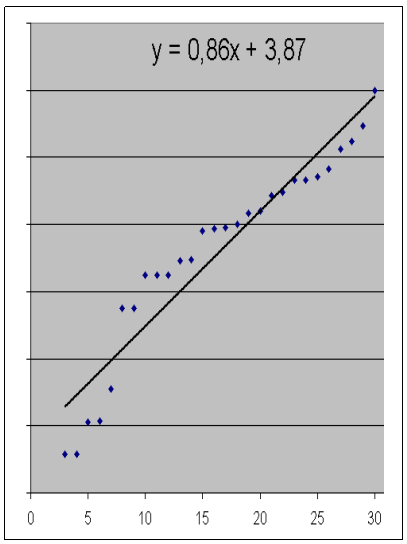

Figura 6.1 - Dissimilaridades do conjunto *P* gerado com VMP

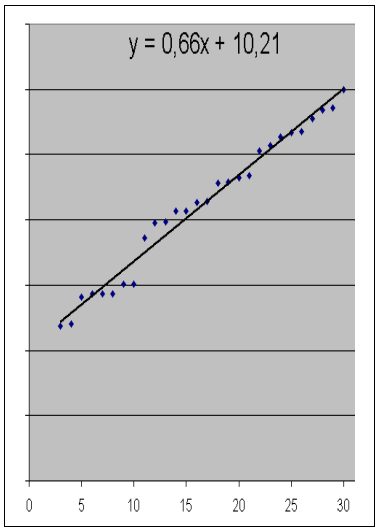

Figura 6.2 - Dissimilaridades do conjunto *P* gerado com IMB

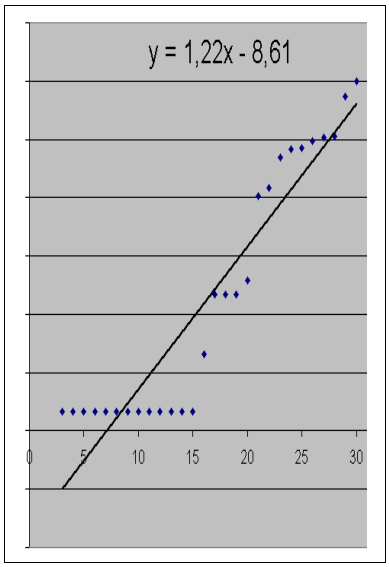

Figura 6.3 - Dissimilaridades do conjunto *P* gerado com CW

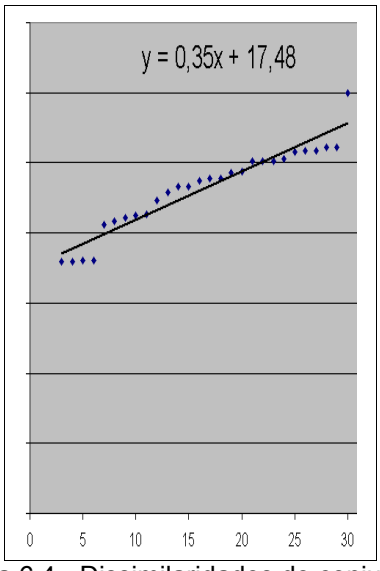

Figura 6.4 - Dissimilaridades do conjunto *P* gerado com VMP, IMB, CW e limiar de dissimilaridade

É importante relembrar que o método misto de geração de soluções diversas, desenvolvido neste trabalho, não utiliza uma quantidade predefinida de soluções para cada tipo de heurística, VMP, IMB ou CW. Esse método utiliza, com maior frequência, a heurística IMB, sendo que, caso a solução candidata a inclusão no conjunto *P* apresente dissimilaridade inferior ao limiar é gerada duas novas soluções, uma por meio da heurística CW e outra por meio da heurística VMP, sendo escolhida, para entrar no conjunto *P*, a solução que apresentar a maior dispersão em relação a esse conjunto de soluções.

6.1.2 Experimentos com os métodos de melhoria

Esta seção apresenta os resultados dos experimentos realizados com a finalidade de justificar a utilização das heurísticas de melhoramento para o Método de Melhoria de Soluções da BD com a meta-heurística *VND*. São testadas seis heurísticas de melhoramento de soluções, 2-opt, 3-opt, relocação inter-rotas, relocação intrarrota, intercâmbio e cruzamento, com a finalidade de determinar as heurísticas mais eficientes e a melhor sequência de vizinhanças a serem exploradas pela meta-heurística *VND*.

6.1.2.1 Experimentos com os métodos de busca local

Neste experimento foram geradas soluções para os problemas: CMT3X, CMT12X, r101, rc201 com a heurística VMP, tendo sido calculada a média dos valores obtidos antes e depois da aplicação do método de melhoria em teste e calculado o ganho percentual médio em relação à solução inicial, referido nas tabelas como “Ganho médio” (Tabela 6.2 e Tabela 6.3).

Tabela 6.2 - Resultados dos experimentos com os métodos de busca local

Movimentos	Ganho médio
3-opt	-6,5%
2-opt	-3,4%
relocação inter-rotas	-3,2%
relocação intrarrota	-1,8%
cruzamento	-1,8%
intercâmbio	-0,87%

O uso do movimento 3-opt, apesar de haver proporcionado melhorias de 5% a 8% nos valores de função objetivo das soluções iniciais, foi descartado porque o tempo médio de solução dos problemas de teste superou cerca de 14 vezes o tempo médio ao utilizar-se o 2-opt e cerca de 9 vezes ao utilizar-se a relocação intrarrota. O uso do movimento de intercâmbio também foi descartado por ter apresentado o pior ganho médio quando comparado com os outros movimentos.

6.1.2.2 Experimentos com a meta-heurística *VND*

O experimento anterior indica que a sequência de vizinhanças a serem exploradas talvez deva seguir a ordem dos ganhos médios obtidos. Com a finalidade de verificar isto, foram realizados experimentos com a meta-heurística *VND* modificando-se a sequência de vizinhanças exploradas (Tabela 6.3).

A sequência que obteve o melhor ganho médio para os problemas testados foi:
2-opt, cruzamento, relocação intrarrota e relocação inter-rotas, nesta ordem, concluindo-se, então, que este conjunto de movimentos de busca local é o mais adequado para explorar as vizinhanças pelo Método de Melhoria com *VND* a ser utilizado neste trabalho.

Tabela 6.3 – Resultados dos experimentos com a meta-heurística *VND*

Sequência de vizinhanças a serem exploradas pelo *VND*				
1ª	2 ª	3 ª	4 ª	Ganho médio (%)
2-opt	cruzamento	relocação Intrarrota	relocação inter-rotas	-11,6
2-opt	relocação inter-rotas	cruzamento	relocação Intrarrota	-11,0
2-opt	cruzamento	relocação inter-rotas	relocação Intrarrota	-10,4
cruzamento	2-opt	relocação Intrarrota	relocação inter-rotas	-9,6
2-opt	relocação Intrarrota	relocação inter-rotas	cruzamento	-9,5
relocação inter-rotas	2-opt	relocação Intrarrota	cruzamento	-9,5
2-opt	relocação inter-rotas	relocação Intrarrota	cruzamento	-9,5
cruzamento	relocação Intrarrota	relocação inter-rotas	2-opt	-8,9

6.1.3 Experimentos com os métodos de atualização do Conjunto de Referência (*RefSet*)

A Tabela 6.4 apresenta os resultados dos experimentos com os problemas de Salhi e Nagy (1999) e de Min (1989) com o objetivo de se comparar o desempenho e a eficiência dos critérios de atualização do *RefSet*, o critério de atualização por Qualidade e Diversidade (Q&D), proposto por Glover (1977, 1998) e o critério de atualização por Qualidade e Limiar de diversidade (Q&L), proposto por Duarte *et al.* (2009).

Conforme se observa na Tabela 6.4, o método de atualização Q&L apresentou resultados melhores do que o método de atualização Q&D, com 11 melhores resultados dentre os 15 problemas avaliados e que o critério de atualização Q&L requereu um esforço computacional 77,6% maior do que o critério de atualização Q&D.

