

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**Rafael Roco de Araújo**

**UMA ABORDAGEM DE RESOLUÇÃO INTEGRADA PARA OS  
PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO E CARREGAMENTO DE VEÍCULOS**

**Porto Alegre**

**2010**

**Rafael Roco de Araújo**

**UMA ABORDAGEM DE RESOLUÇÃO INTEGRADA PARA OS  
PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO E CARREGAMENTO DE VEÍCULOS**

**Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia, área de concentração: Sistemas de Transportes.**

**Orientador: Luiz Afonso dos Santos Senna, Ph.D**

**Porto Alegre**

**2010**

**Rafael Roco de Araújo**

**UMA ABORDAGEM DE RESOLUÇÃO INTEGRADA PARA OS  
PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO E CARREGAMENTO DE VEÍCULOS**

**Esta tese foi julgada adequada para a obtenção título de DOUTOR EM  
ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora  
designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.**

Professor Luiz Afonso dos Santos Senna, Ph.D  
**Orientador**

Professora Carla Schwengber ten Caten, Dr.  
**Coordenadora PPGEP / UFRGS**

Banca Examinadora:

Professor Álvaro Gehlen de Leão, Dr.  
**Faculdade de Engenharia / PUCRS**

Professora Ana Maria Volkmer de Azambuja, Dr.  
**Departamento de Matemática / FURG**

Professora Christine Tessele Nodari, Dr.  
**PPGEP / UFRGS**

*A minha esposa Dione e a nossa filha Rafaela que está a caminho  
A meu pai, Arno  
A memória de Volmir Antonietti  
Por todos que se empenham em qualificar o transporte rodoviário de cargas no Brasil*

## AGRADECIMENTOS

Invariavelmente a finalização de um trabalho de tese remete à lembrança de seu autor uma série de etapas enfrentadas e vencidas e por conseqüência, pessoas e instituições que colaboraram de forma decisiva neste processo.

Deste modo, gostaria de registrar meu sincero agradecimento a meu orientador, Prof. Luiz Afonso dos Santos Senna, pelo acompanhamento do trabalho, motivação e presença amiga. Estendo este agradecimento ao Prof. Fernando Michel por seu apoio e sua disponibilidade para troca de idéias que se mostraram bastante valiosas.

Agradeço também a colaboração dos professores Marcus Ritt e Luciana Buriol do Instituto de Informática da UFRGS, decisiva para o desenvolvimento da modelagem matemática e sua implementação computacional. Incluo também aqui o aluno do curso de Ciência da Computação da UFRGS, Gabriel Portal, que participou ativamente da parte inicial de implementação. Destaco, de modo especial, a participação do aluno do curso de Engenharia de Computação da PUCRS, Lúcio Polese Cossio, pelo empenho e grande capacidade demonstrados no trabalho de implementação computacional da configuração definitiva do modelo.

Ao PPGEP pela oportunidade que nos foi dada para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao pessoal do Lastran, incluindo professores, alunos de pós-graduação, bolsistas e funcionários agradeço a amizade e constante apoio. Agradeço também ao Centro de Estudos Integrados da FENG/PUCRS onde foram realizados os testes computacionais.

A minha esposa, Dione Gallo de Araújo, por seu amor, carinho, incentivo e compreensão que foram essenciais para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho. Agradeço a meu pai todo apoio e encorajamento e por ter me tornado, assim como ele, um “transporteiro”.

Por fim, elevo minha graditão a Deus que em Sua imensa e insondável sabedoria guia nossos passos em direção à verdadeira felicidade.

## RESUMO

O transporte de cargas desempenha um papel fundamental nos sistemas logísticos uma vez que possibilita o fluxo de produtos entre os elementos dos canais de distribuição, além de representar um elevado percentual de participação nos custos logísticos totais. Desse modo, a eficiência dos serviços de transporte depende diretamente de um adequado processo de planejamento em nível estratégico, tático e operacional. O transporte rodoviário, em particular, apresenta em nível operacional, problemas de elevada complexidade como a roteirização e o carregamento de veículos. Durante os últimos 50 anos estes problemas vêm sendo objeto de intensos estudos e desenvolvimentos, porém de forma separada, conduzindo a resultados difíceis de serem implementados nas situações práticas, devido à grande interdependência existente entre roteirização e carregamento de veículos. A resolução integrada destes dois problemas é recente na literatura, o que abre um campo bastante promissor para novos desenvolvimentos. Assim, esta tese tem como objetivo propor uma abordagem integrada de resolução para o problema de roteirização e carregamento de veículos onde, além das restrições de carregamento tridimensionais, as restrições de tempo de ciclo e distribuição de peso nos eixos são consideradas. Este modelo adota uma abordagem aproximativa que combina o uso de heurísticas para construção dos carregamentos com a metaheurística de Busca Tabu para melhoria dos roteiros de entrega. Para execução dos testes computacionais é proposto um conjunto de 12 instâncias que buscam simular situações práticas encontradas nas operações de entrega feitas por empresas de transporte e prestadores de serviços logísticos. A partir desse conjunto de instâncias são construídos cenários que avaliam o uso de diferentes tipos de veículos e os respectivos custos operacionais. Testes complementares realizados com um conjunto de 27 instâncias disponíveis na literatura, demonstram a capacidade do modelo proposto de atingir boas soluções em um tempo de processamento aceitável.

**Palavras-Chave:** Transporte de Cargas. Roteirização de Veículos. Carregamento de Veículos. Estratégias de Resolução.

## ABSTRACT

Freight transportation plays a fundamental role in logistics systems, once it enables the product flow between distribution channels elements, besides to represents a high percentage of participation on the total logistics costs. In this way, transport service efficiency depends directly of a suitable process of planning in strategic, tactical and operational level. The road transportation, in particular, shows in operational level high complexity problems as routing and loading of vehicles. During the last 50 years, these problems has been object of deep studies and developments, but in a separate manner, leading to results that are difficult to implement in practical situation due to the interdependence between routing and loading of vehicles. The integrated resolution of these two problems is recent in the literature, what opens a quite promising field for new developments. Thus, this thesis has as objective to propose an integrated resolution approach for the vehicle routing and loading where, besides the three-dimensional loading constraints, constraints, the time cycle and the distribution load over de axles are considered. This model adopts an approximated approach that combines the use of heuristics for loading construction with Tabu Search metaheuristics to improve the delivery routes. For computational tests execution is proposed a 12 instances set that tries to simulate practical situation found in delivery operations made by freight firms and thirty party logistics. From this instance set, it is built scenarios that evaluate the use of different vehicle types and the respectives operational costs. Complementary tests made with a 27 instances set available in literature show the capacity of proposed model to get good solutions in an acceptable computational time.

**Keywords:** Freight Transportation. Vehicle Routing. Vehicle Loading. Resolution Strategies.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema de transferência direta .....	23
Figura 2 - Sistema de distribuição via centro de triagem .....	25
Figura 3 - Sistema empregando centro de distribuição .....	26
Figura 4 – Rede de transporte multiobjetivo e suas instâncias .....	30
Figura 5 – Arranjo de caixas sobre um pallet .....	39
Figura 6 – Arranjo de caixas em um contêiner .....	40
Figura 7 - Seqüência dos procedimentos gerais de execução do modelo .....	113
Figura 8 – Representação da matriz bidimensional de carregamento .....	115
Figura 9 – Agrupamento de itens em cubos .....	117
Figura 10 – Agrupamento de itens em pilhas .....	117
Figura 11 – Conjunto de pilhas .....	118
Figura 12 – Pseudo-código do procedimento de agrupamento de itens .....	119
Figura 13 – Pseudo-código do procedimento de construção do carregamento .....	120
Figura 14 – Ordem de inserção dos itens no compartimento de carga .....	121
Figura 15 – Pseudo-código do procedimento de primeira melhoria .....	122
Figura 16 – Algoritmo da versão paralela do Método das Economias .....	123
Figura 17 – Pseudo-código do procedimento de Busca Tabu .....	125
Figura 18 – Estrutura de dados da implementação computacional do modelo .....	130
Quadro 1 – Especificações técnicas dos veículos utilizados nos testes do modelo .....	136
Quadro 2 – Características das instâncias .....	139
Quadro 3 – Resultados para o Cenário 1 .....	142
Quadro 4 – Resultados para o Cenário 2 .....	143
Quadro 5 – Resultados para o Cenário 3 .....	144
Quadro 6 – Resultados para o Cenário 4 .....	145
Quadro 7 - Cenários de melhor desempenho de custos para as 12 instâncias .....	152



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Custos fixos e variáveis por veículo .....	137
Tabela 2 – Variação percentual dos valores de $z_o$ e $z_f$ nos cenários construídos .....	146
Tabela 3 – Variação percentual dos valores de $z_o$ e $z_f$ entre os cenários 1 e 2 .....	147
Tabela 4 - Variação percentual dos valores de $z_o$ e $z_f$ entre os cenários 1 e 3 .....	148
Tabela 5 - Variação percentual dos valores de $C_o$ e $C_f$ nos cenários construídos .....	149
Tabela 6 - Variação percentual dos valores de $C_o$ e $C_f$ entre os cenários 1 e 2 .....	150
Tabela 7 - Variação percentual dos valores de $C_o$ e $C_f$ entre os cenários 1 e 3 .....	151
Tabela 8 - Variação percentual dos valores de $C_o$ e $C_f$ entre os cenários 2 e 4 .....	151
Tabela 9 – Resultados dos testes comparativos com as instâncias de Gendreau <i>et al.</i> (2006) .....	154

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	13
1.1	OBJETIVOS	15
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo Geral</b>	16
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	16
1.2	JUSTIFICATIVA PARA A ESCOLHA DO TEMA	17
1.3	MÉTODO DE TRABALHO	18
1.4	DELIMITAÇÕES DO TRABALHO	18
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	19
<b>2</b>	<b>PLANEJAMENTO E OPERAÇÃO DO TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGAS</b>	20
2.1	O PLANEJAMENTO DO TRANSPORTE	20
2.2	OPERAÇÃO DO TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGAS	22
<b>2.2.1</b>	<b>Sistema de Transferência Direta</b>	23
<b>2.2.2</b>	<b>Sistema de Distribuição Via Centro de Triagem</b>	23
2.3	COLETA E DISTRIBUIÇÃO FÍSICA DE MERCADORIAS	26
<b>3</b>	<b>PROBLEMAS OPERACIONAIS DO TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGAS</b>	29
3.1	ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS	29
<b>3.1.1</b>	<b>Problema da Roteirização de Veículos com Frotas Heterogêneas</b>	33
<b>3.1.2</b>	<b>Problema da Roteirização de Veículos com Janelas de Tempo</b>	33
<b>3.1.3</b>	<b>Problema da Roteirização de Veículos com Múltiplos Depósitos</b>	34
<b>3.1.4</b>	<b>Problema da Roteirização de Veículos com Coletas e Entregas</b>	34
<b>3.1.5</b>	<b>Problema da Roteirização de Veículos Estocástico</b>	35
<b>3.1.6</b>	<b>Problema da Roteirização de Veículos com Múltiplos Compartimentos</b>	35
<b>3.1.7</b>	<b>Problema da Roteirização de Veículos Periódico</b>	35
<b>3.1.8</b>	<b>Problema da Roteirização de Veículos com Locais Dependentes</b>	36
<b>3.1.9</b>	<b>Problema da Roteirização de Veículos Aberto</b>	36
<b>3.1.10</b>	<b>Problema da Roteirização de Veículos com Múltiplo Uso</b>	36
<b>3.1.11</b>	<b>Problema da Roteirização de Veículos com Tempo Dependente</b>	37
3.2	CARREGAMENTO DE VEÍCULOS	37
<b>3.2.1</b>	<b>Problema do Carregamento de Pallets</b>	38
<b>3.2.2</b>	<b>Problema do Carregamento de Contêineres</b>	39
3.3	INTEGRAÇÃO ENTRE OS PROBLEMAS DA ROTEIRIZAÇÃO E CARREGAMENTO DE VEÍCULOS	42
<b>3.3.1</b>	<b>Problema da Roteirização de Veículos com Restrições de Carregamento em Duas Dimensões</b>	44
<b>3.3.2</b>	<b>Problema da Roteirização de Veículos com Restrições de Carregamento em Três Dimensões</b>	45

3.4	SISTEMAS DE APOIO À DECISÃO PARA OS PROBLEMAS OPERACIONAIS DO TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGAS .....	48
<b>4</b>	<b>CARACTERÍSTICAS MATEMÁTICAS DOS PROBLEMAS DA ROTEIRIZAÇÃO E DO CARREGAMENTO DE VEÍCULOS .....</b>	<b>51</b>
4.1	DEFINIÇÃO DOS PROBLEMAS DA ROTEIRIZAÇÃO E DO CARREGAMENTO DE VEÍCULOS COMO MODELOS DE OTIMIZAÇÃO .....	52
4.2	PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA .....	57
4.3	ESPAÇO DE SOLUÇÃO .....	58
4.4	OTIMIZAÇÃO COMBINATÓRIA .....	59
4.5	COMPLEXIDADE DOS PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO COMBINATÓRIA .....	60
<b>5</b>	<b>MÉTODOS PARA RESOLUÇÃO DOS PROBLEMAS DA ROTEIRIZAÇÃO E DO CARREGAMENTO DE VEÍCULOS .....</b>	<b>63</b>
5.1	MÉTODOS EXATOS .....	63
<b>5.1.1</b>	<b>Abordagens Enumerativas .....</b>	<b>64</b>
<b>5.1.2</b>	<b>Relaxação Lagrangeana .....</b>	<b>65</b>
<b>5.1.3</b>	<b>Planos de Corte .....</b>	<b>65</b>
5.2	MÉTODOS APROXIMATIVOS .....	66
<b>5.2.1</b>	<b>Heurísticas para Resolução do Problema da Roteirização de Veículos pela Classificação de Bott e Ballou (1986) .....</b>	<b>68</b>
5.2.1.1	<i>Agrupar Primeiro – Roteirizar Depois .....</i>	69
5.2.1.2	<i>Roteirizar Primeiro – Agrupar Depois .....</i>	69
5.2.1.3	<i>Procedimentos de Economia e Inserção .....</i>	70
5.2.1.4	<i>Procedimentos de Troca ou Melhoria .....</i>	70
<b>5.2.2</b>	<b>Heurísticas para Resolução do Problema de Carregamento de Veículos .....</b>	<b>70</b>
5.2.2.1	<i>Heurísticas para o Problema do Carregamento de Pallets .....</i>	70
5.2.2.2	<i>Heurísticas para o Problema do Carregamento de Contêineres .....</i>	71
<b>5.2.3</b>	<b>Metaheurísticas .....</b>	<b>72</b>
5.2.3.1	<i>Busca Local Básica .....</i>	74
5.2.3.2	<i>Têmpera Simulada .....</i>	75
5.2.3.3	<i>Métodos de Busca Local Explorativa .....</i>	77
5.2.3.4	<i>Busca Tabu .....</i>	81
5.2.3.5	<i>Computação Evolutiva .....</i>	85
5.2.3.6	<i>Busca Dispersa .....</i>	87
5.2.3.7	<i>Otimização por Colônia de Formigas .....</i>	88
5.2.3.8	<i>Estratégias Híbridas .....</i>	90
5.3	OTIMIZAÇÃO INTERATIVA.....	91
5.4	GERAÇÃO DE COLUNAS .....	92
5.5	ABORDAGEM HÍBRIDA .....	93
5.6	PROGRAMAÇÃO POR RESTRIÇÕES .....	94

<b>6</b>	<b>MÉTODOS APRESENTADOS NA LITERATURA PARA RESOLUÇÃO INTEGRADA DA ROTEIRIZAÇÃO E CARREGAMENTO DE VEÍCULOS</b> .....	96
6.1	RESOLUÇÃO DO 2L-CVRP .....	96
6.2	RESOLUÇÃO DO 3L-CVRP .....	98
<b>7</b>	<b>PROPOSIÇÃO DE UM MODELO PARA RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DA ROTEIRIZAÇÃO E DO CARREGAMENTO DE VEÍCULOS</b> .....	106
7.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA .....	106
7.2	JUSTIFICATIVA PARA A ABORDAGEM ADOTADA E CARACTERÍSTICAS DO MODELO PROPOSTO .....	108
7.3	APRESENTAÇÃO E DESCRIÇÃO DO MODELO .....	112
<b>7.3.1</b>	<b>Representação do Carregamento</b> .....	113
<b>7.3.2</b>	<b>Heurística de Carregamento</b> .....	116
7.3.2.1	<i>Procedimento de Agrupamento de Itens</i> .....	117
7.3.2.2	<i>Procedimento de Construção do Carregamento</i> .....	119
<b>7.3.3</b>	<b>Busca Tabu Aplicada na Melhoria dos Roteiros</b> .....	123
7.4	IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO MODELO .....	129
<b>8</b>	<b>APLICAÇÃO DO MODELO</b> .....	133
8.1	DEFINIÇÃO DOS DADOS E PARÂMETROS .....	134
<b>8.1.1</b>	<b>Determinação da Rede de Atendimento</b> .....	134
<b>8.1.2</b>	<b>Características das Cargas</b> .....	135
<b>8.1.3</b>	<b>Características dos Veículos</b> .....	136
<b>8.1.4</b>	<b>Restrição de Tempo</b> .....	137
8.2	INSTÂNCIAS PROPOSTAS .....	138
8.3	CONSTRUÇÃO DE CENÁRIOS ATRAVÉS DA EXECUÇÃO DO MODELO .....	140
8.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	141
8.5	TESTES COMPLEMENTARES COM AS INSTÂNCIAS DE GENDREAU ET AL. (2006) .....	152
<b>9</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	155
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	158
	<b>APÊNDICE A</b> - Estrutura de arquivos do programa implementado em C++ .....	171
	<b>APÊNDICE B</b> - Programa principal .....	172

## 1 INTRODUÇÃO

Os aspectos que contribuem para a eficiência dos processos produtivos tem despertado a atenção dos tomadores de decisão das organizações. De fato, a grande competitividade observada nas últimas décadas, agravada por fatores ambientais como as crises financeiras, a globalização da economia, o ciclo de vida reduzido dos produtos e a mudança nos padrões de consumo motivaram a introdução de uma série de aperfeiçoamentos na área de produção. Pioneiro em tal iniciativa, o setor industrial direcionou seus esforços na melhoria do desempenho da produção, através da implantação de sistemas de qualidade, da automação de processos fabris e da adoção de sistemas para gestão dos recursos da manufatura e, posteriormente, da empresa. Uma vez reduzidas as oportunidades de melhoria em áreas tradicionais das empresas, mas persistindo a necessidade de avanços de eficiência, a atenção dos planejadores se voltou para as atividades relacionadas ao abastecimento de materiais, movimentação interna de produtos em processo e distribuição dos produtos acabados.