Assim, mesmo requerendo maior esforço computacional, resolveu-se utilizar neste trabalho, o critério de atualização Q&L, em função da qualidade dos resultados obtidos. Esta decisão se deve à expectativa de uso pela Força Aérea, com maior frequência, na solução de problemas com 32 clientes.

Tabela 6.4 - Comparação dos critérios de atualização do *RefSet*

V -veículos D -distância		BD com Q & D			BD com Q & L			
Problema	Nós	V	D	Tempo(s)	V	D	T (s)	*Gap*(%)
CMT1X	50	3	467,50	16	3	**466,65**	50	-0,2
CMT2X	75	6	678,50	63	6	**670,90**	57	-1,1
CMT12X	100	5	725,40	182	5	**722,00**	180	-0,5
CMT4X	150	7	908,00	472	7	**895,70**	544	-1,4
CMT5X	199	10	1092,40	463	10	**1070,00**	1544	-2,1
CMT11X	120	4	**840,50**	161	4	840,70	346	0,0
CMT12X	100	6	670,80	63	6	**669,50**	231	-0,2
CMT1Y	50	3	473,60	6	3	473,60	9	0,0
CMT2Y	75	6	708,20	27	7	**688,00**	48	-2,9
CMT3Y	100	5	734,80	159	5	**720,00**	126	-2,0
CMT4Y	150	8	916,50	433	7	**873,00**	777	-4,7
CMT5Y	199	10	1114,10	1044	10	**1088,3**	1511	-2,3
CMT11Y	120	4	852,40	225	4	**843,60**	501	-1,0
CMT12Y	100	5	**652,00**	84	6	674,10	134	3,4
Min 1989	22	2	**88,00**	3,7	2	89,00	4	1,1
	Médias		728,18	226,78		719,27	404,13	-1,3

6.2 EXPERIMENTOS PARA AVALIAÇÃO DO MÉTODO IMPLEMENTADO

Nesta seção apresentam-se os resultados dos experimentos destinados a avaliar o desempenho do método implementado para solução do PRVCES.

Nesta implementação da BD, o conjunto *P* é iniciado com 30 soluções, das quais as cinco melhores são incluídas no *RefSet1* e as cinco mais diversas são incluídas do *RefSet2*, restando 20 soluções a serem utilizadas na regeneração do *RefSet2* a cada iteração, ou seja, sempre que não houver mais alteração no *RefSet*.

Neste trabalho, considera-se uma iteração um conjunto de ciclos de atualizações do *RefSet*. Isto é, cada vez que um ciclo de atualização não logra sucesso na atualização do *RefSet*, ocorre a regeneração do *RefSet2*, iniciando-se a próxima iteração.

Na maioria dos experimentos, a BD convergiu para o ótimo local entre 1 e 3 iterações e esgotou as soluções remanescentes no conjunto *P* de soluções diversas

entre 4 e 6 iterações. Em vista disto, a quantidade de iterações desta implementação da BD foi limitada em 7 com a finalidade de não prejudicar a busca. Raros foram os casos em que a busca alcançou 7 iterações.

Na FAB, como os custos para se manter a frota de aeronaves com elevados índices de disponibilidade são muito elevados e como os recursos financeiros especialmente destinados a isto são escassos, certamente que um dos objetivos é minimizar o uso da frota existente. O método implementado não considerou explicitamente a minimização do número de veículos como um objetivo específico. A quantidade de veículos obtida nos experimentos é o resultado da minimização da distância total.

Nas tabelas dos experimentos realizados apresentam-se os valores de desvio percentual (coluna *Gap*) comparado ao melhor valor existente na literatura. Esse desvio é calculado pela expressão (6.1). Os valores em negrito nas tabelas representam o melhor valor alcançado.

$$Gap = 100 * \frac{\text{valor - melhor valor}}{\text{melhor valor}} \qquad (6.1)$$

6.2.1 Resultado obtido na solução do problema de Min (1989)

Com relação ao problema de Min (1989), houve a superação do melhor resultado existente na literatura até o presente momento, o resultado de 89 milhas obtido por Gökçe (2004) utilizando a meta-heurística Colônia de Formigas como método de solução. O resultado obtido pela implementação da BD deste trabalho foi de 88 milhas utilizando atualização por Qualidade e Diversidade.

Quanto ao número de veículos, é requisito do problema de Min(1989) que sejam utilizados exatamente dois veículos de igual capacidade.

Com o objetivo de se visualizar graficamente as soluções para os problemas cujos dados dispunham das coordenadas, foi elaborado uma rotina em planilha eletrônica com linguagem de programação *Visual Basic for Aplications* (*VBA*). Essa rotina permite que os roteiros sejam digitados na planilha e que a estrutura da solução seja

visualizada graficamente.

Um aspecto vantajoso dessa rotina é que apresenta os arcos inviáveis segundo as restrições do PRVCES em cor vermelha. Isto é de grande auxílio na verificação da viabilidade de uma solução, seja esta gerada pela BD ou gerada manualmente, sem a utilização de qualquer algoritmo computacional.

A Figura 6.5 apresenta uma plotagem aproximada da solução para o problema de Min (1989) pela BD e a Figura 6.6 a plotagem da solução de Min (1989) obtidas com a utilização dessa rotina. A plotagem é aproximada porque não foram fornecidas no artigo desse autor as coordenadas dos nós, mas a tabela de distâncias em milhas. Foram obtidas coordenadas em milímetros relativas ao canto superior esquerdo da Figura 1 do artigo desse autor. Isto foi realizado apenas com a finalidade de verificar o funcionamento das heurísticas na fase inicial das implementações realizadas para este trabalho.

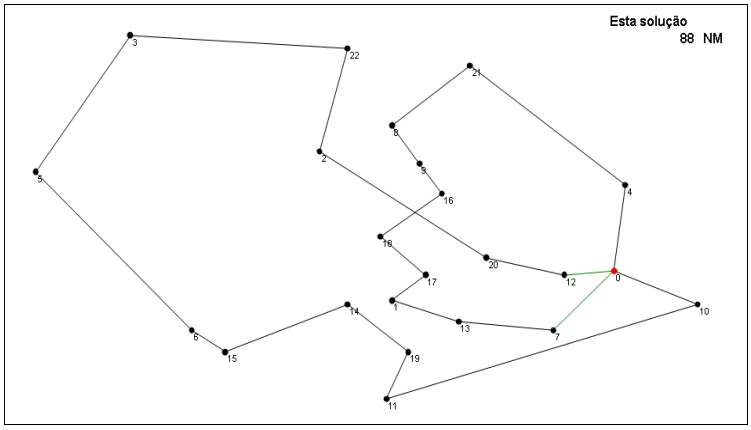

Figura 6.5 - Plotagem aproximada do melhor resultado obtido para o problema de Min (1989).

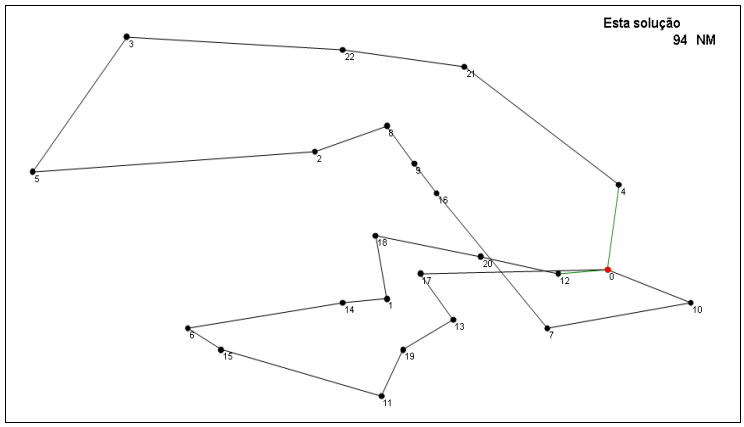

Figura 6.6 - Plotagem aproximada do resultado obtido por Min (1989).

6.2.2 Resultados obtidos para os problemas de Dethloff (2001)

Observando-se, na Tabela 6.5, os resultados dos experimentos com o conjunto de problemas de Dethloff (2001), verifica-se que a BD implementada alcançou o melhor resultado em seis instâncias. O *Gap* foi de 0,23% em relação à média dos melhores resultados da literatura até o momento, os resultados obtidos por Mine *et al.* (2009).