Para denominar o conjunto de ações que tem como objetivo disponibilizar materiais e produtos nos locais e tempos em que são requeridos foi adotado pelo meio empresarial o termo *logística*. Este termo, originado junto ao meio militar, expressava todo trabalho relacionado ao abastecimento de tropas com os materiais necessários.

Ainda que a relevância dada pelas empresas à logística seja recente, a evolução desta enquanto apoio à produção de bens e serviços tem sido uma realidade desde o início da industrialização e urbanização em massa que se seguiu à Segunda Guerra Mundial. Assim, segundo Novaes (2001), a logística tem passado de um modelo sustentado por grandes estoques, transferências em grandes quantidades e foco na redução dos custos de transporte para outro que contempla o gerenciamento total da *cadeia de suprimentos*, na qual é implementada uma visão integrada do fluxo de produtos e informações desde o fornecedor de matéria-prima até o consumidor final.

Considerando esta evolução, a logística pode ser definida, conforme o Council of Supply

Chain Management Professionals (2010), como parte do processo de gerenciamento da cadeia de suprimentos que planeja, implementa e controla de maneira eficiente e eficaz o fluxo e a armazenagem de produtos, bem como os serviços e informações associados, cobrindo desde o ponto de origem até o ponto de consumo, com o objetivo de atender aos requisitos do consumidor.

As atividades logísticas na cadeia de suprimento podem ser divididas, conforme Ballou (2006), em *principais* e de *suporte*. As atividades principais compreendem o serviço ao cliente, o transporte, a gestão de estoques e os fluxos de informação e processamento de pedidos. Como atividades de suporte aparecem a armazenagem, o manuseio de materiais, embalagem, compras, a cooperação com produção/operações e a manutenção de informações.

O transporte, em particular, se destaca por estabelecer a ligação entre os elementos que compõem os canais de distribuição como fornecedores, fabricantes, atacadistas, distribuidores, varejistas e consumidores finais. Além disso, cabe destacar o percentual do custo desta atividade em relação aos custos logísticos totais que pode variar de 30% a 60% (BALLOU, 2006). Face à sua importância, o adequado planejamento do transporte de cargas é uma condição básica para o bom desempenho de qualquer sistema logístico.

O ato de movimentar produtos é uma necessidade básica para subsistência humana que tem acompanhado permanentemente a sociedade. Uma vez que, na maioria dos casos, os locais de produção se encontram afastados dos locais de consumo, foi preciso desenvolver meios para vencer tais barreiras de ordem espacial.

Segundo Keedi e Mendonça (2000), partindo do uso de sua própria força, o homem passou a explorar também a força de animais e de elementos naturais (como os cursos de água) para movimentar produtos. O grande salto tecnológico propiciado pela Revolução Industrial no século XVIII trouxe, por um lado, a necessidade de movimentar uma quantidade significativamente maior de produtos e por outro a possibilidade de desenvolver meios de transporte terrestre de maior capacidade e velocidade, onde se enquadram o transporte ferroviário e o transporte rodoviário.

Devido a sua flexibilidade e disponibilidade, o transporte rodoviário passou a desempenhar um papel fundamental na movimentação de produtos, seja em âmbito organizacional como também individual. Este fato favoreceu o surgimento e o crescimento de empresas que prestam este tipo de serviço ao mercado. Atualmente, tais empresas enfrentam um sério desafio de adequar suas operações às necessidades dos clientes, oferecendo serviços confiáveis com custos adequados.

Fatores como o uso intensivo de recursos humanos e materiais, a dispersão espacial dos clientes, a diversidade de itens manuseados e a pressão pela redução dos tempos de viagens, tornam o processo de tomada de decisão extremamente complexo no transporte rodoviário de cargas, o que oportuniza o desenvolvimento de modelos que auxiliem a otimização dos processos operacionais. Soma-se a isto fatores relacionados a legislação que as empresas estão subordinadas como nas áreas trabalhistas e de trânsito e circulação.

Ainda que tais fatores tornem complexa a tomada de decisão no transporte rodoviário de cargas, são disponibilizadas atualmente tecnologias de informação baseadas em computador com significativo potencial para auxiliar os decisores em suas tarefas. Porém, tais tecnologias tornam-se de fato efetivas quando dotadas de modelos de otimização adequados as decisões que serão tomadas.

## 1.1 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho estão divididos em dois níveis. O primeiro deles compreende o *objetivo geral*. No segundo nível aparecem os *objetivos específicos*.

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo geral propor um modelo para resolver, de forma integrada, o problema de roteirização e carregamento de veículos onde, além das restrições de carregamento tridimensionais, são consideradas também restrições de tempo de ciclo e distribuição de peso nos eixos dos veículos.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) desenvolver um procedimento para acomodação de itens no compartimento de carga de veículos considerando restrições de carregamento tridimensionais;
- b) definir um procedimento para a construção de roteiros de entrega de percurso mínimo com início e fim em um centro de triagem ou distribuição, sujeitos a restrição de tempo de ciclo;
- c) desenvolver um procedimento que explore o espaço de soluções buscando a melhor solução na qual sejam factibilizadas as restrições de carregamento tridimensional, tempo de ciclo e distribuição de peso nos eixos;
- d) aplicar o modelo na construção de cenários com base em instâncias que simulem operações reais, nos quais seja avaliada a possibilidade de uso de diferentes tipos de veículos e os respectivos custos operacionais;
- e) realizar testes computacionais complementares com o modelo proposto utilizando instâncias da literatura.



## 1.2 JUSTIFICATIVA PARA ESCOLHA DO TEMA

Desde sua introdução, o Problema de Roteirização de Veículos vem sendo intensamente estudado, constituindo um dos problemas mais conhecidos na área de Pesquisa Operacional e um dos mais difíceis de serem resolvidos, dada sua natureza combinatorial. A medida que avançam os estudos, novos desafios se apresentam uma vez que este problema está diretamente relacionado a uma das decisões mais complexas na área operacional do transporte rodoviário de cargas. A racionalização dos percursos de veículos de carga, especialmente no meio urbano, resulta em ganhos que podem ser expressos pelo aumento do nível de serviço prestado pela empresa a seus clientes, pela redução de custos operacionais, pela alocação eficiente dos veículos e tripulações disponíveis, além da diminuição das emissões de poluentes e da interferência no tráfego.

Entretanto, um sério desafio enfrentado no desenvolvimento de modelos a serem aplicados na resolução deste problema consiste na representação adequada da realidade operacional que faz parte do cotidiano das empresas. Daskin (1985) chama a atenção sobre este fato, referindo-se a necessidade de aperfeiçoamento contínuo dos modelos de roteirização.

Neste sentido, muitas variantes para o problema de roteirização vem sendo propostas na literatura, sendo que uma das mais recentes trata justamente da integração entre roteirização e carregamento de veículos. Por ser recente, abre uma importante oportunidade para o desenvolvimento de modelos que incorporem restrições diversas, para a aplicação de estratégias de resolução mais eficientes e para a realização de testes com dados e parâmetros condizentes com as operações reais.

Outro desdobramento a ser considerado quando se lida com a modelagem deste tipo de problema é sua aplicação na tomada de decisão. A resolução de um problema de roteirização fornece cenários para o decisor, tornando mais fácil o manuseio de uma série de informações que podem estar a sua disposição. Uma modelagem adequada produz melhores resultados, emprega de forma efetiva a informação existente, além de ganhar a credibilidade do decisor.

### 1.3 MÉTODO DE TRABALHO

Para que fosse atingido o objetivo proposto neste trabalho foi adotado um método de estudo composto das seguintes etapas:

- a) revisão da literatura compreendendo os aspectos conceituais e resolutivos para o problema de roteirização e carregamento de veículos;
- b) desenvolvimento do algoritmo do modelo composto por procedimentos de carregamento, de roteirização e de melhoria da solução;
- c) implementação computacional do modelo proposto;
- d) construção de instâncias que simulem as operações reais;
- e) realização de testes computacionais com a utilização das instâncias construídas e outras apresentadas na literatura para este tipo de problema, sendo a seguir analisados os resultados obtidos;
- f) elaboração das conclusões e da proposta para futuros desenvolvimentos.

### 1.4 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

O trabalho desenvolvido apresenta as seguintes delimitações:

- a) dada a abordagem aproximativa, segundo a qual o modelo foi desenvolvido, são obtidas boas soluções (que não são exatas) em um tempo de processamento computacional aceitável;

- b) as demandas dos pontos de entrega são determinísticas;
- c) é considerado um único centro de triagem onde iniciam e terminam todos os roteiros;
- d) as ligações entre os pontos que representam o centro de triagem e os clientes são dados por distâncias euclidianas aproximadas;
- e) os itens a serem carregados possuem forma de paralelepípedo.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Além do presente capítulo, de caráter introdutório, este trabalho é composto por outros oito capítulos. Do capítulo 2 ao capítulo 6 é apresentado o referencial teórico, distribuído da seguinte forma: no capítulo 2 são discutidos os aspectos relacionados ao planejamento e operação dos serviços de transporte rodoviário de cargas; o capítulo 3 apresenta os problemas que aparecem em nível operacional que são a roteirização e o carregamento de veículos, bem como a integração destes problemas; o capítulo 4 aborda as características matemáticas dos problemas de roteirização e carregamento e, o capítulo 5, os métodos de resolução para tais problemas; no capítulo 6 são descritos os métodos de resolução integrados para o problema de roteirização e carregamento de veículos apresentados na literatura. No capítulo 7 é feita a proposição de um modelo para resolução integrada dos problemas de roteirização e carregamento de veículos considerando restrições de tempo de ciclo e distribuição de peso nos eixos do veículo. A aplicação do modelo em um conjunto proposto de instâncias e em outro fornecido pela literatura, e a respectiva análise dos resultados obtidos é apresentada no capítulo 8. Por último, o capítulo 9 apresenta as conclusões deste trabalho.

## 2 PLANEJAMENTO E OPERAÇÃO DO TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGAS

O ato de planejar é inerente aos indivíduos e as organizações. No ambiente empresarial, de modo particular, a capacidade de efetuar um bom planejamento, aparece hoje como um meio de diferenciação em relação aos concorrentes, dados os impactos positivos sobre o nível de serviço e os custos. Assim, a definição das ações que devem ser postas em prática em um determinado horizonte futuro consiste em um aspecto-chave para que se obtenha o êxito almejado. Esta necessidade por planejamento afeta também o setor de transporte e de modo especial sua área operacional devido a complexidade aí existente.

O presente capítulo trata do planejamento e operação do transporte rodoviário de cargas. Na seção 2.1 é discutido o planejamento do transporte e as características dos seus respectivos níveis. A operação do transporte rodoviário de cargas, efetuada através de sistemas específicos é descrita na seção 2.2. Por último, a seção 2.3 descreve as decisões que envolvem o projeto das operações de coleta e entrega de mercadorias.

### 2.1 O PLANEJAMENTO DO TRANSPORTE

Sendo uma atividade produtiva, o transporte de cargas requer o emprego de recursos materiais e humanos. Como tais recursos são limitados e a relação entre oferta e demanda quase sempre apresenta não uniformidade, será necessário um trabalho prévio de planejamento que torne viável o serviço a ser prestado em termos de minimização dos custos e maximização do retorno financeiro. Assim, a abordagem geral de planejamento das organizações também pode ser estendida à atividade de planejamento no transporte de cargas, sendo dividida em *estratégica*, *tática* e *operacional*.

Segundo Crainic e Laporte (1997), o planejamento estratégico envolve tipicamente os níveis mais altos na hierarquia de uma organização e requer grande investimento de capital em

um horizonte de tempo relativamente longo. Seu foco de ação consiste em determinar políticas de desenvolvimento geral, as quais irão orientar também o planejamento tático e o planejamento operacional. No transporte de cargas, as decisões estratégicas, conforme Bodin *et al.* (1983) e Crainic e Laporte (1997), compreendem o projeto de redes de atendimento e a análise de sua evolução (podendo resultar em expansão ou re-alocação), a localização de instalações (como centros de distribuição, centros de triagem, pátios ferroviários e terminais intermodais), a aquisição de recursos produtivos (veículos e equipamentos), a definição geral do nível de serviço a ser prestado e o estabelecimento de políticas tarifárias.

O planejamento tático tem por objetivo assegurar, no médio prazo, uma alocação eficiente e racional dos recursos existentes a fim de melhorar o desempenho do sistema como um todo, levando em conta as diretrizes estratégicas. As decisões são tomadas com base em dados agregados e são sensíveis a variações significativas nos parâmetros do sistema como, por exemplo, as sazonalidades na demanda (CRAINIC; LAPORTE, 1997). As decisões de nível tático relacionam-se, por exemplo, com a escolha de rotas e o tipo de serviço a ser operado; com a definição do sistema operacional das instalações, bem como a alocação dos recursos entre tais instalações; e a reposição de recursos que deverão ser utilizados em um período posterior de planejamento (BODIN *et al.*, 1983; CRAINIC; LAPORTE, 1997).

O trabalho de planejamento operacional é executado por supervisores locais em um ambiente altamente dinâmico onde o fator tempo desempenha um papel importante, já que a tomada de decisão ocorre com uma frequência diária. Para que se torne efetivo, o planejamento operacional requer uma representação detalhada de veículos, vias, instalações e atividades (CRAINIC; LAPORTE, 1997). Decisões neste nível compreendem, por exemplo, a roteirização e programação de veículos e tripulações, a configuração dos carregamentos e a execução dos planos de manutenção (BODIN *et al.*, 1983; CRAINIC; LAPORTE, 1997).

Um aspecto inerente ao planejamento operacional é o grau de complexidade dos problemas tratados em função da grande quantidade de variáveis de decisão e restrições a serem analisadas. Assim, a obtenção de soluções a partir de métodos exclusivamente manuais pode se tornar bastante difícil e demorada, contrapondo-se a necessidade de boas soluções geradas em um

curto espaço de tempo.

No caso particular do transporte rodoviário de cargas, a complexidade dos problemas relacionados ao planejamento operacional pode ser agravada por fatores como heterogeneidade dos clientes que são atendidos (desde grandes indústrias até pessoas físicas); restrições severas de tráfego, uma vez que caminhões devem compartilhar espaço nas vias com automóveis e com o transporte coletivo; além do ambiente altamente concorrencial que as empresas do setor enfrentam no Brasil, exigindo a manutenção dos custos operacionais em patamares mínimos.

## 2.2 OPERAÇÃO DO TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGAS

Uma análise, ainda que breve, sobre a evolução tecnológica dos meios de transporte nos últimos cem anos mostra importantes avanços, especialmente em termos de capacidade de carga e velocidade. Também beneficiado por esta evolução, o modal rodoviário experimentou um rápido crescimento de sua participação no mercado de transporte de cargas nos países ocidentais, principalmente em função de necessidades dos setores da indústria, do comércio e de serviços de tempo em trânsito reduzido e operação porta a porta.

Entretanto, a eficiência do transporte rodoviário não depende somente da tecnologia veicular e de infra-estrutura, mas também da escolha do sistema de operação mais adequado a um determinado processo logístico. Segundo Ballou (2006) esta escolha depende diretamente da natureza e tamanho dos lotes a serem movimentados, dos locais de origem e destino, dos custos envolvidos e do nível de serviço a ser atingido. Considerando estas necessidades, dois sistemas básicos de operação do transporte rodoviário de cargas se consolidaram junto às empresas do setor, sendo denominados por Novaes (1989) como de *Transferência Direta* e de *Distribuição Via Centro de Triagem*. Na literatura em língua inglesa, como em Coyle *et al.* (2006), são tratados por *Truck Load* (TL) e *Less than Truck Load* (LTL). Entre os profissionais que atuam no transporte rodoviário de cargas estes sistemas são denominados como de *Carga Completa* e *Fractionado*, respectivamente.

### 2.2.1 Sistema de Transferência Direta

Este sistema tem como principal característica a transferência de carga de um remetente diretamente para um destinatário que podem ser duas unidades de uma mesma empresa ou duas empresas diferentes (Figura 1).

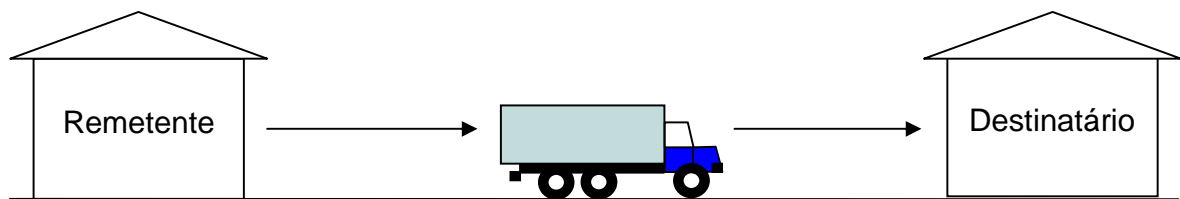


Figura 1 - Sistema de transferência direta  
Fonte: O autor

Em termos de processo, um veículo é carregado no domicílio do remetente com um ou mais tipos de mercadoria, tendo toda sua capacidade ocupada. A seguir este veículo se desloca até o domicílio do destinatário onde é descarregado.

A lotação completa do veículo proporciona economias de escala no custo de transporte em função da melhor ocupação do espaço disponível e do número reduzido de manuseios da carga. As distâncias envolvidas podem ser variáveis. Novaes (1989) apresenta uma análise que justifica em termos de custos a viabilidade deste sistema de operação.

A mesma lógica da transferência direta é estendida por Novaes (2001) ao contexto da distribuição física, que a denomina de *sistema um para um*.

### 2.2.2 Sistema de Distribuição Via Centro de Triagem

Existem casos em que o tamanho do lote a ser transferido de um remetente a um destinatário é bastante reduzido. Intuitivamente poderia se pensar em utilizar na transferência

direta veículos menores, tendo capacidade de carga compatível com o tamanho do lote. Contudo, nas médias e longas distâncias esta prática se torna economicamente inviável, uma vez que o custo de transporte incidirá sobre um número reduzido de unidades movimentadas.

Se, ao contrário, os lotes de vários clientes forem agrupados em um veículo de maior capacidade, o custo de transporte poderá ser diluído de forma mais racional, viabilizando a transferência em médias e longas distâncias, ainda que seja necessário o uso de instalações físicas (centros de triagem) para transferência das cargas entre os veículos de curta e longa distância. A análise da viabilidade dos custos neste sistema é feita por Novaes (1989, 2001).

O processo operacional no sistema de distribuição via centro de triagem é ilustrado na Figura 2. Neste exemplo, uma empresa transportadora atende a uma série de clientes localizados nas cidades A e B, que entre estas remetem e/ou recebem individualmente pequenas quantidades de carga. Em cada cidade é implantado um centro de triagem, ao qual é alocada uma frota de veículos de coleta e entrega (de menor capacidade). Diariamente, estes veículos recolhem e distribuem cargas de clientes situados junto a área de abrangência do respectivo centro de triagem. O sentido das setas entre os centros de triagem e os clientes indicam o fluxo de coletas e/ou entregas. Chegando aí, as cargas são desembarcadas, conferidas e consolidadas conforme o local de destino. É feito então o embarque nos veículos de longa distância que fazem a transferência entre as duas cidades. Uma vez chegado ao centro de triagem da cidade de destino, é feito o desembarque, a conferência e o embarque nos veículos que farão as entregas aos destinatários.

Além da configuração descrita acima, este sistema pode apresentar as seguintes variantes:

- a) um remetente para vários destinatários com desconsolidação em centro de triagem;
- b) vários remetentes para um destinatário com consolidação em centro de triagem;



- c) um remetente e vários destinatários atendidos a partir de um centro de distribuição, o qual consiste em uma instalação onde ocorre a armazenagem dos produtos até o momento em que são solicitados pelos clientes.

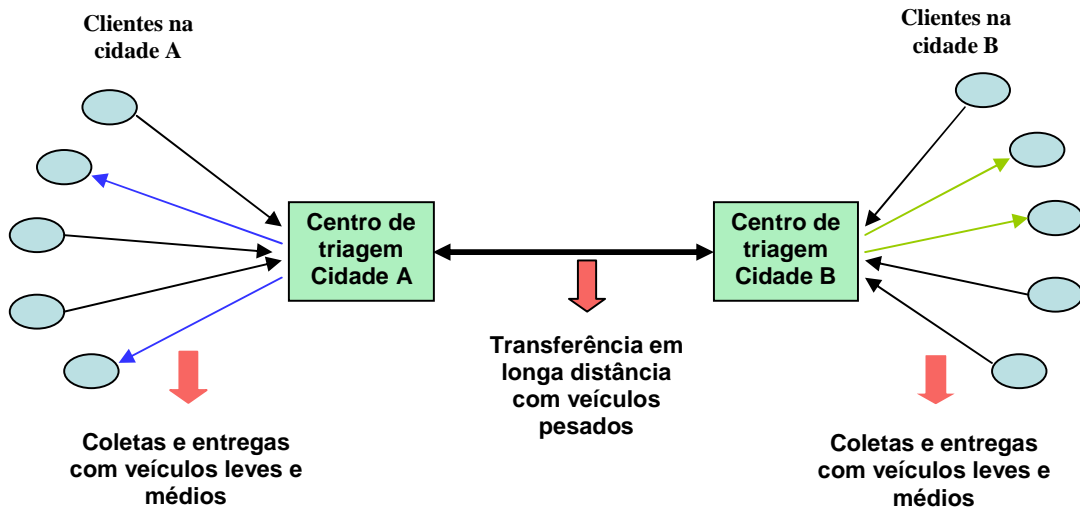


Figura 2 - Sistema de distribuição via centro de triagem  
Fonte: O autor

A variante *b* é também apresentada na literatura como sistema *milk-run*, bastante utilizado por empresas do setor industrial que procuram coordenar melhor o fluxo de abastecimento de matérias-primas. Já a variante *c* descreve os sistemas operados diretamente pelo remetente ou terceiro (prestador de serviços logísticos) através de centros de distribuição (Figura 3). Esta última variante é denominada por Novaes (2001) como *sistema compartilhado*.

Comparando os dois sistemas, pode-se notar que a distribuição via centro de triagem apresenta maior complexidade operacional do que a transferência direta, uma vez que além da transferência aparecem coletas e/ou entregas, as quais devem ser devidamente coordenadas de modo a viabilizar a prestação do serviço. As características do serviço de coleta e distribuição física de mercadorias, envolvendo centros de triagem e distribuição, serão discutidas a seguir.

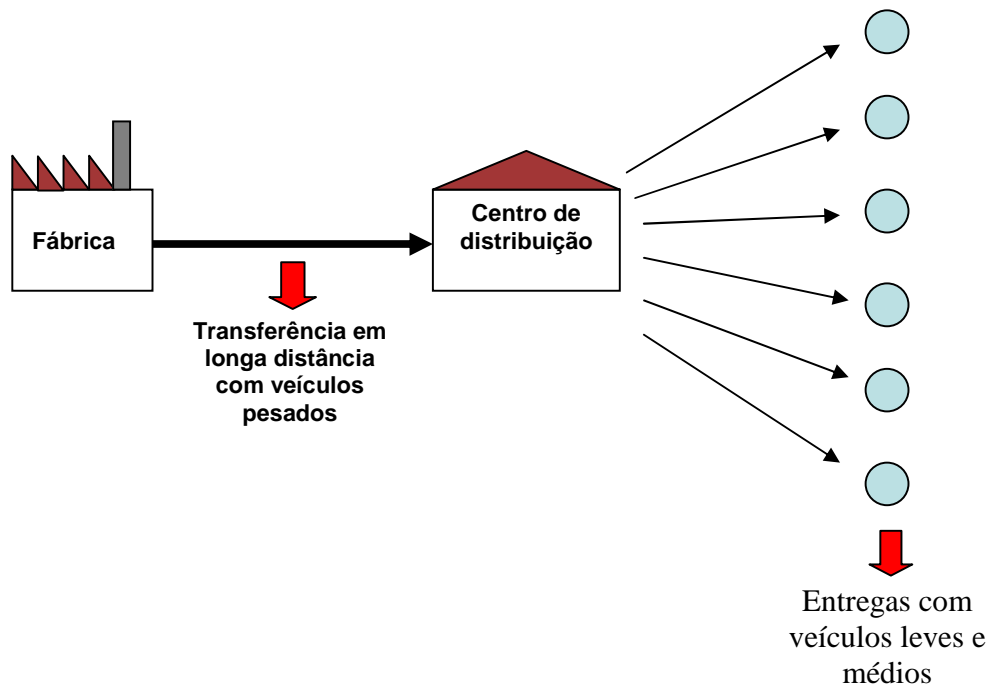


Figura 3 - Sistema empregando centro de distribuição  
Fonte: O autor

### 2.3 COLETA E DISTRIBUIÇÃO FÍSICA DE MERCADORIAS

O atendimento dos clientes de uma determinada região a partir de centros de triagem e distribuição exige a consideração, em termos de planejamento, das condicionantes temporais e espaciais envolvidas. Segundo Novaes (1989), o processo típico de estruturação de um sistema de distribuição via centro de triagem ocorre da seguinte forma:

- a) uma região geográfica atendida por um centro de triagem ou distribuição é dividida em *zonas* conforme a intensidade de ocorrência das demandas, cujos contornos podem ser rígidos, ou eventualmente flexíveis de modo a absorver variações nas demandas;
- b) um veículo é alocado a cada zona, com a respectiva tripulação, onde efetuará

coletas e/ou entregas. Em certas situações, devido ao aumento de demanda ou dos tempos de trajeto e paradas, poderá ser alocado um número maior de veículos por zona;

- c) cada veículo cumpre um roteiro, consistindo na seqüência em que os pontos de demanda devem ser visitados;
- d) o serviço efetuado por cada veículo deverá ser realizado dentro de um tempo de ciclo pré-estabelecido, onde é considerada a jornada máxima de trabalho da tripulação.

A partir daí as questões relevantes que surgem são (NOVAES, 1989):

- a) como dividir a região de atendimento em zonas de serviço?
- b) como selecionar o veículo/tripulação mais adequado ao serviço?
- c) qual a quilometragem média da frota e os diversos tempos associados ao serviço, de forma que seja possível quantificar os custos?
- d) qual a fração do serviço não cumprida num dia de trabalho?
- e) qual a freqüência ideal em que o serviço deve ser oferecido?
- f) dadas as várias possibilidades, como selecionar a configuração mais adequada?

O mesmo autor refere que este tipo de problema compreende dois níveis de resolução, sendo um na fase de projeto do sistema envolvendo basicamente estimativas e o outro na fase de operacionalização envolvendo um grande detalhamento de informações.

Metodologias de análise são propostas na literatura para a fase de projeto, especialmente

para a divisão da região geográfica de abrangência do serviço em zonas e das estimativas de percurso dentro de cada zona. São recomendados aqui, os trabalhos de Daganzo (1984), Newell e Daganzo (1986a, 1986b, 1986c), Novaes (1989), Novaes e Graciolli (1999), Novaes *et al.* (2000) e Ouyang (2007).

No próximo capítulo serão descritos detalhadamente os problemas operacionais do transporte rodoviário de cargas, mais particularmente a roteirização e o carregamento de veículos.

### 3 PROBLEMAS OPERACIONAIS DO TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGAS

A operacionalização do sistema de distribuição via centro de triagem requer um planejamento diário que definirá a forma mais eficaz e eficiente de atender os clientes por meio das coletas e entregas. Este planejamento compreende decisões que apresentam grau de complexidade bastante elevado, em razão do grande número de variáveis e restrições envolvidas e ao curto intervalo de tempo disponível para se chegar a uma solução. Os dois principais problemas que aparecem aqui são a *roteirização* e o *carregamento* de veículos, ambos abordados em detalhes no presente capítulo.

Os conceitos e variantes da roteirização de veículos são apresentados na seção 3.1. Já seção 3.2 aborda o carregamento de veículos, no tocante a definições e descrição de dois problemas correlatos que são o carregamento de pallets e o carregamento de contêineres. A integração entre os problemas de roteirização e carregamento é definida na seção 3.3. Por último, a seção 3.4 aborda o uso dos Sistemas de Apoio à Decisão no planejamento operacional do transporte rodoviário de cargas.

#### 3.1 ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS

O Problema da Roteirização de Veículos - PRV (da língua inglesa *Vehicle Routing Problem*) vem, desde a publicação do trabalho pioneiro por Dantzig e Ramser (1959), sendo intensamente explorado em razão de sua complexidade e grande potencial de aplicação. Assim, são numerosas as referências disponíveis na literatura para consulta e análise, como livros e artigos científicos. As referências citadas nesta seção foram escolhidas em razão da contribuição que trazem para o objetivo aqui proposto de conceituação do problema.

Current e Marsh (1993) propõem uma taxonomia onde o PRV aparece em uma estrutura de alto nível junto a outros sete problemas de redes de transporte multiobjetivo (Figura 4).

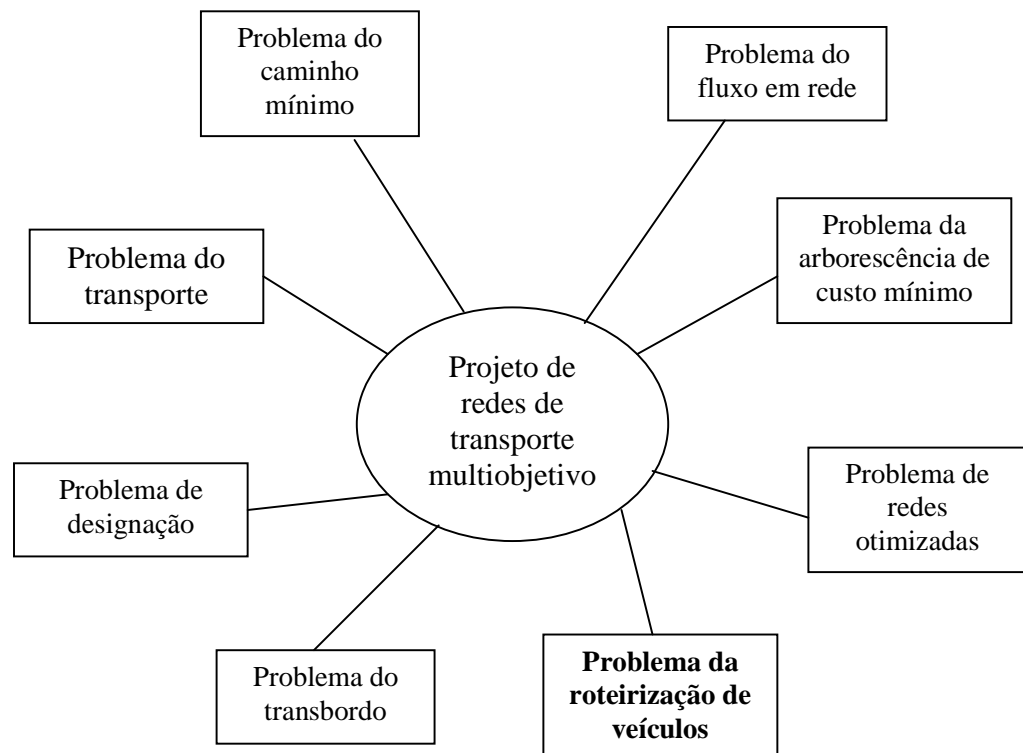


Figura 4 – Rede de transporte multiobjetivo e suas instâncias  
 Fonte: Current e Marsh (1993)

O termo *roteirização* pode ser definido, de acordo com Cunha (2000, p. 2), como “a determinação da melhor seqüência na qual, vias e/ou pontos serão percorridos por veículos, visando o atendimento das demandas por serviço e tendo como objetivo minimizar os custos operacionais, as distâncias percorridas ou os tempos dos trajetos”. Para Araújo (2003) esta definição também pode ser estendida ao caso da *roteirização de pessoas* que executam algum tipo de serviço ao longo de um sistema viário.

Conforme Ballou (2006), embora os problemas de roteirização apresentem variações, é possível reduzi-los, de um modo geral, segundo as características da origem e destino do trajeto. Há o problema de se encontrar um trajeto em uma rede de transporte onde o ponto de origem seja diferente do ponto de destino; casos em que existem múltiplos pontos de origem e de destino; e outros onde os pontos de origem e de destino são coincidentes. Este último caso se aplica ao serviço de coleta e entrega, realizado por veículos de curta distância a partir de um centro de

triagem ou distribuição.

Bodin *et al.* (1983) ressaltam que a roteirização é, primeiramente, um problema de ordem espacial, onde o objetivo consiste em minimizar a distância percorrida no trajeto. Na prática, porém, muitas vezes o problema não pode se limitar a este objetivo, tendo que englobar simultaneamente condicionantes espaciais e temporais, ou seja, ainda que se busque minimizar a distância, devem ser respeitadas restrições relacionadas ao tempo, como por exemplo, a jornada de trabalho diária das tripulações. Isto resulta em uma programação das atividades efetuadas ao longo de um roteiro, sendo o problema por vezes denominado como de *Roteirização e Programação de Veículos (Routing and Scheduling of Vehicles)*.

Com respeito ao tipo de modelagem, o PRV apresenta duas classes básicas (GOLDEN *et al.*, 1983):

- a) a *Roteirização em Nós*, onde os locais de atendimento são representados como pontos específicos em uma rede viária, caracterizados como nós ou vértices, e;
- b) a *Roteirização em Arcos*, nos quais os locais de atendimento são representados de forma contínua ao longo dos segmentos de via, caracterizados como arcos e arestas.

A combinação destas duas classes em um único problema é conhecida como *Problema de Roteirização Geral* (EISELT *et al.*, 1995a). Dado o escopo deste trabalho, que é a coleta e distribuição física de mercadorias, será abordada especificamente a classe que representa de forma adequada a sua operacionalização que é a Roteirização em Nós. Para maiores informações sobre a Roteirização em Arcos sugere-se a consulta aos trabalhos de Araújo (2003) e Eiselt *et al.* (1995a, 1995b).