Tabela 6.5 - Conjunto de problemas de Dethloff (2001)

D - Distância T - Tempo	Montané e Galvão (2006)	Sosa *et al.* (2008)	Mine *et al.* (2009)		Este trabalho		
Método	BT	BD	GENILS*		BD		
Problema	D	D	D	T(s)	D	T(s)	*Gap* (%)
SCA3-0	640,7	640,5	**635,62**	6,77	640,50	10	0,77
SCA3-1	**697,1**	697,8	697,84	8,49	697,84	8	0,11
SCA3-2	**655,2**	659,3	659,34	8,13	659,34	6	0,63
SCA3-3	**674,6**	680	680,04	8,45	680,04	9	0,81
SCA3-4	**690,5**	**690,5**	**690,50**	8,09	**690,50**	9,5	0,00
SCA3-5	**656,7**	659,9	659,90	8,19	661,00	5	0,65
SCA3-6	653,6	653,8	**651,09**	8,21	653,17	16	0,32
SCA3-7	674,5	659,2	**659,17**	6,76	**659,17**	22	0,00
SCA3-8	**702,2**	719,5	719,48	8,85	719,48	9	2,46
SCA3-9	683,7	**681,2**	**681,20**	8,63	**681,20**	33	0,00
CON3-0	627,7	631,4	**616,52**	6,77	**616,52**	34	0,00
CON3-1	563,6	**554,5**	**554,47**	7,76	556,70	14	0,40
CON3-2	**517,1**	522,9	518,01	9,28	521,38	22	0,83
CON3-3	596,2	**591,2**	**591,19**	9,18	**591,19**	21	0,00
CON3-4	589,7	591,1	**588,79**	6,29	**588,79**	7	0,00
CON3-5	567,5	**563,7**	**563,70**	9,16	564,60	9	0,16
CON3-6	**492,5**	506,2	499,05	7,33	498,50	17	1,22
CON3-7	588,2	577,7	**576,48**	6,96	577,70	7	0,21
CON3-8	**509,8**	523	523,05	8,75	523,05	5	2,60
CON3-9	583,2	580,1	**578,25**	6,87	590,70	7	2,15
Médias	618,22	619,18	**617,17**	7,95	618,57	13,53	0,23

*algoritmo heurístico híbrido baseado nas técnicas *Iterated Local Search*, *Variable Neighborhood Descent* e *GENIUS* desenvolvido por Gendreau, Hertz e Laporte (1992).

6.2.3 Resultados obtidos para os problemas de Salhi e Nagy (1999)

Observando-se, na Tabela 6.6, os resultados dos experimentos com o conjunto de problemas de Salhi e Nagy (1999), vê-se que foram obtidos quatro resultados que

superaram os melhores resultados da literatura até o momento, sendo que, de forma global, a média geral deste trabalho apresentou um *Gap* de 1,34% em relação à média dos resultados de Mine *et al.* (2009).

Tabela 6.6 - Conjunto de problemas de Salhi e Nagy (1999)

V -Veículos D - Distância	Montané e Galvão (2006)		Sosa *et al.* (2008)		Mine *et al.* (2009)		Este trabalho			
Método	BT Adaptativo		BD		GENILS		BD			
Problema	V	D	V	D	V	D	V	D	T(s)	*Gap*(%)
CMT1X	3	470	3	475,1	3	466,77	3	**466,65**	21	-0,03
CMT2X	7	700	6	690,5	6	**684,21**	6	696,40	115	1,79
CMT3X	5	**719**	5	725,3	5	721,40	5	722,00	182	0,42
CMT4X	7	878	7	868,5	7	**852,46**	7	895,70	544	5,07
CMT5X	10	1083	10	1069,3	10	**1033,51**	10	1070,00	1544	3,53
CMT11X	5	910	4	873,2	4	846,23	4	**840,50**	346	-0,68
CMT12X	6	689	6	679,2	6	**662,22**	6	669,50	231	1,30
CMT1Y	3	472	3	473,2	3	**466,77**	3	473,60	9	1,46
CMT2Y	7	695	6	691,1	6	**684,21**	7	688,00	48	0,55
CMT3Y	5	721	5	730,1	5	721,27	5	**720,00**	159	-0,14
CMT4Y	7	880	7	**861,0**	7	862,28	7	873,00	777	1,40
CMT5Y	11	1098	10	1041,2	10	**1036,14**	10	1088,30	1511	5,03
CMT11Y	4	900	4	883,6	4	**836,04**	4	843,60	501	0,90
CMT12Y	6	675	5	686,4	5	663,50	6	**652,00**	134	-1,73
Médias		778		767,7		**752,60**		762,50		1,34

Observa-se, ainda, que o resultado para o problema CMT12Y é melhor sob o aspecto da distância total percorrida, mas pior sob o aspecto de custos, haja vista que alocou um veículo a mais do que o resultado obtido por Sosa *et al.* (2008) e por Mine *et al.* (2009).

A Figura 6.7 apresenta a plotagem da melhor solução atual, obtida neste trabalho, para o problema CMT1X.

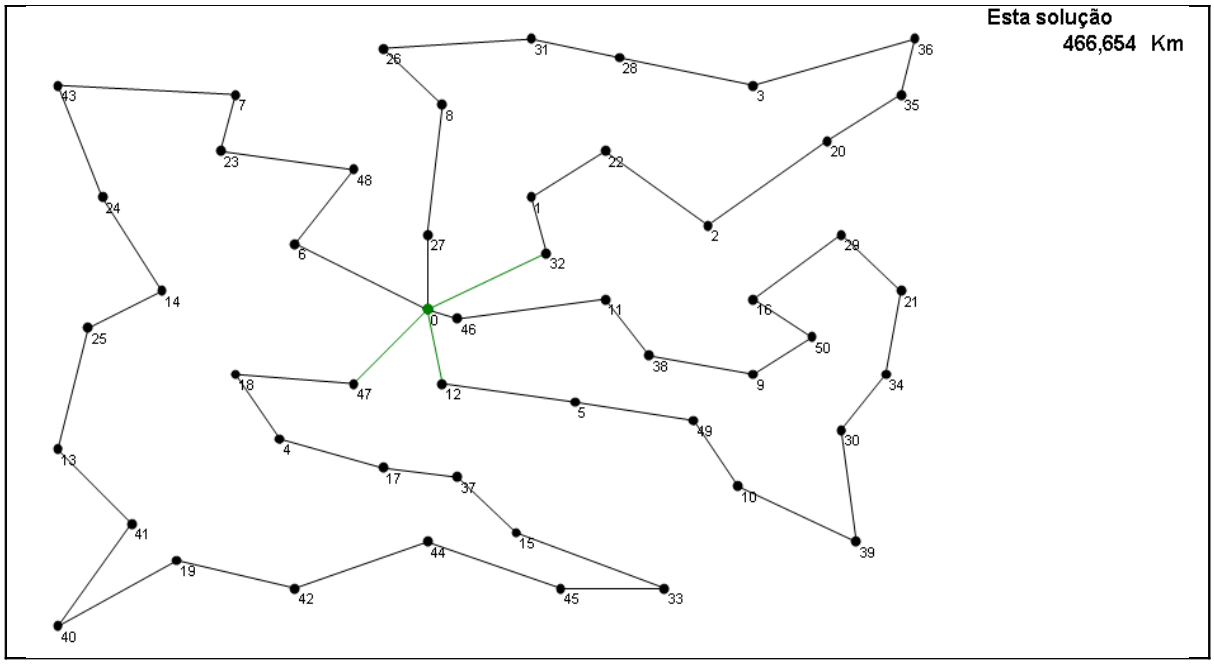

Figura 6.7 – Plotagem da melhor solução para o problema CMT1X

6.2.4 Comparação com os tempos de processamento de Chen e Wu (2006)

Conforme a Tabela 6.7, verifica-se que os resultados obtidos neste trabalho foram superiores (*Gap* = -0,8%) aos obtidos com a Heurística de Inserção Híbrida com Listas Tabu de Chen e Wu (2006), tendo obtido 9 resultados melhores e que o tempo de processamento médio foi cerca de 66% maior do que o tempo da heurística de Chen e Wu (2006).

O trabalho dos autores não menciona o computador utilizado nos experimentos, o que prejudica uma avaliação mais precisa da comparação dos tempos computacionais.

Tabela 6.7 - Comparação com os resultados de Chen e Wu (2006)

V - Veículos D - Distância		Chen e Wu (2006)			Este trabalho			
Método		Inserção Híbrida com Lista Tabu			BD			
Problema	Nós	V	D	T (s)	V	D	T (s)	*Gap*(%)
CMT1X	50	3	478,6	8	3	**466,65**	21	-2,6
CMT2X	75	6	688,5	25	6	696,40	63	1,2
CMT3X	100	5	744,77	94	5	**722,00**	182	-3,1
CMT4X	150	7	**887,0**	502	7	895,70	544	1,0
CMT5X	199	10	1089,2	1056	10	**1070,00**	1544	-1,8
CMT11X	120	4	858,6	321	4	**840,50**	346	-2,1
CMT12X	100	6	678,5	47	6	**669,50**	231	-1,2
CMT1Y	50	3	480,8	8	3	**473,60**	9	-1,5
CMT2Y	75	6	**679,4**	12	7	688,00	48	1,3
CMT3Y	100	5	723,9	120	5	**720,00**	159	-0,5
CMT4Y	150	7	**852,4**	406	7	873,00	777	2,4
CMT5Y	199	10	**1084,3**	772	10	1088,30	1511	0,4
CMT11Y	120	5	859,8	231	4	**843,60**	501	-1,9
CMT12Y	100	6	676,2	56	6	**652,00**	134	-3,6
Médias			770,1	261		**764,3**	434	-0,8

6.2.5 Resultados dos problemas propostos por Montané e Galvão (2006)

Observando-se, na Tabela 6.8, os resultados dos experimentos com o conjunto de problemas de Montané e Galvão (2006), vê-se que todos os melhores resultados foram obtidos por Mine *et al.* (2009), sendo que na média geral, o *Gap* entre a média dos resultados deste trabalho e a média dos resultados obtidos por esses autores foi de 2,4%.

Observa-se ainda que a média dos tempos de processamento da BD foi 73,2% maior do que a média dos tempos obtidos por Mine *et al.* (2009). Especificamente esses experimentos foram realizados em um computador com processador *Intel Core 2 Duo* com 1,6 GHz e 2 GB de memória *RAM*, a mesma configuração utilizada por Mine *et al.* (2009).

Tabela 6.8 – Conjunto de problemas de Montané e Galvão (2006)

V -Veículos D -Distância	Montané e Galvão (2006)		Sosa *et al.* (2008)		Mine *et al.* (2009)		Este trabalho			
Método	BT Adaptativo		BD		GENILS		BD			
Problema	V	D	V	D	D	T(s)	V	D	T(s)	*Gap*(%)
r101	12	1042,6	12	1032,8	**1009,95**	35,65	12	1028,5	95	1,8
r201	3	671,0	3	673,0	**666,20**	39,62	3	667,0	81	0,1
c101	17	1259,8	16	1234,3	**1220,18**	18,34	16	1253,7	48	2,7
c201	5	666,0	5	663,1	**662,07**	16,62	5	665,8	58	0,6
rc101	11	1094,2	10	1066,5	**1059,32**	12,79	11	1086,0	62	2,5
rc201	3	674,5	3	**672,9**	**672,92**	24,03	3	674,2	38	0,2
r1_2_1	23	3447,2	23	3391,6	**3357,64**	175,81	23	3466,2	227	3,2
r2_2_1	5	1690,7	5	1676,5	**1665,58**	103,44	5	1721,9	228	3,4
c1_2_1	29	3792,6	28	3699,5	**3636,74**	117,62	28	3686,5	212	1,4
c2_2_1	9	1767,6	9	1741,9	**1726,59**	127,81	9	1759,3	200	1,9
rc1_2_1	24	3427,2	24	3464,0	**3312,92**	299,3	24	3457,6	262	4,4
rc2_2_1	5	1645,9	5	1583,4	**1560,00**	77,48	5	1572,1	306	0,8
Médias		1764,9		1741,6	1712,5	87,4		1753,2	151,3	2,4

6.3 APLICAÇÃO NA FORÇA AÉREA BRASILEIRA (FAB)

A quantidade de nós do problema da FAB pode variar do valor típico de 32 nós, que é a quantidade de terminais de carga, até cerca de 100 nós, tendo em vista o número de pontos de abastecimento, principalmente na região amazônica, que não possuem terminal de carga, mas que ainda assim são servidos pela FAB.

Verificam-se no resultados das Tabelas 6.7 e 6.8 que o tempo para solução de um PRVCES por esta implementação de BD para até 100 nós pode variar de dois a quatro minutos. Para resolução de problemas com 50 nós, percebe-se pelos dados das Tabelas 6.5, 6.6 e 6.7 que uma boa solução pode ser apresentada em até 21 segundos.

A aplicação prática da estratégia de solução aqui proposta baseada em BD deverá ser restrita a essas quantidades de nós, com maior frequência para solução de problemas com tamanho médio de 32 nós. Assim, conclui-se que, para o tipo de uso que a FAB poderá fazer do algoritmo proposto, o mesmo é plenamente compatível com as necessidades operacionais da FAB.

6.3.1 Aplicação em um problema real da FAB

Por meio de uma consulta ao Módulo de Transporte do Sistema Integrado de Logística de Material e Serviço (SILOMS) pôde-se obter as demandas de entrega e coleta de carga em 33 localidades (Tabela 6.10). Essas demandas foram totalizadas sem considerar as prioridades de transporte de cada carga (Tabela 2.1). Ou seja, foram totalizados os pesos de todas as cargas existentes em cada terminal destinados ao Rio de Janeiro e os pesos de todas as cargas existentes no Rio de Janeiro destinadas a essas localidades.

A Figura 6.9 apresenta a solução para esse problema resolvido pela BD em 9,6s considerando que as entregas sejam realizadas por um único tipo de aeronave, o C-130 (Hércules). Para esta solução foi considerado que o Hércules possui capacidade de transportar 20.000 Kg.

Como parte do programa do Curso de Extensão em Logística (CELOG) do Instituto de Logística da Aeronáutica, foram ministradas algumas aulas sobre heurísticas construtivas de roteirização e foi solicitado a três alunos que dedicassem um tempo de aula para resolução manual desta instância do problema da FAB (Tabela 6.10).

Os alunos foram instruídos a utilizar a rotina implementada em planilha eletrônica com programação em *VBA* com a finalidade de se visualisar a estrutura da solução. Isto possibilitou que o problema da FAB fosse resolvido manualmente pelos alunos, simplesmente observando-se o gráfico e tomando decisões acerca da estrutura de roteiros. A Figura 6.8 apresenta a tela de entrada de dados dessa rotina e a Figura 6.10 a plotagem da melhor solução obtida pelos alunos.

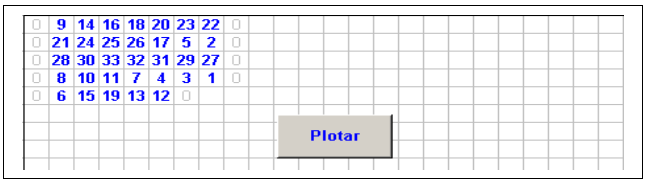

Figura 6.8 – Entrada de dados da rotina de plotagem de soluções.

A Tabela 6.9 apresenta os resultados deste experimento, possibilitando comparar os resultados obtidos pelos alunos do CELOG com o resultado obtido pela BD.

Tabela 6.9 - Resultado comparativo entre a solução manual e por BD

Resolvedor	Veículos	Distância (km)	Tempo (min)	*Gap*(%)*
BD	5	**26.305,50**	0,16	-
Aluno A	5	27.356,70	41	4,00
Aluno B	5	27.547,60	46	4,72
Aluno C	5	31.341,00	42	19,14

**Gap* – desvio percentual em relação à melhor solução.

Observando-se os resultados deste experimento, conclui-se que se o usuário do Módulo de Transporte do SILOMS dispuser de uma interface para solução manual das programações de transporte, esta poderá ser utilizada pelo gestor na obtenção de resultados com qualidade variável, a depender da habilidade no manuseio dessa ferramenta e do conhecimento acerca das heurísticas construtivas. Assim, os resultados mostram que a aplicação de uma solução algoritmica resultará em maior eficiência na realização dessa tarefa.