O PRV pode ser definido do seguinte modo, conforme apresentado em Laporte (2009). Seja  $G = (V, A)$  um grafo orientado onde  $V = \{0, \dots, n\}$  é um conjunto de vértices e  $A = \{(i, j): i, j \in V, i \neq j\}$  o conjunto de segmentos, denominados arcos. A matriz de custos resultante

apresentará assimetria, e deste modo o PRV é classificado como *assimétrico*. O vértice 0 representa o depósito (que também pode ser um centro de triagem ou distribuição) enquanto os vértices restantes representam os clientes. Uma frota de  $m$  veículos idênticos de capacidade  $Q$  encontra-se disponível junto ao depósito. O tamanho da frota pode ser conhecido antecipadamente ou determinado como uma variável de decisão. Cada cliente possui uma demanda não-negativa  $q_i$ . Uma matriz de custo  $c_{ij}$  é definida em  $A$ . O PRV consiste em definir  $m$  rotas, cada uma com início e fim no depósito, onde cada cliente é visitado exatamente uma vez por um único veículo, a demanda total da rota não exceda o valor de  $Q$  e a extensão de percurso seja mínima ou de acordo com um valor previamente estipulado. Laporte (2009) complementa esta definição fazendo referência ao caso *simétrico* do PRV, onde  $c_{ij} = c_{ji}$  para todo  $(i, j) \in A$ . Os segmentos são definidos então como um conjunto de arestas dado por  $E = \{(i, j): i, j \in V, i < j\}$ .

A definição apresentada acima pode também ser aplicada ao Problema da Roteirização de Veículos Capacitado (*Capacitated Vehicle Routing Problem - CVRP*). Na definição do CVRP apresentada em Toth e Vigo (1998) é possível identificar tal semelhança.

Na prática, o PRV apresenta variantes, em razão da diversidade de regras de operação e restrições encontradas nas aplicações da vida real (LAPORTE, 2009). As expressões mais simples destas variantes nas quais não há limite de capacidade são descritas pelos problemas dos quais se originou o próprio PRV, assim definidas por Bodin *et al.* (1983):

- a) o *Problema do Caixeiro Viajante*: requer a determinação de um ciclo de custo mínimo que visita cada ponto exatamente uma vez; e,
- b) o *Problema dos Múltiplos Caixeiros Viajantes*: consiste em uma generalização do caso anterior onde existe a necessidade de considerar mais de um caixeiro.

As variantes do PRV de maior complexidade são descritas a seguir. Ainda que a literatura apresente estas variantes de forma individualizada, nas operações práticas podem ocorrer situações que combinem duas ou mais delas.



### 3.1.1 Problema da Roteirização de Veículos com Frotas Heterogêneas

De acordo com Choi e Tcha (2007), trata da definição de um conjunto de roteiros, cada um com início e fim no depósito, para uma frota de veículos heterogênea que serve um conjunto de clientes com demanda conhecida. Cada cliente é visitado exatamente uma vez e a demanda total de uma rota não excede a capacidade do veículo alocado a esta. O custo de uma rota corresponde à soma dos custos fixos e variáveis (proporcionais à distância percorrida) do veículo utilizado. O problema tem como objetivo minimizar o custo total da frota. Esta variante pode ainda conter alguma das três seguintes situações:

- a) os custos variáveis são dados uniformemente para todos os tipos de veículo, assumindo que o número de veículos de cada tipo é ilimitado;
- b) os custos variáveis dependem do tipo de veículo;
- c) igual ao caso anterior, porém com número limitado de veículos de cada tipo.

### 3.1.2 Problema da Roteirização de Veículos com Janelas de Tempo

A restrição associada a esta variante do PRV descreve o caso onde o atendimento feito por um veículo junto ao cliente deve ocorrer em um intervalo de tempo previamente definido (PISINGER; ROPKE, 2007). Segundo Hashimoto *et al.* (2006), a restrição de janelas de tempo pode ser do tipo *hard* quando não é admitida violação do intervalo de tempo e do tipo *soft* quando este intervalo pode ser violado, porém com a adição de uma penalidade na função objetivo.

### 3.1.3 Problema da Roteirização de Veículos com Múltiplos Depósitos

Nesta variante mais de um depósito é considerado para o atendimento das demandas. Dado este fato, a decisão a ser tomada compreende também quais clientes são servidos por quais depósitos, ou seja, a resolução do problema de particionamento dos clientes antecede a resolução do problema de roteirização e programação de veículos (HO *et al.*, 2008).

### 3.1.4 Problema da Roteirização de Veículos com Coletas e Entregas

Consiste no atendimento, em um mesmo roteiro, de uma série de coletas e de entregas. Esta variante pode ser subdividida nos três seguintes casos:

- a) o *Problema da Roteirização de Veículos com Coletas de Retorno* (também conhecido como Entregar Primeiro – Coletar Depois): modela a situação onde uma população de clientes pode ser agrupada em um conjunto de entregas e em um conjunto de coletas. Cada veículo deve primeiramente realizar as entregas e, uma vez vazio, passa a realizar as coletas de retorno ao depósito (ZACHARIADIS *et al.*, 2009);
- b) o *Problema da Roteirização de Veículos com Coletas e Entregas Mistas*: neste caso as entregas ou coletas são permitidas em qualquer ordem da seqüência de visitas (GAJPAL; ABAD, 2009);
- c) o *Problema da Roteirização de Veículos com Coletas e Entregas Simultâneas*: consiste em uma generalização do caso anterior na qual os clientes podem, de forma simultânea, demandar serviços de entrega e coleta (ZACHARIADIS *et al.*, 2009).

### **3.1.5 Problema da Roteirização de Veículos Estocástico**

Em muitas aplicações reais, um ou mais parâmetros do PRV tendem a ser randômicos ou estocásticos por natureza (TAN *et al.*, 2009). Segundo estes autores este fato pode ocorrer com clientes (serão atendidos ou não), demandas (quantidades que podem variar), tempos de viagem e tempos de parada nos clientes. Além destes, Gendreau *et al.* (1996) considera também a possibilidade de clientes e demandas serem simultaneamente estocásticos.

### **3.1.6 Problema da Roteirização de Veículos com Múltiplos Compartimentos**

Segundo Mendoza *et al.* (2009) este problema consiste na definição de roteiros que satisfaçam as demandas de um conjunto de clientes por vários produtos que, devido a restrições de incompatibilidade, devem ser carregados em compartimentos separados no veículo. Podem ocorrer também aqui casos em que um ou mais compartimentos sejam dedicados exclusivamente a certos produtos.

### **3.1.7 Problema da Roteirização de Veículos Periódico**

Nesta variante do PRV, um conjunto de clientes deve ser visitado, uma ou várias vezes, em um dado horizonte de tempo. As datas nas quais um veículo atende a um determinado cliente não é fixada de antemão, mas uma lista de possíveis datas é associada a cada cliente (ANGELELLI; SPERANZA, 2002). A diferença na periodicidade das visitas, conforme Hemmelmayr *et al.* (2009), pode ser ocasionada porque clientes com grande demanda ou com pequenos estoques requerem mais visitas do que clientes com pequena demanda ou com grandes estoques.

### **3.1.8 Problema da Roteirização de Veículos com Locais Dependentes**

Segundo Pisinger e Ropke (2007) especifica-se aqui que certos clientes somente poderão ser atendidos por um dado subconjunto de veículos. Além disso, os veículos não necessitam ter a mesma capacidade.

### **3.1.9 Problema da Roteirização de Veículos Aberto**

Consiste na definição dos roteiros para uma frota de veículos que deve atender a um conjunto de clientes com uma dada demanda em uma localização geográfica conhecida. Cada roteiro é formado por uma seqüência de clientes, com início no depósito e final em algum dos clientes (BRANDÃO, 2004). Esta variante descreve situações onde a frota de veículos é terceirizada e, ao completar o atendimento ao último cliente, não necessita retornar ao depósito de onde teve início o roteiro (ZACHARIADIS; KIRANOUDIS, 2010).

### **3.1.10 Problema da Roteirização de Veículos com Múltiplo Uso**

De acordo com Azi *et al.* (2010) esta variante do PRV ocorre quando cada veículo executa vários roteiros durante a jornada diária de trabalho devido a limites do tempo de duração de cada roteiro. Estes roteiros são definidos a partir de um conjunto de clientes onde cada um destes traz um retorno financeiro para a empresa, possui uma determinada demanda de produtos e uma janela de tempo para atendimento. Considerando um tamanho de frota fixo, o atendimento de todos os clientes pode não ser possível. Assim, a escolha dos clientes a serem atendidos deve ser feita com base no retorno que trazem para a empresa (pelo valor do frete, por exemplo) descontando-se os respectivos custos de viagem.

### 3.1.11 Problema da Roteirização de Veículos com Tempo Dependente

Nesta variante do PRV o tempo necessário para percorrer cada um dos segmentos (arestas) da rede viária depende do instante do dia em que o roteiro é iniciado a partir do vértice de origem (DONATI *et al.*, 2008). Deste modo, o modelo leva em conta a variabilidade do fluxo de tráfego que ocorre nas vias urbanas e sua influência sobre o tempo dos roteiros.

## 3.2 CARREGAMENTO DE VEÍCULOS

Além da roteirização, outro problema que aparece no planejamento operacional do transporte rodoviário de cargas é o do carregamento de veículos, ou seja, da acomodação dos produtos a serem transportados no compartimento de carga dos caminhões. Estes dois problemas apresentam um elevado grau de interdependência, uma vez que, o tratamento em separado poderá conduzir a soluções inviáveis na prática.

Em termos genéricos, o Problema do Carregamento de Veículos - PCV é representado como um *Problema de Corte e Empacotamento* (DICKHOFF, 1990) correspondendo, respectivamente, a carregamentos bidimensionais e tridimensionais. Conforme Araújo (2006, p. 4):

A denominação de Problemas de Corte e Empacotamento é aplicada a problemas em que uma ou mais unidades grandes, que podem representar um determinado material ou espaço, devem ser divididas em unidades pequenas. Em geral, o objetivo considerado refere-se à minimização do desperdício, ou seja, a quantidade do material ou espaço não utilizado das unidades grandes.

Entretanto, ainda que o carregamento de veículos seja citado na literatura, não é encontrado um trabalho que trate este problema de forma explícita no contexto dos serviços de coleta e entrega, com exceção da sua integração ao PRV que será apresentado em 3.3. No escopo da logística, a literatura aborda o problema do carregamento através de aplicações em

equipamentos de unitização de cargas, notadamente em pallets e contêineres. Além da logística, aplicações nas áreas de produção, computação e análise econômica também são modeladas como Problema de Corte e Empacotamento. Uma tipologia para os Problemas de Corte e Empacotamento é proposta por Dickhoff (1990).

Uma vez que os pallets representam um espaço bidimensional de carga e os contêineres o correspondente tridimensional (idêntico em forma ao compartimento de carga dos veículos utilizados no serviço de coleta e/ou entrega), os respectivos procedimentos para solução destes problemas podem, com alguns ajustes, ser aplicados ao carregamento de veículos. Em função disto, o Problema do Carregamento de Pallets e o Problema do Carregamento de Contêineres serão definidos a seguir.

### 3.2.1 Problema do Carregamento de Pallets

Este problema consiste em determinar um arranjo de produtos embalados em caixas sobre pallets retangulares (Figura 5) com o objetivo de otimizar o seu aproveitamento. As caixas são organizadas de modo que suas arestas fiquem posicionadas ortogonalmente às arestas do pallet (PUREZA; MORABITO, 2006). Aparecem freqüentemente neste problema restrições relacionadas à estabilidade, limite de empilhamento e distribuição de peso.

Quando as caixas que serão acomodadas sobre o pallet são idênticas, o problema se reduz ao Problema de Corte Geométrico Não-Guilhotinável Bidimensional (BHATTACHARYA *et al.*, 1998).

O Problema do Carregamento de Pallets pode ser subdividido em dois casos (HODGSON, 1982)<sup>1</sup>:

---

<sup>1</sup> HODGSON, T. A Combined Approach to the Pallet Loading Problem. **IIE Transactions**, v. 14, n. 3, p. 176-182, 1982. Apud MORABITO *et al.*(2000).

- a) o Problema do Carregamento de Pallets da Manufatura (*Manufacturer's Pallet Loading*): ocorre quando deve ser definida a melhor forma de acomodação de um conjunto de caixas de dimensões idênticas sobre pallets;
- b) o Problema do Carregamento de Pallets do Distribuidor (*Distributor's Pallet Loading*): ocorre quando deve ser definida a melhor forma de acomodação de um conjunto de caixas com dimensões variáveis sobre pallets.

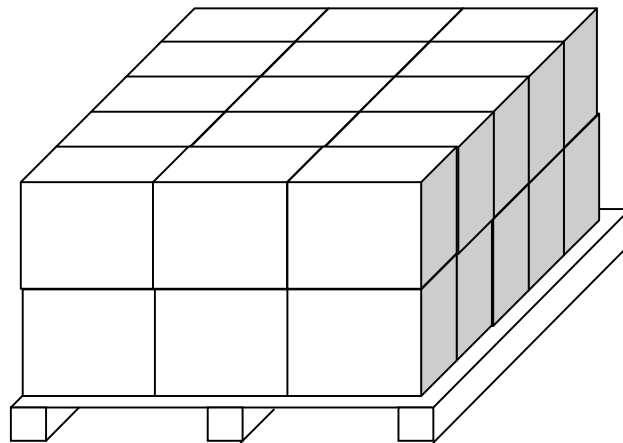


Figura 5 – Arranjo de caixas sobre um pallet  
Fonte: O autor

### 3.2.2 Problema do Carregamento de Contêineres

Neste problema um conjunto de caixas deve ser organizado em um ou mais contêineres (Figura 6) de modo que estes últimos tenham seu espaço ocupado da melhor maneira possível (BORTFELDT; GEHRING, 2001). Um contêiner terá carregamento factível, conforme Bortfeldt *et al.* (2003) se cada caixa está totalmente contida no contêiner, ocupa um único espaço e tem um de seus lados paralelo a um dos lados do contêiner.

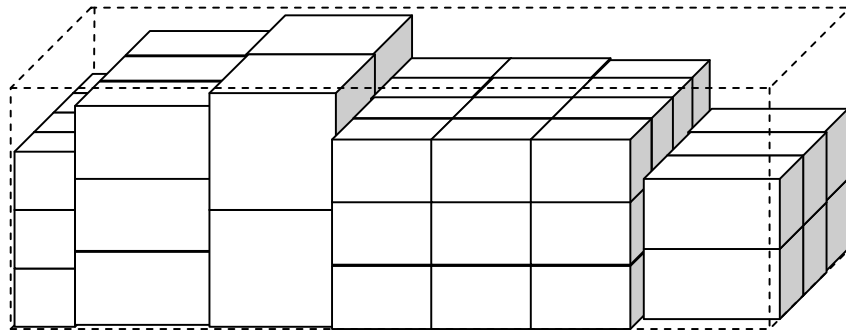


Figura 6 – Arranjo de caixas em um contêiner  
Fonte: O autor

Bortfeldt e Gehring (2001) citam as seguintes restrições que podem estar associadas a este problema:

- a) orientação: cada caixa pode ter até seis possibilidades de posicionamento;
- b) estabilidade: cada caixa deve ter sua base totalmente apoiada ou pelo menos um percentual mínimo de apoio;
- c) empilhamento: o número de caixas colocadas em uma pilha deve ser compatível com a resistência a deformações ocasionadas pelo peso incidente;
- d) peso: o número de caixas acondicionadas não deve resultar em um peso total que ultrapasse o limite de peso líquido do contêiner;
- e) centro de gravidade: as caixas devem estar organizadas de modo a preservar o centro de gravidade do contêiner e com isso possibilitar uma adequada distribuição de peso no contêiner.

Na literatura são encontrados trabalhos que abordam de forma detalhada algumas das restrições acima citadas como Bortfeldt *et al.* (2003) (restrição *b*), Bischoff (2006) (restrição *c*), Davies e Bischoff (1999) (restrição *e*).

O Problema do Carregamento de Contêineres apresenta as seguintes variantes



dependendo do objetivo a ser alcançado e das restrições associadas (PISINGER, 2002):

- a) empacotamento em faixas (*strip packing*): nesta variante do problema, o contêiner possui dimensões fixas para a largura e a altura, mas comprimento infinito. O problema consiste em empacotar todas as caixas de modo que o comprimento utilizado do contêiner seja mínimo;
- b) carregamento da mochila (*knapsack loading*): neste caso cada caixa a ser acondicionada tem um retorno financeiro associado e o problema consiste em escolher um subconjunto de caixas que caiba em um contêiner e que maximize o retorno com o carregamento;
- c) *bin-packing*: todos os contêineres disponíveis para carregamento possuem dimensões fixas e todas as caixas devem ser acondicionadas no menor número possível de contêineres;
- d) carregamento de múltiplos contêineres (*multi-container loading*): similar a variante anterior, porém utilizando contêineres de dimensões variáveis e tendo como objetivo minimizar os custos de embarque.

Conforme Lim e Zhang (2006) o Problema do Carregamento de Contêineres pode ainda ser sub-classificado, conforme a natureza dos produtos a serem unitizados, como:

- a) *problema homogêneo*: é acondicionado um único tipo de item (dimensões idênticas). Segundo Lim e Zhang (2005), este caso se reduz ao Problema do Carregamento de Pallets se as caixas são organizadas na forma de pilhas;
- b) *problema de baixa heterogeneidade*: considera uma pequena variabilidade nas dimensões dos itens que serão carregados;
- c) *problema de alta heterogeneidade*: considera uma elevada variabilidade nas

dimensões dos itens que serão carregados.

Na seção seguinte será abordada a integração entre o Problema da Roteirização de Veículos e o Problema do Carregamento de Veículos.