Outro aspecto interessante na utilização da BD como método de solução para o problema da FAB é que a BD produz sempre *b* bons resultados (*b* = 10 nesta implementação). Isto implica em flexibilidade para o gestor do sistema, pois, dependendo das circunstâncias, o gestor poderá utilizar qualquer uma dessas soluções, não necessariamente a melhor.

Tabela 6.10 – Dados de uma instância do problema da FAB

Nós	Cidades	Lat (°)	Y (km)	Long (°)	X (km)	D(kg)	P(kg)
0	Rio de Janeiro	-22,91	-2549,94	-43,17	-4805,91	0	0
1	Guaratinguetá	-22,79	-2537,07	-45,21	-5032,17	405	3175
2	Barbacena	-21,27	-2367,42	-43,76	-4871,42	3505	1869
3	S. J. Campos	-23,23	-2585,71	-45,87	-5106,31	655	2714
4	Guarulhos	-23,44	-2608,76	-46,47	-5173,32	4177	1976
5	Lagoa Santa	-19,66	-2188,64	-43,90	-4886,67	2231	534
6	Pirassununga	-21,98	-2447,23	-47,06	-5238,66	4379	2453
7	Curitiba	-25,43	-2830,84	-49,27	-5484,77	1213	514
8	Florianópolis	-27,59	-3071,66	-48,60	-5409,97	3899	1248
9	Caravelas	-17,65	-1964,89	-39,25	-4369,71	3559	1320
10	Porto Alegre	-30,04	-3343,74	-51,22	-5701,78	3960	1737
11	Santa Maria	-29,71	-3307,28	-53,69	-5976,93	1411	2869
12	Brasília	-15,78	-1757,08	-47,92	-5334,80	3031	586
13	Anápolis	-16,24	-1807,71	-48,97	-5451,62	3713	2166
14	Salvador	-12,93	-1438,92	-38,52	-4288,03	2366	4335
15	Campo Grande	-21,57	-2400,78	-54,92	-6113,07	3600	687
16	Maceió	-9,67	-1076,08	-35,73	-3977,79	784	2201
17	Palmas	-10,17	-1131,77	-48,33	-5380,35	1076	552
18	Recife	-8,18	-910,71	-34,91	-3886,48	3033	621
19	Cuiabá	-15,59	-1735,83	-56,10	-6245,02	2726	1272
20	Parnamirim	-5,91	-657,67	-35,25	-3923,88	3621	1356
21	Teresina	-5,09	-566,27	-42,81	-4765,75	2144	2069
22	Fortaleza	-3,76	-418,90	-38,52	-4288,34	4223	2334
23	F. Noronha	-3,86	-429,13	-32,43	-3609,85	1303	2053
24	Alcântara	-2,37	-264,16	-44,40	-4942,11	3457	1736
25	Belém	-1,47	-163,36	-48,49	-5397,67	1271	3951
26	Macapá	0,04	4,48	-51,05	-5683,23	3231	733
27	Porto Velho	-8,76	-975,52	-63,91	-7114,76	2233	3601
28	Manaus	-3,14	-349,02	-60,03	-6682,04	1830	639
29	Rio Branco	-9,97	-1110,16	-67,81	-7548,65	544	3023
30	Boa Vista	2,82	314,07	-60,66	-6752,88	2718	3968
31	Eirunepé	-6,67	-742,16	-69,92	-7783,08	725	3989
32	Tabatinga	-4,25	-473,11	-69,94	-7785,31	3094	3031
33	S. Gabriel	0,61	67,57	-69,20	-7703,38	1422	1466

Lat	- Latitude	Long - Longitude
Y	Latitude em quilômetros a partir do equador	
X	Longitude em quilômetros a partir do meridiano de *greenwich*	
D	Demanda total de entrega (*Delivery*)	
P	Demanda total de coleta (*Pickup*)	

Obs.: X e Y foram calculados considerando a terra esférica com raio igual a 6.378,1 Km