### 3.3 INTEGRAÇÃO ENTRE OS PROBLEMAS DA ROTEIRIZAÇÃO E CARREGAMENTO DE VEÍCULOS

A integração entre os problemas de roteirização e carregamento de veículos é recente na literatura, sendo considerada por Zachariadis *et al.* (2009a) uma nova variante do PRV. Tendo como objetivo alinhar a terminologia utilizada neste trabalho com aquela empregada na literatura para a integração entre a roteirização e o carregamento de veículos e dado o significado idêntico para o PRV e o CVRP, será considerado neste caso em particular o segundo termo.

Iori *et al.* (2007, p. 253) fazem a seguinte afirmação quanto às limitações ocasionadas pelo tratamento em separado dos problemas de roteirização e carregamento de veículos:

Na literatura do CVRP, a demanda de cada cliente é geralmente expressa através de um valor inteiro positivo que representa o peso ou volume total dos itens transportados. Neste caso, a verificação da viabilidade da solução requer simplesmente a confirmação de que a soma das demandas dos clientes alocados a cada veículo não exceda sua capacidade total de carga. Entretanto, na maioria das operações de transporte, o carregamento dos produtos nos veículos pode representar um problema difícil, especialmente, para itens de maior tamanho. Desta forma, o padrão de carregamento dos itens em cada veículo deve viabilizar uma solução para o problema de roteirização, uma vez que o carregamento exerce significativo impacto no seqüenciamento dos clientes ao longo das rotas.

Apesar do aumento significativo da dificuldade combinatorial, é óbvia a vantagem obtida com a consideração da informação a respeito da carga a ser colocada em um veículo, tendo em vista a construção de roteiros mais adequados (FUELLERER *et al.*, 2009). Deste modo, a integração entre os problemas de roteirização e carregamento desponta como uma promissora área de pesquisa, com perspectivas bastante favoráveis em termos de aplicação, especialmente no

Sistema de Distribuição Via Centro de Triagem, conforme caracterizado no capítulo 2.

A literatura apresenta duas classes de problemas integrados de roteirização e carregamento:

- a) o *2L-CVRP (Capacitated Vehicle Routing Problem with Two-dimensional Loading Constraints)* ou Problema da Roteirização de Veículos com Restrições de Carregamento em Duas Dimensões, introduzido por Iori *et al.* (2007);
- b) o *3L-CVRP (Capacitated Vehicle Routing Problem with Three-dimensional Loading Constraints)* ou Problema da Roteirização de Veículos com Restrições de Carregamento em Três Dimensões, introduzido por Gendreau *et al.* (2006).

Uma restrição que pode aparecer nas duas classes do problema e que gera uma terminologia adicional é a re-acomodação ou não da carga ao longo do roteiro (FUELLERER *et al.*, 2009; ZACHARIADIS *et al.*, 2009a). No *carregamento irrestrito* a configuração dos itens é feita de modo a se ter uma ocupação adequada do espaço de carga, sendo que re-acomodações são permitidas ao longo do roteiro de modo a possibilitar a descarga. Já no *carregamento seqüencial* a configuração da carga no veículo deve obedecer à ordem inversa de descarga, semelhante a um sistema LIFO (*last in – first out*). Este último caso ganha mais relevância quando são transportados itens de maior tamanho e peso que podem, inclusive, ser manuseados com equipamentos de mecânicos como empilhadeiras e paleteiras através da porta traseira do compartimento de carga.

O Problema da Roteirização de Veículos com Restrições de Carregamento em Duas Dimensões e o Problema da Roteirização de Veículos com Restrições de Carregamento em Três Dimensões serão descritos em maiores detalhes a seguir.

### 3.3.1 Problema da Roteirização de Veículos com Restrições de Carregamento em Duas Dimensões

No 2L-CVRP os clientes demandam a entrega de conjuntos de itens com dimensões retangulares, que serão transportados por veículos com uma dada capacidade em peso e uma superfície de carga retangular de duas dimensões. O objetivo do problema consiste em acomodar os itens nos veículos e entregá-los aos clientes, através de uma rede de transportes, com mínimo custo total (FUELLERER *et al.*, 2009).

O 2L-CVRP pode ser descrito da seguinte forma (ZACHARIADIS *et al.*, 2009a; FUELLERER *et al.*, 2009; IORI *et al.*, 2007). Seja uma rede viária representada de forma abstrata por um grafo não orientado completo dado por  $G = (V, E)$  onde  $V$  é o conjunto de  $n+1$  vértices que correspondem ao centro de triagem ou distribuição (vértice 0) e aos clientes (vértices  $1, \dots, n$ ), e  $E = \{e_{ij}: i, j \in V, i \neq j\}$  o conjunto de arestas. A cada aresta  $e_{ij} \in E$  é associado um custo  $c_{ij}$  correspondendo ao custo de percurso entre  $i$  e  $j$ . É dado também um conjunto  $K$  de veículos idênticos, caracterizados por uma capacidade de carga  $D$  dada em peso e uma superfície de carga retangular de largura  $W$  e comprimento  $L$ , acessível somente pela parte traseira. A área total da superfície de carga é dada por  $A = W.L$ . Seja  $c_r(k)$  o custo total do roteiro  $k$  ( $k = 1, \dots, K$ ) e  $S(k)$  o conjunto de clientes alocados ao roteiro  $k$ . A demanda de cada cliente  $i$  consiste de um conjunto  $IT_i$  de  $m_i$  itens retangulares de peso conhecido e dado por  $d_i$ . Cada item  $I_{ip}$  em  $IT_i$  ( $p = 1, 2, \dots, m_i$ ) tem comprimento  $l_{ip}$  e largura  $w_{ip}$ . Seja  $a_i = \sum_{p=1}^{m_i} w_{ip} l_{ip}$  a área superficial total dos itens demandados pelo cliente  $i$ . Por último, seja  $M = \sum_{i=1}^n m_i$  o número total de itens.

Assim, o objetivo do 2L-CVRP consiste em determinar um conjunto de rotas de custo mínimo que satisfaça as seguintes restrições:

- a) o tamanho do conjunto de roteiros gerados não deve exceder o número de veículos disponíveis (no máximo um roteiro por veículo);

- b) cada roteiro tem início e fim no centro de triagem ou distribuição;
- c) a demanda de cada cliente é totalmente atendida;
- d) cada cliente é visitado exatamente uma vez;
- e) o peso total de todos os itens que serão entregues ao conjunto de clientes de um roteiro não deve exceder a capacidade de carga  $D$  do veículo;
- f) não poderá ocorrer sobreposição de itens no interior do compartimento de carga de um veículo;
- g) todos os itens de um dado cliente devem ser carregados no mesmo veículo;
- h) os itens, quando carregados, devem ter uma orientação fixa (isto é, não podem ser rotacionados) e devem ser acomodados com seus lados paralelos aos lados da superfície da carroceria;
- i) não são permitidos movimentos da carga ao longo do roteiro (carregamento seqüencial).

### **3.3.2 Problema da Roteirização de Veículos com Restrições de Carregamento em Três Dimensões**

Conforme Gendreau *et al.* (2006), no 3L-CVRP um embarcador deve definir os roteiros a serem percorridos pelos veículos de sua frota, carregando uma série de produtos (com tamanhos e pesos conhecidos) para um conjunto de clientes, tendo como objetivo final minimizar os custos de viagem. Todos os produtos a serem enviados a um cliente devem ser acomodados no mesmo veículo, sendo que todos os veículos da frota possuem capacidade volumétrica idêntica. A

solução do 3L-CVRP é dada pela determinação, para cada veículo, de um conjunto de produtos a ser carregado cujo peso total não exceda a capacidade total e que seja acomodado de forma adequada no espaço disponível do compartimento de carga.

Além disso, restrições adicionais são frequentemente encontradas nas aplicações práticas do 3L-CVRP (GENDREAU *et al.*, 2006). Se alguns dos produtos apresentam fragilidade, pode ser necessário não colocar sobre estes outros produtos (que podem ser de peso e resistência maior). Outra restrição ocorre quando caixas são empilhadas e deve-se garantir que a superfície de suporte seja larga o suficiente para garantir a estabilidade da carga.

O 3L-CVRP pode ser descrito da seguinte forma, tendo como base a notação apresentada por Gendreau *et al.* (2006). Seja  $V = \{0, 1, \dots, n\}$  um conjunto formado por  $n + 1$  vértices que correspondem a um depósito (vértice 0) de onde os veículos são despachados, uma série de clientes (vértices de 1, ...,  $n$ ) onde as entregas devem ser feitas e  $E$  um conjunto de arestas  $e_{ij}$  que representam as ligações entre os vértices. Com estes elementos é definido um grafo não orientado dado por  $G = (V, E)$ . Um custo  $c_{ij}$  é associado a cada aresta  $e_{ij}$  em  $G$  representando o comprimento de cada aresta que liga dois vértices. Seja  $K$  o número de veículos idênticos que se encontram disponíveis junto ao depósito de onde partirão as entregas aos clientes. Cada veículo possui uma capacidade  $D$  dada em peso e uma capacidade volumétrica do compartimento de carga dada por  $S$ . O compartimento de carga é definido pela largura  $W$ , altura  $H$  e comprimento  $L$ . Assim, o espaço de carga disponível é representado por  $S = W.H.L$ . Em cada cliente  $i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) deve ser entregue um conjunto  $IT_i$  de  $m_i$  itens tri-dimensionais, sendo que cada item  $I_{ip}$  ( $p = 1, \dots, m_i$ ) possui largura  $w_{ip}$ , altura  $h_{ip}$  e comprimento  $l_{ip}$ . O peso total dos itens de um cliente é  $d_i$ . O espaço ocupado no compartimento de carga por um cliente  $i$  é dado por

$$s_i = \sum_{p=1}^{m_i} w_{ip} h_{ip} l_{ip} .$$

A factibilidade do carregamento em cada veículo é obtida satisfazendo as seguintes restrições (GENDREAU *et al.*, 2006; FUELLERER *et al.*, 2010):

- a) quando carregados, os itens devem ser posicionados ortogonalmente aos eixos que representam as dimensões  $W$ ,  $H$  e  $L$  do compartimento de carga segundo uma

orientação fixa em relação à altura (em razão das regras de empilhamento), mas podem ser rotacionados em  $90^\circ$  no plano  $w-l$ .

- b) cada item  $I_{ip}$  pode ser classificado como frágil ou não-frágil, sendo então atribuído um índice de fragilidade  $f_{ip}$  ( $i = 1, \dots, n; p = 1, \dots, m_i$ ), igual a 1 se  $I_{ip}$  é considerado frágil ou 0 caso contrário. Nenhum item não-frágil pode ser colocado sobre um item frágil, mas é permitido que itens frágeis possam ser empilhados.
- c) quando um item  $I_{ip}$  é colocado sobre outros itens, é necessário avaliar a área de suporte correspondente. O posicionamento é viável somente se a área de suporte não é menor do que um dado percentual limite  $a$  da base do item, isto é,  $A' \geq aw_{ip}l_{ip}$ , onde  $0 \leq a \leq 1$  é um dado parâmetro que representa a fração mínima de área de  $I_{ip}$  que deve estar apoiada. Esta restrição é sempre satisfeita quando um item é colocado diretamente sobre o piso do compartimento de carga.
- d) no instante da descarga em um cliente  $i$ , todos os respectivos itens  $I_{ip}$  devem estar acessíveis, podendo ser movimentados livremente sem que seja necessário manusear itens de outros clientes. Esta restrição de seqüência LIFO (*last in first out*) é também denominada de carregamento sequencial.

O 3L-CVRP consiste em determinar um conjunto de  $k$  roteiros (um por veículo) com início e fim no depósito onde cada cliente é atendido por exatamente um veículo, a carga alocada a um veículo não excede a sua capacidade em peso e volume, para cada veículo existe uma configuração de carregamento ortogonal tri-dimensional factível de todos os itens demandados por todos os clientes, satisfazendo orientação vertical fixa, fragilidade, área mínima de suporte e seqüência LIFO e o custo de trajeto ao longo do roteiro é mínimo.

Quando itens são transportados sobre bases retangulares (como os pallets), e devido à fragilidade e à forma, não podem ser empilhados, o 3L-CVRP se reduz ao 2L-CVRP (IORI *et al.*, 2007). Se as restrições de fragilidade, área mínima de suporte e seqüência LIFO são relaxadas, o 3L-CVRP se reduz ao *Three-Dimensional Bin-Packing Problem* (GENDREAU *et al.*, 2006).

### 3.4 SISTEMAS DE APOIO À DECISÃO PARA OS PROBLEMAS OPERACIONAIS DO TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGAS

A evolução e a disseminação da Tecnologia de Informação tem causado um profundo impacto sobre o ambiente produtivo, tornando-se segundo Turban *et al.* (2004), a principal facilitadora das atividades empresariais na atualidade e a grande catalisadora de mudanças fundamentais na estrutura, organização e administração das empresas, devido a uma série de recursos. Além disso, deve-se destacar que o aumento da complexidade das atividades e decisões das empresas gera a necessidade de Tecnologias de Informação mais robustas e confiáveis.

Atualmente, a Tecnologia de Informação, quando representada por sistemas computacionais, oferece aplicativos para as mais variadas áreas de uma empresa. Assim, Turban *et al.* (2004) propõem a seguinte classificação para tais sistemas conforme sua utilização:

- a) sistema de processamento de transação: realiza o suporte a atividades repetitivas vitais;
- b) sistema de informação gerencial: realiza suporte as atividades funcionais e aos gestores;
- c) sistema de administração do conhecimento: realiza o suporte a todos os tipos de necessidades de informações corporativas;
- d) sistema de automação de escritório: dá suporte ao pessoal administrativo;
- e) sistemas de apoio à decisão: realiza o suporte à tomada de decisões pelos gestores;
- f) sistema de informação empresarial: dá suporte a todos os administradores de uma empresa;



- g) sistema de apoio à grupos: dá suporte a pessoal trabalhando em grupos;
- h) sistema de suporte inteligente: dá suporte aos profissionais do conhecimento.

O setor operacional das empresas de transporte rodoviário de cargas representa uma importante área de aplicação para os sistemas computacionais, em função do volume de informações relacionadas com cargas de clientes, faturas, comunicação com veículos, entre outras. Além deste aspecto transacional, aparece também neste setor a necessidade por sistemas que dêem suporte as decisões que aí são tomadas, quase sempre revestidas de grande complexidade e limitadas no tempo para chegar as respostas demandadas, como é o caso da roteirização e carregamento de veículos.

Um Sistema de Apoio à Decisão, é composto, de acordo com Sprague e Carlson (1982), pelos três seguintes subsistemas:

- a) o Subsistema de Diálogo que corresponde à interface entre sistema e usuário;
- b) o Subsistema de Dados que compreende o banco de dados manipulado pelo sistema;
- c) o Subsistema de Modelos de onde são gerados os cenários para decisão.

Um Sistema de Apoio à Decisão destinado ao planejamento operacional do transporte rodoviário de cargas deve ter seus subsistemas configurados para atender a esta necessidade. Assim, o subsistema de diálogo deve possibilitar, além de uma interface amigável, a exploração e análise de resultados alternativos quando o usuário determinar, por exemplo, uma troca na seqüência em que pontos de entrega são visitados, a inserção ou retirada de veículos, o fracionamento ou a consolidação de itens. Já o subsistema de dados deve conter cadastros relativos a clientes, a veículos e características físicas dos itens transportados. Por último, o subsistema de modelos executa a resolução do problema conforme os parâmetros informados e restrições que devem ser obedecidas. Deve-se ressaltar aqui a importância, para o bom

desempenho do sistema, de se adotar modelos robustos, capazes de lidar com situações diversas conforme alterações que são feitas nos parâmetros e nas restrições. Modelos com esta característica potencializam a interação com o usuário e o manuseio dos dados disponíveis.

Ênfase vem sendo dada na combinação dos Sistemas de Apoio à Decisão com ferramentas de interface gráfica e também com Sistemas de Informações Geográficas, especialmente no Problema da Roteirização de Veículos (KEENAN, 1998; TARANTILIS; KIRANOUDIS, 2002), possibilitando uma representação adequada de rotas no sistema viário existente, além de fornecer bases de dados mais realistas e de fácil manutenção. Não menos importante é o uso da interface gráfica na configuração e visualização dos carregamentos.

No que diz respeito a pacotes comerciais de Sistemas de Apoio à Decisão para o Problema da Roteirização de Veículos periodicamente são publicadas pesquisas, como a de Partyka e Hall (2010) que descrevem as funcionalidades oferecidas nos sistemas e as tendências para o futuro próximo. Estas pesquisas mostram um mercado bastante diversificado que tem procurado agregar aos modelos a realidade operacional enfrentada pelas empresas. Em alguns casos é citada a existência de opção para planejamento os carregamentos nos veículos.

O esforço, iniciado recentemente, de integrar em um único modelo os problemas de roteirização e carregamento resultará na oferta de sistemas mais robustos para apoio à decisão no planejamento operacional do transporte rodoviário de cargas.

No próximo capítulo serão tratadas as características matemáticas dos problemas da roteirização e do carregamento de veículos.

## **4 CARACTERÍSTICAS MATEMÁTICAS DOS PROBLEMAS DA ROTEIRIZAÇÃO E DO CARREGAMENTO DE VEÍCULOS**

Historicamente, o ser humano tem procurado descrever, através de modelos, fenômenos que o cercam nas mais variadas áreas. Isto ocorre com fenômenos de ordem natural, social e econômica. Neste último, em particular, observam-se relações com a área produtiva, seja esta direcionada a bens ou a serviços.

O esforço de modelagem conduz um tomador de decisão a representar de forma abstrata uma realidade (sistema) a ser enfrentada e que requer a definição de um melhor curso de ação. Considerando um objetivo a ser atingido em seu benefício, as relações entre as variáveis decisórias e as restrições que devem ser respeitadas, o tomador de decisão pode, através do estabelecimento de relações matemáticas, definir um modelo que representa o sistema a ser analisado. Conseqüentemente, uma alternativa adequada de ação pode ser escolhida sem a materialização prévia de tal sistema, o que resulta na economia de recursos. Mesmo um sistema que já se encontre em operação pode, através de sua modelagem e análise, ser aprimorado de modo a resultar em maiores benefícios.

Este capítulo apresenta as características matemáticas a partir das quais podem ser modelados os problemas de roteirização e carregamento de veículos. Na seção 4.1 é feita a caracterização destes dois problemas como modelos de otimização. As definições de programação matemática, de espaço de soluções e de otimização combinatória são apresentadas nas seções 4.2, 4.3 e 4.4 respectivamente. Por último, a seção 4.5 aborda a complexidade dos problemas combinatoriais.

#### 4.1 DEFINIÇÃO DOS PROBLEMAS DA ROTEIRIZAÇÃO E DO CARREGAMENTO DE VEÍCULOS COMO MODELOS DE OTIMIZAÇÃO

Segundo Laguna (2003), a teoria da otimização está relacionada ao estudo quantitativo do ótimo e dos respectivos métodos que podem ser empregados para encontrá-lo. O mesmo autor acrescenta ainda que o termo *otimizar* significa atingir o ótimo e que otimização nada mais é do que o ato de otimizar. Para Martí (2003) otimizar significa pouco mais que melhorar. Seu conceito é complementado fazendo menção ao contexto científico, onde a otimização está relacionada ao processo de encontrar a melhor solução possível para um determinado problema.

A ferramenta empregada na resolução dos problemas de otimização é denominada *Pesquisa Operacional*. Segundo Arenales *et al.* (2007) a Pesquisa Operacional trata de problemas de decisão e faz uso de modelos matemáticos que procuram representar (e em certo sentido, imitar) o problema real. Lachtermacher (2004) cita, entre os tipos de problemas em que a Pesquisa Operacional pode ser utilizada para ajudar o processo de decisão, o problema de otimização de recursos (no qual pode ser enquadrado o Problema de Corte e Empacotamento) e o problema de roteirização.

A Pesquisa Operacional tem sua origem na Segunda Guerra Mundial, a partir de necessidades relacionadas ao processo de tomada de decisão sobre a alocação de recursos. Terminada a guerra, a Pesquisa Operacional ganhou um vasto campo de aplicação no planejamento dos sistemas produtivos (nos setores industriais e de serviços), bem como na área de pesquisa no âmbito acadêmico. Um relato histórico da Pesquisa Operacional é apresentado em Loesch e Hein (1999). Como área do conhecimento de caráter multidisciplinar (ANDRADE, 1998), a Pesquisa Operacional encontra aplicações junto às ciências administrativas, engenharia, contabilidade, economia e computação.

De acordo com Arenales *et al.* (2007), um estudo de Pesquisa Operacional que visa resolver determinado problema envolve as cinco seguintes fases: *definição do problema, construção do modelo, solução do modelo, validação do modelo e implementação da solução*.

Na fase de definição do problema são identificadas as variáveis que compõem o sistema em estudo e a forma como elas interagem entre si. As variáveis são usadas para representar as decisões a serem tomadas e podem ser classificadas conforme os valores que assumem em (GOLDBARG; LUNA, 2000):

- a) reais ou lineares;
- b) inteiras ou discretas;
- c) lógicas (0 ou 1);
- d) diferentes conjuntos de valores inteiros (código de barras, por exemplo).

A seguir deve ser definida uma medida de efetividade do sistema em estudo e que possa ser expressa através das variáveis de decisão. Esta medida é comumente chamada de *função-objetivo*.

Além das variáveis de decisão e da função-objetivo, é necessário identificar as limitações as quais o sistema em estudo pode estar submetido. Tais limitações, denominadas *restrições*, podem, por exemplo, ser de ordem tecnológica, de mercado ou financeira.

Uma vez determinadas as variáveis de decisão, função-objetivo e restrições, poderá ser feita a *construção do modelo do sistema*. Nos problemas de otimização clássicos o modelo assume a seguinte forma (LAGUNA, 2003):

$$\text{Maximizar ou minimizar } f(x) \quad (1)$$

$$\text{Sujeito a } g(x) \sim b \quad (2)$$

Nesta formulação,  $f(x)$  é a medida quantitativa de efetividade (ou a função-objetivo) e  $x$  corresponde às variáveis de decisão. O conjunto de restrições é também formulado em termos das variáveis de decisão e representado como limites sobre a função  $g(x)$ . O símbolo  $\sim$  indica que as

equações (ou inequações) que representam as restrições podem ser dadas por  $=$ ,  $\leq$  ou  $\geq$ .

No caso do PRV, a construção do modelo pode ser expressa através de uma formulação proposta por Fisher e Jaikumar (1981) apresentada abaixo:

$$\text{Min } z = \sum_{i,j} \left( c_{ij} \sum_k x_{ijk} \right) \quad (3)$$

sujeito a:

$$\sum_k y_{ik} = 1 \quad i = 2, \dots, n \quad (4)$$

$$\sum_k y_{ik} = m \quad i = 1 \quad (5)$$

$$\sum_i q_i y_{ik} \leq Q_k \quad k = 1, \dots, m \quad (6)$$

$$\sum_j x_{ijk} = \sum_j x_{jik} = y_{ik} \quad i = 1, \dots, n \quad k = 1, \dots, m \quad (7)$$

$$\sum_{i,j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subseteq \{2, \dots, n\}, k = 1, \dots, m \quad (8)$$

$$y_{ik} \in \{0, 1\} \quad i = 1, \dots, n \quad k = 1, \dots, m \quad (9)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad i, j = 1, \dots, n \quad k = 1, \dots, m \quad (10)$$

onde:

$x_{ijk}$  é uma variável binária que assume valor 1 quando o veículo  $k$  visita o cliente  $j$  imediatamente após o cliente  $i$ , 0 caso contrário;

$y_{ik}$  é uma variável binária que assume valor 1 se o cliente  $i$  é visitado pelo veículo  $k$ , 0 caso contrário;

$q_i$  é a demanda do cliente  $i$ ;

$Q_k$  é a capacidade do veículo  $k$ ;

$c_{ij}$  é o custo de percorrer o trecho que vai do cliente  $i$  ao  $j$ .

No modelo acima, a restrição 4 assegura que um veículo não visite mais de uma vez um mesmo cliente; a restrição 5 garante que todos os roteiros tenham início e fim no depósito; a

restrição 6 obriga que as capacidades dos veículos não sejam ultrapassadas; a restrição 7 garante que os veículos não param suas rotas em um cliente; a restrição 8 evita a formação de subciclos, sendo que nesta restrição o conjunto  $S$  contém as restrições de quebra de subciclos; e as restrições 9 e 10 garantem a integralidade da solução. Formulações com elementos mais específicos para o PRV são apresentadas por Bodin *et al.* (1983).

No caso do PCV, uma formulação geral pode ser dada considerando um conjunto  $S = \{1, 2, \dots, m\}$  de espaços a serem preenchidos e um conjunto  $H = \{1, 2, \dots, n\}$  de produtos a serem transportados. Cada produto contribui para o retorno financeiro segundo um valor  $c_j$ . É definida uma matriz  $A$  composta por elementos  $a_{ij}$  de modo que:

$$a_{ij} \begin{cases} 1 & \text{se o produto de índice } j \text{ é colocado no } i\text{-ésimo espaço} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Seja a variável:

$$x_j \begin{cases} 1 & \text{se o } j\text{-ésimo produto faz parte da solução encontrada} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

O modelo matemático correspondente é dado por (GOLDBARG; LUNA, 2000):

$$\text{Max } z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (11)$$

sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq 1 \quad i = 1, \dots, m \quad (12)$$

$$x_j \in \{0,1\}, \forall j \quad (13)$$

No modelo acima apresentado, a restrição 12 garante que cada espaço será preenchido

por no máximo um produto e, a restrição 13, a integralidade da solução. Este modelo também pode ser escrito na forma de um problema de minimização, no qual o coeficiente  $c_j$  representa o custo de manuseio unitário dos itens.

Soak *et al.* (2008) apresentam a seguinte formulação para o Problema do Carregamento de Múltiplos Contêineres que pode ser também estendida ao carregamento de uma frota de veículos:

$$\text{Max } z = \sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^n v_j x_{ij} \quad (14)$$

sujeito a:

$$\sum_{i=1}^C x_{i,j} \leq 1, j = 1, \dots, n \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^n w_j x_{i,j} \leq c_i, i = 1, \dots, C \quad (16)$$

$$x_{i,j} \in \{0, 1\} \quad (17)$$

$$w_j > 0, v_j > 0, c_j > 0 \quad (18)$$

onde:

$x_{ij}$  é uma variável binária que indica a alocação ou não de dado item a um contêiner;

$w_j$  é o peso de um item;

$v_j$  é o valor de um item;

$c_i$  é o peso máximo dos itens acondicionados no contêiner  $i$ .

Se um item  $j$  é acondicionado no contêiner  $i$ ,  $x_{ij}$  recebe um valor igual a 1, caso contrário 0. A restrição 15 assegura que cada item é acondicionado em um único contêiner e a restrição 16 garante que o peso total dos itens não ultrapasse a capacidade total em peso de um contêiner. A restrição 17 estabelece os valores finais que serão assumidos pelas variáveis e a restrição 18 garante a não-negatividade da solução.

Para a solução de um modelo de otimização são empregados métodos adequados a



situação sob consideração. Na validação do modelo é verificado se este representa de forma apropriada o problema, ou seja, se o modelo prediz adequadamente o comportamento do sistema. Por último, a implementação da solução traduz os resultados do modelo em decisões (ARENALES *et al.*, 2007).

#### 4.2 PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA

O processo de otimização é feito através da descrição matemática do sistema em análise, denominada como programação matemática. Segundo Goldberg e Luna (2000) o termo programação é entendido aqui no sentido de planejamento, ou seja, expressando atividades genéricas de programação de atividades. A programação matemática compreende as seguintes classes:

- a) *programação linear*: ocorre quando as variáveis são contínuas e apresentam comportamento linear, tanto em relação às restrições como à função objetivo. Problemas pertencentes a esta classe são eficientemente resolvidos através do *método simplex* (ARENALES *et al.*, 2007; GOLDBARG e LUNA, 2000; LOESCH e HEIN, 1999; HILLIER e LIEBERMAN, 1994);
- b) *programação não-linear*: ocorre quando um problema apresenta qualquer tipo de não-linearidade, seja na função-objetivo ou em qualquer uma de suas restrições. Ao contrário da programação linear, não existe um método de resolução que sobressaia, como é o caso do simplex (LOESCH e HEIN, 1999);
- c) *programação inteira e mista*: ocorre se qualquer variável do problema em estudo não puder assumir valores contínuos, ficando condicionada a assumir valores discretos. Problemas desta classe são, a princípio, estruturados da mesma forma daqueles de programação linear. Se todas as variáveis devem ser inteiras, o problema será denominado como de *programação inteira*; caso as restrições de

integralidade sejam impostas apenas a algumas variáveis do modelo, mas não a todas, tem-se um problema de *programação mista*. A condição que obriga a obtenção de valores inteiros para as variáveis de decisão normalmente resulta em maior complexidade computacional quando comparada as duas classes anteriormente apresentadas (LOESCH e HEIN, 1999). Casos onde são admitidos somente valores inteiros para as variáveis também são chamados de *Problemas de Otimização Combinatória*;

- d) *programação dinâmica*: ocorre quando o processo de decisão envolve etapas sucessivas de decisão correlacionadas, isto é, quando a decisão de uma etapa influencia a etapa posterior. Assim, o ótimo deve levar em consideração a análise da rede decisória (ARENALES *et al.*, 2007; LOESCH e HEIN, 1999).

#### 4.3 ESPAÇO DE SOLUÇÕES

A busca pela solução de um problema de otimização pode ser feita no âmbito de um espaço *global* ou *local*. No primeiro caso, a busca ocorre dentro do conjunto de todas as soluções possíveis. No segundo, a busca pela melhor solução se dá num conjunto limitado de soluções admissíveis.

Em algumas aplicações práticas existe a possibilidade de não se chegar a uma solução global, ou mesmo de não existir uma maneira de verificar se a solução encontrada é de fato global. Assim sendo, é definida uma solução local.

Encontrar uma boa solução e de forma rápida, em certos casos, é mais desejável do que buscar a melhor solução (global). Outros casos podem demandar somente que se encontre alguma solução viável. Em suma, o tipo de busca requerida para um determinado problema depende de sua estrutura, de sua formulação. Assim, a estrutura do problema definida por suas variáveis de decisão, função-objetivo e restrições determinam qual a melhor abordagem a ser utilizada na

resolução do problema.

#### 4.4 OTIMIZAÇÃO COMBINATÓRIA

Como referido anteriormente, existem situações em que as variáveis de decisão relacionadas a um determinado problema em estudo são limitadas a valores inteiros. Isto se deve ao fato de representar recursos indivisíveis, ou seja, que não podem assumir valores fracionários, como no caso de veículos, equipamentos, máquinas e pessoas. Fica caracterizada, assim, uma classe dos modelos de programação matemática: a dos *Problemas de Otimização Combinatória*.

Um Problema de Otimização Combinatória, dado genericamente por  $P = (S, f)$ , é composto pelos seguintes elementos (PAPADIMITRIOU; STEIGLITZ, 1982)<sup>2</sup>:

- a) um conjunto de variáveis  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ ;
- b) domínio das variáveis  $D_1, \dots, D_n$ ;
- c) restrições entre as variáveis;
- d) uma função objetivo  $f$  a ser minimizada (ou maximizada, dada por  $-f$ ), onde  $f: D_1 \times \dots \times D_n \rightarrow \mathfrak{R}^+$ .

O conjunto de todas as soluções admissíveis é dado por  $S = \{s = \{(x_1, v_1), \dots, (x_n, v_n)\} \mid v_i \in D_i, s \text{ satisfaz todas as restrições}\}$ . Este conjunto corresponde ao *espaço de busca* (ou de *solução*), uma vez que cada elemento do conjunto pode ser visto como uma solução candidata. A resolução de um Problema de Otimização Combinatória consiste assim, em determinar uma solução  $s^* \in S$  com valor mínimo para a função-objetivo com  $f(s^*) \leq f(s) \forall s \in S$  (ou máximo

---

<sup>2</sup> PAPADIMITRIOU, C.; STEIGLITZ, K. **Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity**. New York: Dover Publications, 1982. Apud BLUM; ROLI, 2003.

sendo que  $f(s^*) \geq f(s)$ .  $s^*$  pode ser chamada de solução ótima global de  $(S, f)$  e o conjunto  $S^* \subseteq S$  é chamado conjunto de soluções ótimas globais.

Freqüentemente, o número de elementos no conjunto de soluções é muito elevado, tornando impraticável a avaliação de todas as soluções para determinar um valor ótimo (MARTÍ, 2003).

Escrever um algoritmo para a resolução de um Problema de Otimização Combinatória referente a um único conjunto  $S$  e aplicável a uma única função-objetivo  $f$  pode ser de pouca utilidade. Na prática, cada caso é estudado em sua forma geral, na qual  $S$  e  $f$  são os dados. Um dado  $(S, f)$  é então chamado de uma *instância* do Problema de Otimização Combinatória (PRINS, 1994).

#### 4.5 COMPLEXIDADE DOS PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO COMBINATÓRIA

O processo de resolução de qualquer Problema de Otimização Combinatória consiste basicamente na aplicação de um algoritmo de solução. Segundo Ziviani (1993), um *algoritmo* pode ser definido como uma seqüência de ações executáveis para a obtenção de uma solução para um determinado tipo de problema.

Quando se pensa em avaliar e comparar algoritmos, a idéia intuitiva que surge é de programá-los e medir o tempo de execução. As medidas de tempo obtidas dessa forma são bastante inadequadas e os resultados jamais devem ser generalizados. As principais objeções são (ZIVIANI, 1993):

- a) os resultados dependem do compilador que pode favorecer algumas construções em detrimento de outras;
- b) os resultados dependem do *hardware*;

- c) quando é grande a quantidade de memória utilizada, as medidas de tempo podem depender deste aspecto.

Na prática, é preferível contar o *número de operações características* (ou seja, aquelas mais significativas) do algoritmo a se avaliar. Tal número não depende do *hardware*, nem da linguagem e pode ser obtido manualmente. Esta avaliação é chamada também de *complexidade do algoritmo*.

A complexidade de um algoritmo  $A$  pode ser dada por uma função  $C_A(N)$ , a qual fornece o número de instruções características executadas por  $A$ , no pior caso, por um dado de tamanho  $N$ . Tem-se assim, uma estimativa do tempo de cálculo para um determinado problema com tamanho de dado conhecido, o que é extremamente importante quando são consideradas situações onde as respostas devem ser obtidas dentro de um intervalo de tempo disponível.

Segundo Prins (1994) os Problemas de Otimização Combinatória podem ser divididos, de acordo com a respectiva complexidade, em duas grandes categorias: aqueles resolvidos de maneira exata por algoritmos eficazes (rápidos); e aqueles onde a resolução exata pode demandar um tempo de processamento computacional que cresce exponencialmente à medida que cresce o tamanho do problema. Deste modo, os respectivos algoritmos podem ser definidos, respectivamente, como *polinomiais* (com complexidade da ordem de um polinômio) e *exponenciais*. A complexidade polinomial pode ser dada por funções descritas, por exemplo, como  $\log n$ ,  $n^{0.5}$ ,  $n \log n$  e  $n^2$ . Já uma complexidade exponencial pode ser dada por funções do tipo  $e^n$ ,  $2^n$ ,  $n^{\log n}$  e  $n!$ .