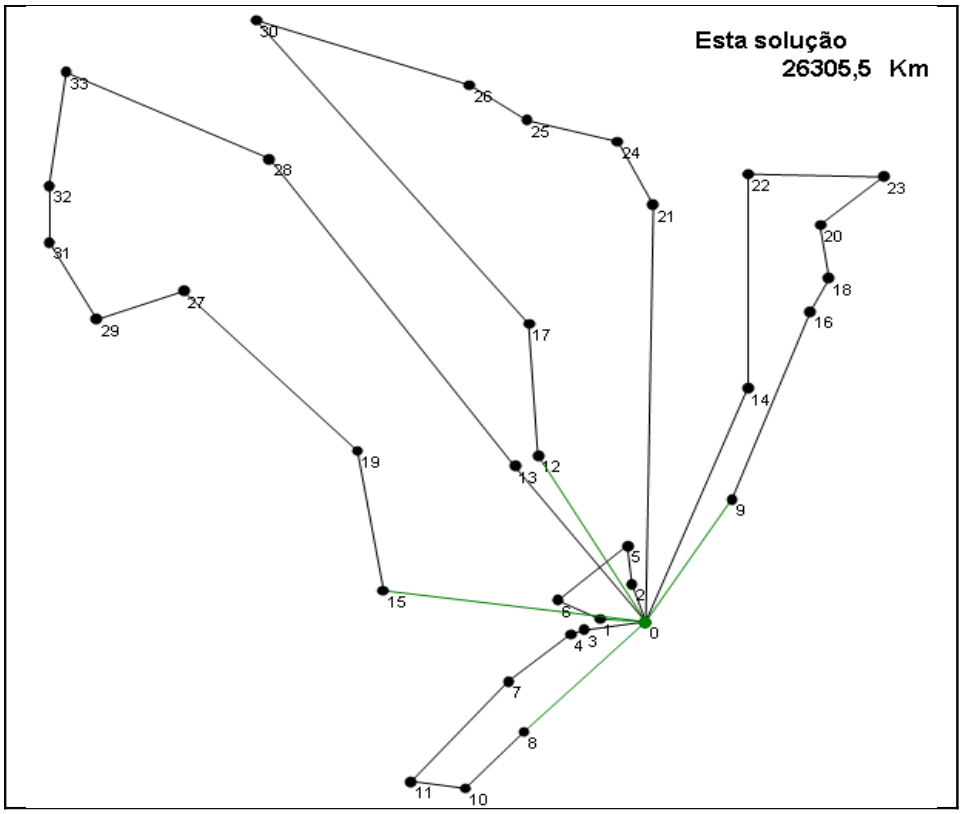

Figura 6.9 - Solução para uma instância do problema da FAB obtida pela BD

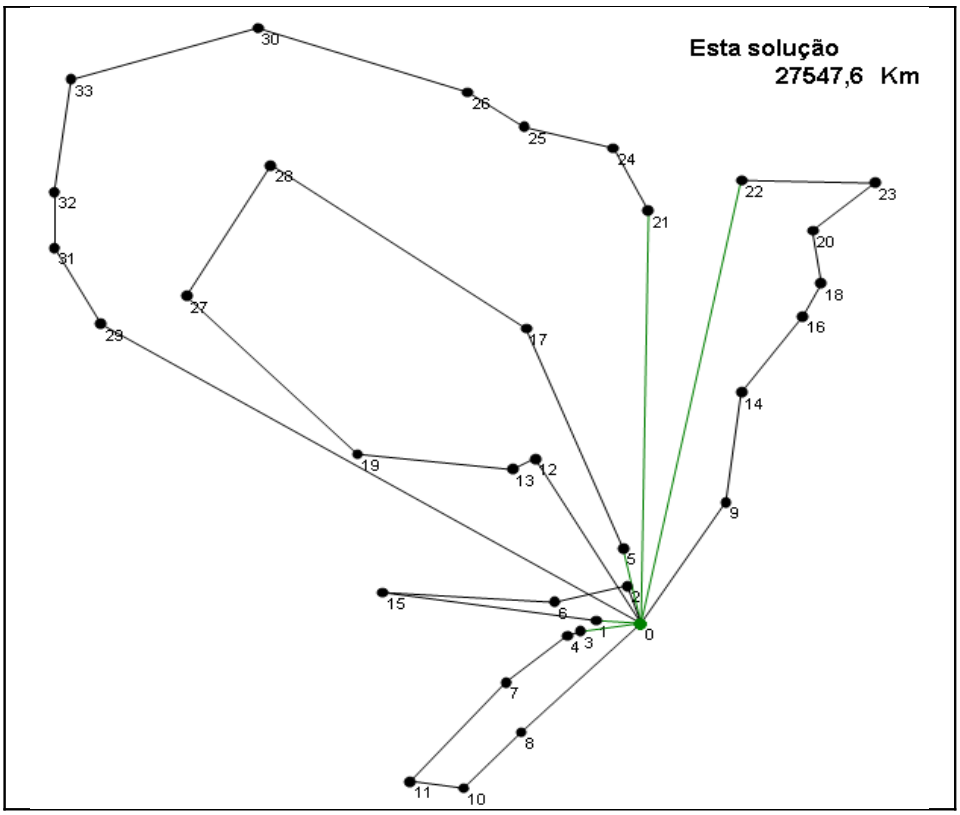

Figura 6.10 - Solução para uma instância do problema da FAB obtida manualmente pelo aluno A.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo desta dissertação foi resolver um problema existente da Força Aérea Brasileira, relativo à definição dos roteiros de entrega e coleta de materiais a serem realizadas simultaneamente em cada local de entrega/coleta a partir de um centro de distribuição, considerando-se a frota de veículos homogênea, um Problema de Roteirização de Veículos com Coletas e Entregas Simultâneas (PRVCES). O método de solução utilizado foi uma implementação da meta-heurística Busca Dispersa (do inglês *Scatter Search*) integrada com a meta-heurística Descida em Vizinhança Variável (do inglês *Variable Neighborhood Descent*, *VND*) utilizada como método de melhoria de soluções.

Foi realizada uma ampla pesquisa bibliográfica com o intuito de se identificar na literatura alguns casos especiais de PRV com coleta e entrega mista, casos que as entregas e as coletas não são realizadas simultaneamente; alguns métodos aplicados anteriormente na solução do PRVCES; aplicações anteriores da meta-heurística Busca Dispersa (BD) em problemas de roteirização; aplicações recentes da BD na solução do PRVCES e as principais publicações sobre a BD desde a sua concepção por Fred Glover em 1977 até o momento.

As contribuições mais relevantes deste trabalho quanto à implementação da BD foram os diversos experimentos realizados com o objetivo de se determinar:

- a técnica mais eficiente para o Método de Geração de Diversificação utilizando três heurísticas construtivas bastante conhecidas, VMP, IMB e *CW* combinadas na geração de soluções diversas e utilizando o limiar inferior de dissimilaridade para ingresso das soluções no repositório de soluções diversas;
- os métodos de busca em vizinhança mais adequados, bem como a sequência de vizinhanças a serem exploradas, com a finalidade de compor o Método de Melhoria com a meta-heurística *VND*;
- o melhor Critério de Atualização do Conjunto de Referência comparando-se o

método tradicional Q&D proposto por Glover (1998) com o método Q&L proposto por Duarte *et al.* (2007-2009), tendo-se verificado experimentalmente que este favoreceu à obtenção de melhores soluções; e

- a alteração na forma de cálculo da dissimilaridade entre soluções. Isto permitiu discriminar as soluções diferentes que apresentaram a mesma contagem de arcos não comuns, possibilitando melhor controle sobre a medida da dispersão no espaço de soluções.

Foi realizada a implementação da BD e foram comparados os resultados por meio da solução dos problemas de Min (1989), de Salhi e Nagy (1999), de Dethloff (2001) e de Montané e Galvão (2006), com até 200 nós e sem considerar os problemas com restrição de tempo de serviço na rota.

Os resultados obtidos superaram o melhor resultado existente na literatura para o problema de Min (1989), tendo igualado os resultados de seis dentre os vinte melhores resultados para os problemas de Dethloff (2001) e tendo superado quatro dos melhores resultados para os quatorze problemas de Salhi e Nagy (1999) que não trazem restrição de tempo de serviço na rota. Isto indica que o método implementado, a Busca Dispersa, pode ser bastante competitivo para solucionar o PRVCES.

Este trabalho pode ser estendido para atender mais requisitos do problema real da FAB: considerar a frota heterogênea ou a existência de múltiplas bases, ou considerar o problema do carregamento dos veículos nos terminais de carga quanto à acomodação das cargas no piso do compartimento de carga, resolvendo um problema de empacotamento em duas dimensões.

Outra possibilidade seria considerar a eventualidade de conflito armado e minimizar o tempo de mobilização ao transportar carga e tropa em uma determinada região. Isto aumentaria significativamente a complexidade de solução devido ao acréscimo das restrições de janela de tempo.

Com relação ao método, pode-se utilizar GRASP na geração de soluções diversas (BELFIORE, 2006; SOSA *et al*., 2008); Busca Tabu como método de melhoria (RUSSEL; CHIANG, 2006) e Reconexão de Caminhos como método de combinação de soluções (WENDOLSKY; SCHEUERER, 2006) ou como uma melhoria posterior das soluções obtidas pela BD (KESKIN; ÜSTER, 2007). Pode-se ainda buscar alternativas mais eficientes para avaliação da viabilidade das soluções geradas, tais como minimizar o uso de laços em procedimentos computacionais de verificação da viabilidade dos roteiros quanto às restrições do PRVCES.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEGRE, J.; LAGUNA, M.; PACHECO, J. **Optimizing the periodic pick-up of raw materials for a manufacturer of auto parts.** 2005. Departamento de Economia Aplicada, Universidad de Burgos, Spain, 2005.

ANGELELLI, E.; MANSINI, R.. **The Vehicle Routing Problem with Time Windows and Simultaneous Pick-up and Delivery**. In A. Klose, M. G. Speranza, L. N. Van Wassenhove, editors, Quantitative Approaches to Distribution Logistics and Supply Chain Management, volume 519 of Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, pages 249-267. Springer-Verlag, 2002.

ANILY, S. **The Vehicle Routing Problem with Delivery and Backhaul options**. Naval Research Logistics. V43. 415-434. 1996.

ANILY, S., MOSHEIOV, G. **The traveling salesman problem with delivery and backhauls.** Operations Research Letters. 16. 11-18. 1994.

ARCHETTI, C.; HERTZ, A.; SPERANZA, M.G.: **A Tabu Search algorithm for the Split Delivery Vehicle Routing Problem.** Transportation Science, 40, 64 -73. 2006.

BALLOU, R.H., **Business Logistics Management : Planning, Organizing and Controlling the Supply Chain**. 4ª. Edição, Prentice Hall, 1999.

BEASLEY, J.E.: **Route first - cluster second methods for vehicle routing**. Omega, Vol. 11, p. 403-408, 1983.

BELFIORE, P. P. **Scatter Search para problemas de roteirização de veículos com frota heterogênea, janelas de tempo e entregas fracionadas.** Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2006.

BELFIORE, P. P.; FAVERO, L. P. L. **Scatter search for the Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time Windows.** Cejor, Springer-verlag, v. 2, n. 15, p.351-368, 22 set. 2007.

BELMORE M.; NEMHAUSER, G. L. **The Traveling Salesman Problem:** A Survey. Oper. Res., Vol. 538-558. 1968.

BIANCHESSI, N.; RIGHINI, G. **Heuristic Algorithms for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pick-up and Delivery**, Computers and Operations Research, vol. 34, pp. 578-594. 2007.

BOWERSOX, D. J; CLOSS, D.J. **Logística Empresarial**. São Paulo: Atlas, 2001.
BRASIL. **NSCA 4-2: Transporte de carga no Sistema do Correio Aéreo Nacional.** Brasília, DF, 2003.

CAMPBELL, A. M; SAVELSBERG, M., **Efficient insertion heuristics for vehicle routing and scheduling problems**. Transportation Science. v38 i3. 369-378, 2004.

CAMPOS, V.; CORBERÁN, A.; MOTA, E. **A Scatter Search Algorithm for the Split Delivery Vehicle Routing Problem.** Valencia: Universitat de Valencia, 2007.