Nota-se segundo o que foi exposto acima, que certos problemas combinatoriais são mais fáceis de serem resolvidos do que outros. A *teoria da complexidade* fornece um critério através do qual os problemas computacionais podem ser classificados como de fácil ou de difícil solução. Essa classificação é feita segundo o tempo de processamento dos algoritmos, sendo utilizada como medida analítica, uma função matemática que expressa o tempo necessário para a resolução de uma instância do algoritmo utilizado. Essa função é chamada complexidade de tempo, e classifica os problemas em (GOLDBARG; LUNA, 2000):

- a) *classe P* (fáceis): com complexidade de tempo polinomial;
- b) *classe NP* (difíceis): com complexidade de tempo exponencial ou não-polinomial;
- c) *classe NP-hard* ou *NP-completos* (muito difíceis): não existem algoritmos que os resolvam de forma exata em tempos computacionais razoáveis.

A resolução de problemas das classes *P* e *NP* pode ser obtida com o emprego de métodos clássicos fornecidos pela Pesquisa Operacional. Tais métodos são exatos e sempre atingem o ótimo global.

Já no caso dos problemas da classe *NP-hard* a estratégia de resolução deverá ser concentrada em métodos que forneçam boas soluções em tempos de processamento computacional aceitáveis. Maiores detalhes sobre a complexidade dos Problemas de Otimização Combinatória são apresentados por Goldbarg e Luna (2000), Prins (1994) e Ziviani (1993).

No que se refere à complexidade, tanto o Problema da Roteirização de Veículos (LENSTRA; RINNOY KAN, 1981)<sup>3</sup>; como o Problema do Carregamento de Veículos (KARP, 1975)<sup>4</sup>, uma vez considerada sua equivalência com o Problema de Corte e Empacotamento, são classificados como problemas de classe *NP-hard*. Por decorrência, a integração destes dois problemas adquire a mesma classificação em termos de complexidade (GENDREAU *et al.*, 2006; IORI *et al.*, 2007; ZACHARIADIS *et al.*, 2009).

No capítulo a seguir serão apresentados os métodos que podem ser empregados na resolução dos problemas de roteirização e carregamento de veículos.

---

<sup>3</sup> LENSTRA, J. K.; RINNOY KAN, A. H. Complexity of Vehicle Routing and Scheduling Problems. **Networks**, v. 11, n. 2, p. 221-227, 1981. Apud BODIN *et al.* (1983).

<sup>4</sup> KARP, R. M. On the Computational Complexity of Combinatorial Problems. **Networks**, v. 5, p. 45-68, 1975. Apud GOLDBARG; LUNA (2000).

## 5 MÉTODOS PARA RESOLUÇÃO DOS PROBLEMAS DA ROTEIRIZAÇÃO E DO CARREGAMENTO DE VEÍCULOS

O processo de resolução para os problemas combinatoriais, nos quais se enquadram a roteirização e o carregamento de veículos tem, desde a introdução da Pesquisa Operacional, despertado grande interesse junto à comunidade acadêmica. Este fato pode ser constatado pela grande quantidade de trabalhos publicados nos quais são apresentados desenvolvimentos e aplicações.

O presente capítulo descreve os métodos que podem ser utilizados na resolução dos problemas da roteirização e do carregamento de veículos, que são os métodos exatos (seção 5.1), os métodos aproximativos (seção 5.2), a otimização interativa (seção 5.3), a geração de colunas (seção 5.4), a abordagem híbrida (seção 5.5) e a programação por restrições (seção 5.6).

### 5.1 MÉTODOS EXATOS

Tais métodos possuem como característica básica a possibilidade de se obter, para cada instância de tamanho finito, uma solução ótima (a melhor de todas expressa por um único valor). Segundo Hoffman (2000, p. 344):

[...] a resolução exata de um Problema de Otimização Combinatória reveste-se de dificuldade considerável. Isto se deve ao fato de que, diferentemente da programação linear, a região de soluções admissíveis não é um conjunto convexo. Com isso, é necessário buscar uma relação de pontos admissíveis a fim de ser obtida a solução exata. Na programação linear, devido à convexidade do problema, o processo resolutivo tem como grande vantagem o fato de qualquer solução local ser um ótimo global. Na otimização combinatória, os problemas podem ter vários ótimos locais e a busca de um ótimo global requer a comprovação de que uma solução em particular é melhor do que as demais através de argumentos diferentes das abordagens derivativas baseadas em cálculos que são utilizadas na programação linear.

A seguir são brevemente definidas as principais abordagens que compõem os métodos

exatos de resolução dos Problemas de Otimização Combinatória (que também podem ser designados no texto como problemas de programação inteira), bem como a citação de trabalhos que relatam a aplicação de tais métodos na resolução do Problema da Roteirização de Veículos e do Problema do Carregamento de Veículos.

### 5.1.1 Abordagens Enumerativas

A abordagem de resolução mais simples para um Problema de Otimização Combinatória consiste em enumerar todas as possibilidades de solução, escolhendo-se a de melhor valor para o problema em análise (HOFFMAN, 2000). A técnica desta natureza mais conhecida é denominada *branch-and-bound* (*ramificar e limitar*).

Segundo Ralphs (2003) o *branch-and-bound* é uma técnica que utiliza a estratégia de *dividir para conquistar* a fim de particionar o espaço de solução em subproblemas, resolvendo-os de forma recursiva. Na fase de limitação, a restrição de integralidade é relaxada, admitindo soluções infactíveis. A resolução desta relaxação (tipicamente mais fácil do que o problema em sua forma original) gera um limite mínimo para o valor da solução ótima. Se a solução desta relaxação resulta em um valor inteiro, esta é considerada ótima. Caso contrário, a solução fracionária é subdividida (*branching*) em outros problemas (seqüencialmente, se assim for necessário) até ser encontrada uma solução com valor inteiro melhor do que a solução corrente ou até que se esgote a lista de candidatos.

Toth e Vigo (2002) apresentam algoritmos de *branch-and-bound* ajustados para resolução dos casos simétrico e assimétrico do CVRP, conforme pesquisa feita na literatura. Testes computacionais com instâncias derivadas da literatura foram realizados para os dois casos.



### 5.1.2 Relaxação Lagrangeana

De acordo com Nishi *et al.* (2010) a Relaxação Lagrangeana (Lagrangean Relaxation) consiste em uma abordagem de decomposição e coordenação. Na Relaxação Lagrangeana as restrições tidas como complicadoras do problema são relaxadas através dos Multiplicadores de Lagrange, removendo-as do conjunto de restrições e substituindo-as por um termo de penalidade na função-objetivo do problema original. O problema relaxado pode ser decomposto em vários subproblemas tratáveis e resolvido eficientemente através de programação dinâmica. Os Multiplicadores de Lagrange são atualizados pelo método de otimização subgradiente para resolução do problema Lagrangeano dual.

Um algoritmo que combina a Relaxação Lagrangeana com Planos de Corte foi proposto por Kallehauge *et al.* (2006) para resolução do Problema da Roteirização de Veículos com Janelas de Tempo. O algoritmo, testado em instâncias da literatura, foi capaz de resolver casos com 400 e 1000 clientes respectivamente.

Ribeiro e Lorena (2007) propõem uma Relaxação Lagrangeana com clusters para o Problema do Carregamento de Pallets da Manufatura. Experimentos computacionais foram realizados com instâncias da literatura, não sendo informado porém, a quantidade de itens considerada.

### 5.1.3 Planos de Corte

De acordo com Arenales *et al.* (2007), os algoritmos de planos de corte buscam obter uma aproximação da envoltória convexa da região factível de um problema de programação inteira que contenha um ponto extremo correspondente a uma solução ótima. Essa aproximação é obtida por meio de cortes ou desigualdades válidas. Maiores informações sobre os aspectos teóricos dos algoritmos de planos de corte são apresentados por Fügenschuh e Martin (2005).

Em 5.1.2 é citada uma aplicação combinada de Relaxação Lagrangeana e Planos de Corte para o Problema da Roteirização de Veículos com Janelas de Tempo.

## 5.2 MÉTODOS APROXIMATIVOS

Como visto anteriormente, grande parte dos problemas de natureza combinatorial apresenta níveis de complexidade bastante elevados, o que resulta na sua classificação como *NP-hard*. Esta situação se torna ainda mais evidente quando tais problemas são representados por instâncias de tamanho compatível com os casos reais, seja em função do número de variáveis de decisão e/ou restrições que podem ocorrer.

Assim, a existência de uma grande quantidade e variedade de problemas combinatoriais de alta complexidade e que devem ser resolvidos de maneira eficiente, impulsionou o desenvolvimento de procedimentos capazes de encontrar boas soluções, ainda que estas não sejam ótimas. Tais procedimentos, onde a rapidez do processo de cálculo é tão importante quanto a qualidade da solução obtida são denominados de *métodos aproximativos*.

Um método aproximativo se caracteriza pela obtenção de uma boa solução, que não é a ótima, mas que pode estar bem próxima desta, em um tempo de processamento computacional aceitável. Outra denominação para os métodos aproximativos, encontrada na literatura, é a de método *heurístico*. Este termo deriva palavra grega *heuriskien* que significa encontrar ou descobrir (GOLDBARG; LUNA, 2000; MARTÍ, 2003).

Uma heurística pode ser definida conforme Nicholson (1971)<sup>5</sup> como um procedimento para a resolução de problemas através de um enfoque intuitivo, em geral racional, no qual a estrutura do problema possa ser interpretada e explorada de forma inteligente para a obtenção de uma solução adequada.

---

<sup>5</sup> NICHOLSON, T. A. J. **Optimization in Industry: optimization techniques**. London: Longman Press, 1971. Apud Arenales *et al.* (2007).

Com base na definição acima apresentada, deve ser ressaltado o fato de que os métodos aproximativos dependem em grande parte do problema para o qual foram desenvolvidos. Em um método de propósito geral (como ocorre nos métodos exatos) o procedimento é conciso e pré-estabelecido, independente do problema abordado. Já nos métodos aproximativos a situação é diferente, ou seja, as técnicas e idéias aplicadas na resolução de um problema são específicas a este, e, ainda que possam ser transladadas a outros problemas, devem passar por um processo de *customização*. Deste modo, é necessário referir-se a um problema concreto para se estudar em detalhe os procedimentos heurísticos (MARTÍ, 2003).

Além da questão relacionada à complexidade dos Problemas de Otimização Combinatória, existem outras que incentivam o uso dos métodos aproximativos que são (MARTÍ, 2003):

- a) o problema em análise é de natureza tal que não se conhece um método exato para sua resolução;
- b) ainda que existisse um método exato para resolver tal problema, seu uso seria computacionalmente muito custoso;
- c) o método aproximativo é mais flexível que o método exato permitindo, por exemplo, a incorporação de condições de difícil modelização;
- d) o método aproximativo é utilizado como parte de um procedimento global (abordagens híbridas) que garanta o alcance do ótimo do problema. Existem aqui duas possibilidades: o método aproximativo proporciona uma boa solução inicial de partida; e, o método aproximativo participa de uma etapa intermediária do processo de solução. Esta estratégia também é destacada por Hoffman (2000).

Os métodos aproximativos podem ser divididos, segundo Hoffman (2000) em três categorias básicas: os de *busca local*, os *construtivos* e os de *melhoria*.

Segundo Martí (2003) nos procedimentos de busca local, o princípio geral consiste em explorar o entorno ou vizinhança de uma solução. Para isso, é utilizada uma operação básica chamada *movimento* que, aplicada sobre os diferentes elementos de uma solução, fornecem as soluções de seu entorno. Martí (2003, p. 24) detalha da seguinte forma o procedimento de busca local:

Seja  $X$  o conjunto de soluções de um Problema de Otimização Combinatória. Cada solução  $x$  tem um conjunto de soluções associadas  $N(x) \subseteq X$  denominado entorno de  $x$ . Dada uma solução  $x$ , cada solução de seu entorno,  $x' \in N(x)$ , pode ser obtida diretamente a partir de  $x$  mediante um movimento. [...] Um procedimento de busca local parte de uma solução inicial  $x_0$ , calcula seu entorno  $N(x_0)$  e escolhe neste uma nova solução  $x_1$ . Dito de outro modo: é realizado um movimento  $m_1$  que aplicado a  $x_0$  dá como resultado  $x_1$ . Este processo é aplicado reiteradamente, descrevendo uma trajetória no espaço de soluções. A execução do algoritmo é encerrada quando a solução não puder mais ser melhorada. A solução então encontrada é denominada de *ótimo local* em relação ao entorno definido.

Nos procedimentos construtivos uma solução factível pode ser determinada de forma *gulosa*, isto é, tomando o melhor movimento sem analisar o entorno da respectiva solução. Já os procedimentos de melhoria podem, a partir da solução inicial, considerar uma vizinhança simples a esta ou mesmo movimentos mais complicados (HOFFMAN, 2000).

Atualmente, tem se tornado bastante difundido um novo tipo de algoritmo aproximativo que tenta basicamente combinar heurísticas simples em uma estrutura de mais alto nível objetivando explorar um determinado espaço de busca de modo eficiente e efetivo. Estes algoritmos, conhecidos como *metaheurísticas*, serão descritos em maiores detalhes na seção 5.3.3 do presente capítulo.

### **5.2.1 Heurísticas para o Problema da Roteirização de Veículos pela Classificação de Bott e Ballou (1986)**

A literatura que aborda o desenvolvimento e a aplicação de heurísticas para resolução do

PRV mostra-se bastante rica, dada a adequação deste tipo de método a complexidade do problema. Assim, para tornar mais clara e organizada a apresentação do assunto, se faz necessário adotar uma classificação para as heurísticas do PRV, agrupando-as por similaridade de estratégia de resolução. Para isto, foi adotada a proposta de Bott e Ballou (1986) que classifica as heurísticas para resolução do PRV como *agrupar primeiro – roteirizar depois*, *roteirizar primeiro – agrupar depois*, *procedimentos de economia e inserção* e *procedimentos de troca e melhoria*. Bodin *et al.* (1983) também propõem, em parte, semelhante classificação. Estas classes são detalhadas nas quatro subseções seguintes.

#### 5.2.1.1 *Agrupar primeiro – roteirizar depois*

Consiste em primeiramente criar agrupamentos contendo os pontos de demanda para a seguir definir a melhor seqüência de percurso (roteiro) em cada um destes agrupamentos (BODIN *et al.*, 1983; GOLDBARG; LUNA, 2000). Este método pode ser particularmente útil quando existe um grande número de pontos de atendimento e é necessário agrupá-los por proximidade, formando então zonas de entrega. Um exemplo deste tipo é o algoritmo de *varredura (sweep)* proposto por Gillet e Muller (1974).

#### 5.2.1.2 *Roteirizar primeiro – agrupar depois*

Inicialmente é gerado um *roteiro gigante* contendo todos os pontos de entrega e no qual as restrições são relaxadas (resultando em uma solução infactível). No segundo passo este roteiro é dividido em outros menores conforme as restrições que devem ser consideradas no problema (BODIN *et al.*, 1983; GOLDBARG; LUNA, 2000). Uma aplicação desta classe de heurística para o PRV é apresentada por Bodin e Berman (1979) para roteirização de ônibus escolares.

### *5.2.1.3 Procedimentos de economia e inserção*

Segundo Bodin *et al.* (1983) nesta classe de heurísticas para o PRV uma solução é construída de tal modo que a cada passo do procedimento uma configuração corrente, possivelmente inactível, é comparada com uma configuração alternativa que também pode ser inactível. A configuração alternativa é aquela que atinge a maior economia segundo algum tipo de critério ou que insere a mínimo custo uma entidade de demanda ainda não presente na configuração atual. O procedimento termina com a definição de uma solução factível. Um exemplo que pode ser dado desta classe de heurística é o Método das Economias proposto por Clark e Wright (1964) sendo um dos mais utilizados para resolução do PRV.

### *5.2.1.4 Procedimentos de troca ou melhoria*

Nesta classe de heurísticas para o PRV, a cada passo, uma solução factível gerada inicialmente é alterada para atingir outra solução também factível, porém com custo inferior ao da anterior. O procedimento continua até que nenhuma redução adicional de custo seja obtida (BODIN *et al.*, 1983; GOLDBARG; LUNA, 2000). Procedimentos deste tipo, baseados em trocas de arestas, são propostos por Lin e Kernighan (1973).

## **5.2.2 Heurísticas para Resolução do Problema do Carregamento de Veículos**

### *5.2.2.1 Heurísticas para o Problema do Carregamento de Pallets*

As heurísticas para construção de carregamentos em pallets envolvem basicamente a definição de padrões guilhotináveis e arranjos em forma de blocos, como as estruturas G4 (com

quatro blocos de itens sobre o pallet) ou de quantidade maior de blocos (SCHEITHAUER; SOMMERWEIB, 1998; G; KANG, 2001). Estas estruturas buscam minimizar os espaços ociosos sobre os pallets, concentrando-os na parte central destes.

#### 5.2.2.2 Heurísticas para o Problema do Carregamento de Contêineres

Segundo Pisinger (2002) as abordagens heurísticas mais comuns para resolução do Problema do Carregamento de Contêineres são as seguintes:

- a) construção de paredes: o contêiner é preenchido por meio de camadas horizontais ou verticais, estendendo-se de um extremo a outro;
- b) construção de pilhas: as caixas são organizadas umas sobre as outras a partir do piso do contêiner formando então pilhas. Posteriormente estas pilhas são alocadas da melhor forma no contêiner como um problema bidimensional;
- c) cortes guilhotinados: as caixas são organizadas de tal modo que podem ser distinguidas com uma seqüência de cortes guilhotinados (ARAÚJO, 2006).
- d) arranjo por cubóides: o carregamento é feito de tal modo que conjuntos de caixas são organizados em forma aproximada de cubo, ainda que as caixas do conjunto apresentem dimensões diferentes. Esta abordagem é empregada por Araújo (2006).