CASCO, D. O.; GOLDEN, B. L.; WASIL E. A. **Vehicle Routing with Backhauls: models, algorithms, and case studies.** In: Golden B. L., Assad A. A. (Eds) Vehicle routing: Methods and studies, pp 127-147. Elsevier, Amsterdam. 1988.

CHEN, J. F.; WU, T. H. **Vehicle Routing Problem with Simultaneous Deliveries and Pickups**. Journal of the Operational Research Society. V57. 579-587. 2006.

CHRISTOFIDES N.; MINGOZZI, A.; TOTH, P. **The Vehicle Routing Problem.** In: Christofides, N., Mingozzi, A., Toth, P., Sandi, C. (Eds.), Combinatorial optimization, Wiley, Chichester. pp. 315-338. 1979.

CHRISTOFIDES, N. **Worst-case analysis of a new heuristic for the Traveling Salesman Problem**, Report 388, Graduate School of Industrial Administration, Carnegie Mellon University, 1976.

CHU, F.; LABADI, N.; PRINS, C. **A Scatter Search for Periodic Capacitated Arc Routing Problems**, European Journal of Operational Research 169 (2), pp. 586-605, 2006.

CLARKE, G.; WRIGHT, J. W. **Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points.** Operations Research, v.12, n.4, p.568-581, 1964.

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, Universidad de Valencia, Burjassot, Spain, n. 53, p.427-435, 2002.

CORDEAU, J. F.; BARNHART, C.; LAPORTE, G. **Vehicle routing.** In: Barnhart, C., Laporte, G. (Eds.), Handbooks in operations research and management science, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands. pp. 367-428. 2007.

CORDEAU, J. F.; GENDREAU, M.; LAPORTE, G.; PORVIN, J. Y. & SEMET, F., **A guide to vehicle routing heuristics**, Journal of the Operational Research Society, vol. 58, p. 512-522. 2002.

CRISPIM, J.; BRANDÃO, J. **Metaheuristics applied to mixed and simultaneous extensions of Vehicle Routing Problems with Backhauls.** Journal of the Operational Research Society. V56. 1296-1302. 2005.

CROES, G.A. **A method for solving the Traveling Salesman Problems.** Operations Research, (6), pp.791-812, 1958.

CUNHA, C. B. **Contribuição à Modelagem de Problemas em Logística e Transportes**. Tese (Livre Docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2006.

CUNHA, C. B.; SILVA, M. R. **A Genetic Algorithm for the Problem of Configuring a Hub-and-Spoke Network for a LTL Trucking Company in Brazil**. Aceito para publicação no *European Journal of Operational Research*. 2005.

DANTZIG, G. B.; RAMSER, J. H. **The Truck Dispatching Problem**. *Management Science*, Vol. 6, No. 1 (Oct., 1959), pp. 80-91.

DELL'AMICO, M., RIGHINI, G., SALANI, M. **A branch-and-price approach to the vehicle routing problem with simultaneous distribution and collection.** Transport Sci 40:235–247. 2006.

DETHLOFF, J.. **Vehicle routing and reverse logistics: The Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pick-up.** OR Spektrum. V23. 79-96. 2001.

DORIGO M.; DI CARO, G.; GAMBARDELLA L. M. **Ant Algorithms for Discrete Optimization**. Artificial Life 5(2), p.137-172. 1999.

DORIGO M.; MANIEZZO, V.; COLORNI, A. **Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents.** IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B, 26(1), p.29-41. 1996.

DUARTE, A.; MARTÍ, R.; GLOVER, F.; GORTAZAR, F. **Hybrid Scatter Tabu Search for Unconstrained Global Otimization.** *Annals of Operations Research*, Springer Netherlands, Collection Business and Economics, SpringerLink, August 09, 2009.

FEO, T.A. e RESENDE, M.G.C. **Greedy Randomized Adaptive Search Procedures**, Em: J. Global Optimization, N. 6, pg. 109-133. 1995.

FREITAS, L. M. B.; ARROYO, J. E. C.; MONTANÉ, F. A. T. **Heurística VNS para o Problema de Roteamento de Veículos com Coleta e Entrega Simultânea**. In: X SPOLM – Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha, Rio de Janeiro. 2007.

GAJPAL, Y; PRAKASH, A. **An Ant Colony System (ACS) for Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pickup.** Computers & Operations Research, Michael G Degroote School of Business, Mc Master University, Hamilton, Ontario, Canada p. 1-9. 5 mar. 2009.

GALVÃO, D.; GUIMARÃES, R.; GUIMARÃES, J. **The Control of Helicopter Operations in the Brazilian Oil Industry.** European Journal of Operational Research, Vol. 49, pp. 266-270, 1990.

GALVÃO, D.. **Comments on: Static pickup and delivery problems: a classification scheme and survey**. TOP - An Official Journal of the Spanish Society of Statistics and Operations Research, v. 15, p. 37-40, 2007.

GAREY, M.; JOHNSON, D.. **Computers and Intractability. A Guide to the Theory of NP-Completeness.** Freemann, San Francisco. 1979.

GLOVER, F. **A Template for Scatter Search and Path Relinking**, in Artificial Evolution, In: Lecture Notes in Computer Science 1363, J.-K. Hao, E. Lutton, E. Ronald , M. Schoenauer and D. Snyers (Eds.), Springer, pp. 13-54. 1998.

GLOVER, F. **Future paths for integer programming and links to artificial intelligence**. Decision Sciences 8. 156–166. 1977.

GLOVER, F.; LAGUNA, M.; MARTÍ, R. **Scatter Search and Path Relinking: Foundations and Advanced Designs.** 2004.

GÖKÇE, E. I. **A revised Ant Colony System approach to Vehicle Routing Problems.** M. S. Thesis. Sabanci University, Turkey, July 2004.

GOLDEN, B. L.; BAKER, E.; ALFARO, J.; SCHAFFER, J. **The vehicle routing problem with backhauling: Two approaches.** In Proceedings of the twenty-first annual meeting of the S.E. TIMS, Myrtle Beach, SC, USA. 1985.

GREISTORFER, P. **A Tabu Scatter Search Metaheuristic for the Arc Routing Problem**. Computers and Industrial Engineering, 44 pp. 249-266. 2003.

GRIBKOVSKAIA, I.; HALSKAU, Ø.; LAPORTE, G.; VLCEK, M. **General solutions to the single vehicle routing problem with pickups and deliveries**. European Journal of Operational Research, In Press. 2006.

HALSE K. **Modeling and solving complex vehicle routing problems**. Ph.D. Thesis, Institute of Mathematical Statistics and Operations Research, Technical University of Denmark, Lyngby; 1992.

HOLLAND J.H.. **Adaptation in Natural and Artificial Systems.** University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. **Particle swarm optimization**, in Proc. of the IEEE Int. Conf. on Neural Networks, Piscataway, NJ, pp. 1942–1948, 1995.

KESKIN, Burcu B., ÜSTER, Halit. **A Scatter Search based heuristic to locate capacitated transshipment points.** Computers & Operations Research. 34. 3112 – 3125. 2007.

LAGUNA, M.; ARMENTANO, V. **Lessons from applying and experimenting with scatter.** In Metaheuristic Optimization Via Adaptive Memory and Evolution: Tabu Search and Scatter Search, C. Rego and B. Alidaee (eds.), Norwell, MA: Kluwer Academic Publishers, pp. 229-246. 2005.

LAGUNA, M.; MARTÍ, R. **Scatter Search: Basic design and advanced strategies**. Inteligência Artificial, Revista Ibero-americana de Inteligência Artificial. N0. 19. Pp. 123-130. 2003.

LAPORTE G.; GENDREAU, M.; POTVIN, J.Y.; SEMET F. **Classical amd Modern Heuristics for the vehicle routing problem**, International Transaction in Operational Research, vol. 7, pp. 285-300, 2000.

LEITE, Paulo Roberto. **O "Supply Chain " Reverso.** Revista Tecnologística, Setembro. 1999.

LIN, S. **Computer solutions of the traveling salesman problem**. Bell System Technical Journal. V44. 2245-2269. 1965.

LIU, F. H.; SHEN, S. Y., **A Method for Vehicle Routing Problem with Multiple Vehicle Types and Time Windows**, Department of Industrial Engineering and Management, National Chiao Tung University, Hsinchu, Taiwan, Proc. Natl. Sci. Counc., vol 23, n. 4, p. 526-536. 1999.

LYSGAARD, Jens: **Clarke & Wright´s Savings Algorithm**, Department of Management Science and Logistics, The Aarhus School of Business, Sept. 1997.

MARTELLO, S., TOTH, P., **Knapsack Problems: Algorithms and Computer Implementation** , John Wiley and Sons, 1990.

MARTELLO, S., VIGO, D., **Exact Solution of the Two-Dimensional Finite Bin Packing Problem**, Management Science, v.44 n.3, p.388-399, March. 1998.

MARTÍ, R. e LAGUNA, M. **Scatter Search: Diseño básico and estrategias avanzadas.** Inteligencia Artificial 19 (2), pp 123-130. 2003.

MARTÍ, R.; LAGUNA, M.; GLOVER, F. **Principles of Scatter Search**, European Journal of Operational Research 169 (2), pp 359-372. 2006.

MARTÍ, R.. **Scatter Search – Wellsprings and Challenges.** 2004. Departamento de Dpto. de Estadística e Investigación Operativa, Facultad de Matemáticas, Universidad de Valencia, Spain, 2004.

MESQUITA, A. C. P.; CUNHA, C. B.. Otimização da distribuição de materiais na Força Aérea Brasileira. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES., Fortaleza, CE, 2008. **Panorama nacional da pesquisa em transportes 2008**. Rio de Janeiro : ANPET, 2008. 1 CD-ROM.

MIN, H.. **The multiple the vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up points.** Transportation Research Part A. v5. 377-386. 1989.

MINE, M. T.; SILVA, M. S. A.; OCHI, L. S.; SOUZA, M. J. F. **Um algoritmo heurístico híbrido para o Problema de Roteamento de Veículos com Entrega e Coleta Simultânea**. Em: XXIX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. A Engenharia de Produção e o Desenvolvimento Sustentável: Integrando Tecnologia e Gestão. Salvador, BA, Brasil, 06 a 09 de outubro de 2009.

MLADENOVIC, N.; HANSEN, P., **Variable neighborhood Search.** Computers and Operations Research, v. 24, 1097 – 1100. 1997.

MONTANÉ, F. A. T. **Um Algoritmo de Busca Tabu Adaptativo aplicado a Problemas de Roteamento de Veículos com Pedidos de Coleta e Entrega**. In: XXXVIII SBPO Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2006, Goiânia, 2006.

MONTANÉ, F. A. T.; GALVÃO, R. D. **A tabu search algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery service.** Computers and Operations Research, v. 33, p. 595-619, 2006.

MOSHEIOV, G. **The traveling salesman problem with pick-up and delivery**. European Journal of Operational Research, Vol. 79, pp. 299-310. 1994.

MOSHEIOV, G. **Vehicle routing with pick-up and delivery: tour-partitioning heuristics.** Computers and Industrial Engineering, 34, pp. 669-684. 1998.

NAGY, G.; SALHI, S. **Heuristic algorithms for single and multiple depot vehicle routing problems with pickups and deliveries.** European Journal of Operational Research. v162 i1. 126-141. 2005.

NOVAES, A. G.: **Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição: estratégia, operação e avaliação**, Campus, Rio de Janeiro, 2001.

PSARAFTIS, H. N. **A dynamic programming solution to a single vehicle many-to-many immediate request dial-a-ride problem.** Transportation Science 14, 130-154. 1980.

REGO, C. **Scatter search for Vehicle Routing Problems**. National INFORMS Meeting, Salt Lake City, Utah, 2000.

REGO, C.; LEÃO, P. **A Scatter Search Tutorial for Graph-Based Permutation Problems**. Working Paper Series, Hearin Center for Enterprise Science, School of Business Administration, The University of Mississippi , 2002.

RIGHINI, G. **Approximation algorithms for the vehicle routing problem with pick-up and delivery.** Note del Polo - Ricerca 33, Polo Didattico e di Ricerca di Crema, Universita degli Studi di Milano, Luglio. 2000.

ROPKE, S., PISINGER, D. A unified heuristic for a large class of vehicle routingproblems with backhauls. **European Journal of Operational Research.** 171:750–775. 2006.

ROSENKRANTZ, D. J., STEARNS, R. E.; LEWIS, P. M. **An Analysis of Several Heuristics for the Travelling Salesman Problem**. Siam J. Comput., v. 6, 1977. p. 563-581.

RUSSELL, R. A.; CHIANG, W. **Scatter search for the vehicle routing problem with time windows**. European Journal of Operational Research: Elsevier, The University of Tulsa, 24 jun. 2004.

SALHI, S.; NAGY, G.. **A cluster insertion heuristic for single and multiple depot vehicle routing problems with backhauling.** Journal of the Operational Research Society. V50. 1034-1042. 1999.

SAVELSBERGH, M. W. P.; SOL, M. **The general pickup and delivery problem**, *Transportation Research*, 29, 17-29, 1995.

SCHEUERER, S.; WENDOLSKY, R. **A Scatter Search heuristic for the capacitated clustering problem**, European Journal of Operational Research 169 (2), pp. 533-547. 2006.

SCHOPF, E. C., SCHEPKE, C., SILVA, M. L., et al., **Um Estudo da Aplicação de Heurísticas Construtivas e de Melhoramento para um Problema de PRV.** In: III Simpósio de Informática da Região Centro, Santa Maria, RS, Brasil, 2004.

SILVER, E.A. **An overview of heuristic solution methods.** Journal of the Operational Research Society 55(9), p.936-956. 2004.
SOLOMON, M. M. **Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints**, Operations Research, v.35 n.2, p.254-265, March-April 1987.

SOSA, N. G. M.; GALVÃO, R. D.; GANDELMAN, G.A. . **Algoritmo de busca dispersa aplicado ao problema clássico de roteamento de veículos.** Pesquisa Operacional, v. 27, p. 293-310, 2007.

SOSA, N. G. M.; GANDELMAN, G.A. SANT'ANNA, A. P.. **An Analysis of Techniques to Generate Initial Solutions for Scatter Search Methods Applied to the Problem of Vehicle Routing with Simultaneous Delivery and Pickup.** In: EngOpt 2008 -International Conference on Engineering Optimization. Rio de Janeiro, Brazil, 01 - 05 June 2008.

SOSA, N. G. M.; LAGUNA, M.; GANDELMAN, G.A.; SANT'ANNA, A. P. **Scatter Search applied to the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pickup**. Disponível em : <http://leeds-faculty.colorado.edu/Laguna/articles/vrpsdp.html>, acesso em: 11 de julho de 2009.

SUBRANIAN, A.; OCHI, L. S.; CABRAL, L. A. F. **An efficient ILS heuristic for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery.** RT 07/08. Rio de Janeiro: Instituto de Computação – UFF, 17 p. 2008.

VOß, S.. **Tabu Search: Applications and Prospects.** Network Optimization Problems, páginas 333-353. World Scientific Publishing Co. 1993.

VURAL, A.V. **A GA Based Meta-Heuristic for the Capacitated Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Deliveries.** M. S. Thesis, Sabanci University. 2004.

WASSAN, N. A., WASSAN, A. H., NAGY, G.. **A reactive tabu search algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pickups and deliveries**. Journal of Combinatorial Optimization, 15(4):368–386, 2007.

WENDOLSKY, R.; SCHEUERER, S. **A Cluster Based Scatter Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem.** Fraunhofer-center for Applied Research on Technologies for The Logistics Service Industries (ATL), University of Regensburg, 93040 Regenburg, Germany, No. 415. 2006.

YAMASHITA, D.S.; ARMENTANO, V. A.; LAGUNA, M. **Scatter Search for Project scheduling with resource availability cost**, European Journal of Operational Research 169 (2), pp. 623-637. 2006.

YAO, X.. **An Overview of Evolutionary Computation.** Chinese Journal of Advanced Software Research, 3(1), 12-29. 1996.

ZACHARIADIS, E. E.; TARANTILIS, C. D.; KIRANOUDIS, C. T. **A hybrid metaheuristic algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up service.** Department of Process Analysis and Plant Design, University of Athens, Athens, Greece, 2009.