Uma outra abordagem heurística a ser citada é o *arranjo de blocos*, aplicado por Eley (2002) que consiste na organização de conjuntos de itens idênticos que podem ser posicionados sobre o piso do contêiner ou sobre outros blocos.

### 5.2.3 Metaheurísticas

A literatura que trata do processo de resolução dos Problemas de Otimização Combinatória tem, com frequência, feito referência ao desenvolvimento e aplicação de uma nova abordagem de resolução pertencente à classe dos métodos aproximativos. Esta nova abordagem, denominada *metaheurística*, tem demonstrado ser capaz de alcançar, na maioria dos casos, melhores resultados quando comparados àqueles produzidos pelas heurísticas tradicionais, para problemas complexos. O termo *metaheurística* tem sua origem no agrupamento de duas palavras de origem grega: *heuriskein* e *meta*, esta última significando “além”, em um “nível superior” (BLUM; ROLI, 2003).

De acordo com Laguna (2003) uma metaheurística consiste de uma estratégia principal que vai guiar e modificar outras heurísticas a fim de produzir soluções além daquelas que são normalmente geradas na busca pela solução local. Conforme o mesmo autor, as heurísticas guiadas por tal meta-estratégia podem ser procedimentos de alto nível ou envolver nada mais que uma descrição dos movimentos disponíveis que transformam uma solução em outra, junto de uma regra de avaliação de valores.

Blum e Roli (2003) destacam as principais características apresentadas pelas metaheurísticas:

- a) são estratégias que guiam o processo de busca;
- b) seu objetivo é explorar eficientemente o espaço de busca a fim de serem encontradas soluções próximas àquela considerada exata;
- c) as técnicas que constituem os algoritmos metaheurísticos variam de procedimentos de busca local simples até processos de aprendizagem complexos;
- d) os algoritmos metaheurísticos são aproximados e usualmente não-determinísticos;



- e) os algoritmos metaheurísticos podem incorporar mecanismos para evitar que o processo se prenda em áreas confinadas do espaço de busca;
- f) o conceito básico de metaheurística permite uma descrição em nível abstrato;
- g) sua aplicação não se restringe a um problema específico;
- h) podem fazer uso do conhecimento do domínio específico na forma de heurísticas que são controladas através de estratégias de nível superior;
- i) atualmente, as metaheurísticas mais avançadas utilizam a experiência de busca (representada por alguma forma de memória) para guiar o processo de solução.

As metaheurísticas podem ser classificadas conforme os três seguintes critérios (LAGUNA, 2003):

- a) o uso de memória adaptativa;
- b) o tipo de exploração da vizinhança que é empregada;
- c) o número de soluções correntes consideradas de uma iteração até a seguinte.

Blum e Roli (2003) apresentam uma classificação complementar para os métodos de resolução considerados nas várias metaheurísticas conforme as características do processo de busca pela solução. Esta classificação é dada da seguinte forma:

- a) *métodos de trajetória*: o processo de busca é executado através de uma trajetória no espaço de busca, já que uma nova solução pode ou não estar contida na vizinhança da solução corrente. O processo de busca de um método de trajetória pode ser visto como a evolução no tempo de um sistema dinâmico discreto. O algoritmo parte de um estado inicial (a solução inicial) e descreve uma trajetória

no espaço-estado. Metaheurísticas que integram esta classe são a Busca Local Básica, a Têmpera Simulada, os Métodos de Busca Local Explorativa e a Busca Tabu;

- b) *métodos baseados em populações*: manipulam a cada iteração do algoritmo um conjunto de soluções (isto é, uma população) ao invés de uma única solução. Uma vez que é considerada uma população de soluções, os algoritmos deste tipo fornecem um modo natural e intrínseco de exploração do espaço de busca. Assim, o desempenho final dependerá significativamente do modo através do qual a população é manipulada. Nesta classe estão os Algoritmos Genéticos, a Busca Dispersa e a Otimização por Colônia de Formigas.

Nas subseções seguintes serão brevemente descritas as metaheurísticas que se enquadram na classificação apresentada acima.

### 5.2.3.1 Busca Local Básica

A Busca Local Básica (BLUM; ROLI, 2003) pode também ser chamada de *melhoria iterativa*, uma vez que cada movimento é executado somente se a solução resultante for melhor do que a solução corrente. A execução do algoritmo é encerrada tão logo um mínimo local seja encontrado. O algoritmo da Busca Local Básica tem a seguinte estrutura (BLUM; ROLI, 2003):

```

s ← GerarSoluçãoInicial( )
repita
    s ← Melhorar (N(s))
até que nenhuma melhoria seja possível

```

A função  $\text{Melhorar}(N(s))$  pode ser colocada nos extremos do procedimento, assumindo a forma de uma função de *primeira melhoria* ou de *maior melhoria*, além de qualquer opção

intermediária. No primeiro caso ela examinará cuidadosamente a vizinhança  $N(s)$  e escolherá a primeira solução que for melhor do que  $s$ . Já no segundo caso, será explorada exhaustivamente a vizinhança retornando uma das soluções com o menor valor para a função-objetivo. Ambas as funções descritas acima param junto ao mínimo local. Com isso o desempenho é fortemente influenciado pela definição de  $S, f$  e  $N$ .

O desempenho apresentado pela Busca Local Básica na resolução dos Problemas de Otimização Combinatória é muitas vezes insatisfatório. Com isso, várias técnicas vêm sendo desenvolvidas com o objetivo de não permitir que os algoritmos se prendam a um mínimo local, o que é feito através da adição de mecanismos que permitam escapar de tais situações.

#### 5.2.3.2 *Têmpera Simulada*

A Têmpera Simulada (*Simulated Annealing*) pode ser considerada a mais antiga das metaheurísticas e certamente foi um dos primeiros algoritmos a incorporar uma estratégia explícita que permitisse escapar da solução local. Suas origens estão na *Mecânica Estatística (Algoritmo de Metrópolis)* (BLUM; ROLI, 2003).

Conforme Hoffman (2000) os algoritmos deste tipo simulam o processo de têmpera que requer o resfriamento lento dos metais a fim de aumentar sua resistência. A analogia estabelecida com os Problemas de Otimização Combinatória considera que é possível convergir lentamente para uma solução factível através da inserção de um componente randômico. Com uma dada probabilidade, o algoritmo permite movimentos que degradam o valor da solução. Entretanto, na medida em que a execução do algoritmo avança, a probabilidade de tais movimentos serem executados decresce.

Blum e Roli (2003) apresentam a seguinte estrutura para o algoritmo da Têmpera Simulada:

```

 $s \leftarrow \text{GerarSoluçãoInicial}()$ 
 $T \leftarrow T_0$ 
enquanto as condições de término não forem alcançadas faça
     $s' \leftarrow \text{SelecionarAleatoriamente}(N(s))$ 
    se  $f(s') < f(s)$  então
         $s \leftarrow s'$                                 {  $s'$  substitui  $s$  }
    senão
        Aceitar  $s'$  como nova solução com probabilidade  $p(T', s', s)$ 
    fim se
    Atualizar( $T$ )
fim enquanto

```

Segundo Blum e Roli (2003) o algoritmo começa com a geração de uma solução inicial (construída aleatoriamente ou através de uma heurística) e com a inicialização do *parâmetro de temperatura*  $T$ . A seguir, a cada iteração uma solução  $s' \in N(s)$  é aleatoriamente selecionada e aceita como nova solução corrente dependendo de  $f(s)$ ,  $f(s')$  e  $T$ .  $s'$  substituirá  $s$  se  $f(s') < f(s)$  (problema de minimização) ou  $f(s') \geq f(s)$  (problema de maximização), com uma probabilidade que é dada em função de  $T$  e de  $f(s') - f(s)$ . Durante o processo de busca a temperatura  $T$  é diminuída. Assim, na fase inicial a probabilidade de se aceitar movimentos ascendentes é alta, diminuindo gradualmente e convergindo a um simples algoritmo de melhoria iterativa.

Uma descrição detalhada da Têmpera Simulada e as possibilidades de combinação com outras metaheurísticas é apresentada por (HENDERSON *et al.*, 2003).

Tavakkoli-Moghaddam *et al.* (2007) propõem a resolução do Problema da Roteirização de Veículos com Entregas Fracionadas e Frota Heterogênea com o uso de um algoritmo de Têmpera Simulada que orienta na fase de melhoria heurísticas do tipo *1-opt* e *2-opt*. Testes computacionais foram realizados com instâncias desenvolvidas pelos autores onde o número de pontos de parada varia de 10 a 100.

### 5.2.3.3 Métodos de Busca Local Explorativa

Segundo Blum e Roli (2003) compõem esta família de métodos o GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*), a Busca em Vizinhança Variável, a Busca Local Guiada e a Busca Local Iterativa.

O GRASP, conforme Resende e Ribeiro (2003) é uma metaheurística de múltiplos inícios, na qual cada iteração consiste basicamente de duas fases: uma de construção e outra de busca local. Na fase de construção é definida uma solução factível, cuja vizinhança é investigada até que um mínimo local seja encontrado durante a fase de busca local. A melhor de todas as soluções investigadas é mantida e se torna a solução final para o problema.

Blum e Roli (2003) apresentam a seguinte estrutura geral para o algoritmo do GRASP:

**Enquanto** as condições de término não forem alcançadas **faça**

```

s ← ConstruirSoluçãoAleatorizadaGulosa( )
AplicarBuscaLocal(s)
MemorizarMelhorSoluçãoEncontrada( )

```

**Fim enquanto**

No algoritmo apresentado acima, nota-se que não é feito uso da história do processo de busca. A única memória requerida tem como funções armazenar a instância do problema e manter a melhor solução obtida até então. Esta é uma das razões pela qual o desempenho do GRASP é freqüentemente superado por outras metaheurísticas. Entretanto, devido a sua simplicidade, é geralmente mais rápida e capaz de produzir boas soluções em um tempo de processamento computacional bastante curto. Além disso, pode ser integrada com sucesso a outras técnicas de busca. Maiores detalhes sobre o GRASP podem ser obtidos em Resende e Ribeiro (2003).

A Busca em Vizinhança Variável - BVV (HANSEN; MLADENOVIC, 2003; BLUM;

ROLI, 2003) é uma metaheurística que aplica de maneira explícita uma estratégia baseada em estruturas de vizinhança que mudam dinamicamente. O algoritmo da BVV apresenta um caráter bastante geral, permitindo um considerável grau de liberdade para o desenvolvimento de variantes e instanciações particulares.

A estrutura geral pode ser dada da seguinte forma (BLUM; ROLI, 2003):

```

Selecionar um conjunto de estruturas de vizinhança  $N_k, k = 1, \dots, k_{max}$ 
 $s \leftarrow \text{GerarSoluçãoInicial}()$ 
enquanto as condições de término não forem alcançadas faça
     $k \leftarrow 1$ 
    enquanto  $k < k_{max}$  {loop interno}
         $s' \leftarrow \text{SelecionarAleatoriamente}(N_k(s))$  {fase de abalo}
         $s'' \leftarrow \text{BuscaLocal}(s')$ 
        se  $(f(s'') < f(s))$  então
             $s \leftarrow s''$ 
             $k \leftarrow 1$ 
        senão
             $k \leftarrow k + 1$ 
        fim se
    fim enquanto
fim enquanto

```

No passo inicial, um conjunto de estruturas de vizinhança tem de ser definido. Estas vizinhanças podem ser escolhidas arbitrariamente, mas com frequência, uma seqüência  $|N_1| < |N_2| < \dots < |N_{k_{max}}|$  de vizinhança com cardinalidade crescente é definida. Uma solução inicial é então gerada, o índice da vizinhança é inicializado e o algoritmo é levado a iterar até que uma condição de parada seja alcançada. Hansen e Mladenovic (2003) descrevem em detalhes a BVV.

A Busca em Vizinhança Variável é empregada por Fleszar *et al.* (2009) para resolução do Problema da Roteirização de Veículos Aberto onde é considerado ou não um limite superior

sobre a extensão das rotas. Os testes computacionais foram realizados em um conjunto de 16 instâncias da literatura com número de clientes variando entre 50 e 199.

Outra aplicação da BVV é apresentada por Kytöjoki *et al.* (2007) para resolução do CVRP. Testes computacionais foram realizados com um conjunto de 32 instâncias da literatura (com número de clientes variando de 200 a 1200), outro de 20 instâncias proposto neste trabalho (com número de clientes variando de 2400 a 20000) e um conjunto de 4 instâncias reais (serviço de coleta de resíduos) com 7798, 9516, 8454 e 10217 clientes, respectivamente.

Segundo Voudouris e Tsang (2003) e Blum e Roli (2003), a Busca Local Guiada – BLG, tem como princípio básico auxiliar o processo de busca a se mover gradualmente para longe da solução local através da mudança da paisagem de busca. Na BLG, o conjunto de soluções e a estrutura de vizinhança são mantidos fixos, enquanto a função-objetivo  $f$  é mudada dinamicamente a fim de tornar a solução local corrente “menos desejável”.

A estrutura geral do algoritmo da BLG é a seguinte (BLUM; ROLI, 2003):

```

s ← GerarSoluçãoInicial( )
enquanto as condições de término não forem alcançadas faça
    s ← BuscaLocal(s, f')
    para toda característica  $i$  com utilidade máxima  $Util(s, i)$  faça
         $p_i \leftarrow p_i + 1$ 
    fim para
    Atualizar( $f'$ ,  $p$ )                                     { $p$  é o vetor de penalidade}
fim enquanto

```

O algoritmo funciona da seguinte maneira: começando com uma solução inicial, aplica-se um método de busca local até que uma solução local seja determinada. Então o vetor  $p = (p_1, \dots, p_m)$  de penalidades é atualizado pelo incremento de algumas penalidades e a busca local é iniciada novamente. Maiores detalhes sobre a BLG são apresentados por Voudouris e Tsang (2003).

A BLG é empregada por Zhong e Cole (2005) para resolução do Problema da Roteirização de Veículos com Coletas de Retorno e Janelas de Tempo. O modelo foi testado em um conjunto de instâncias da literatura com número de clientes variando de 25 a 100.

Entre as estratégias explorativas, a Busca Local Iterativa - BLI (LOURENÇO *et al.*, 2003; BLUM; ROLI, 2003) é a que apresenta o caráter mais geral. Em função disto pode se tornar uma estrutura para outras metaheurísticas (como a BVV), além de incorporar outras metaheurísticas como sub componentes seus. A BLI é um algoritmo metaheurístico simples, porém robusto. Ela aplica a busca local para obter uma solução inicial até que seja encontrada uma solução local. A seguir esta solução é perturbada, recomeçando o processo de busca local. A importância da perturbação neste processo é decisiva, pois se for muito pequena pode impossibilitar o sistema de escapar da área de atração da solução local recém encontrada, e se for muito forte pode tornar o algoritmo similar a um re-início aleatório da busca local.

O algoritmo da BLI tem a seguinte forma geral (BLUM; ROLI, 2003):

```

 $s_0 \leftarrow \text{GerarSoluçãoInicial}( )$ 
 $\hat{s} \leftarrow \text{BuscaLocal}(s_0)$ 
enquanto as condições de término não forem alcançadas faça
     $s' \leftarrow \text{Perturbação}(\hat{s}, \text{histórico})$ 
     $\hat{s}' \leftarrow \text{BuscaLocal}(s')$ 
     $\hat{s} \leftarrow \text{ApliqueCritérioAceitação}(\hat{s}, \hat{s}', \text{histórico})$ 
fim enquanto

```

Conforme Blum e Roli (2003) o projeto dos algoritmos de BLI pode ser bastante flexível em relação à escolha da solução inicial, a perturbação e ao critério de aceitação. Um papel fundamental é desempenhado pelo histórico da busca que pode ser explorado na forma de memória de longo ou curto prazo. Lourenço *et al.* (2003) apresentam em detalhes as definições e aplicações da BLI, bem como relações desta com outras metaheurísticas.



Hashimoto *et al.* (2008) empregam a BLI na resolução do Problema da Roteirização de Veículos com Tempo Dependente e Janelas de Tempo. Neste estudo, a programação dinâmica foi agregada a BLI. Além disso, é proposto junto ao modelo um método de filtragem que restringe o espaço de busca nas vizinhanças a fim de limitar as soluções de baixa qualidade. Testes computacionais foram realizados com um conjunto de instâncias da literatura no qual o número de clientes variava de 200 a 1000.

#### 5.2.3.4 Busca Tabu

A Busca Tabu é uma metaheurística em cujo desenvolvimento foram tomados por base os princípios gerais da Inteligência Artificial e que pode ser utilizada para guiar qualquer procedimento de busca local em direção ao ótimo de um determinado problema (MARTÍ, 2003). Segundo Gendreau (2003) seu princípio básico consiste em seguir uma busca local sempre que um ótimo local é encontrado ainda que sejam permitidos movimentos de pior qualidade. Evita-se o retorno para soluções previamente visitadas através do uso de memória, denominadas *listas tabu*, as quais registram a história recente de busca.

Uma implementação de Busca Tabu inicia com a definição de dois elementos básicos que são seu espaço de busca e sua estrutura de vizinhança. O primeiro representa o espaço de todas as possíveis soluções que podem ser considerados durante a busca e o segundo as transformações que são feitas sobre uma solução corrente durante o processo de busca através de movimentos (GENDREAU, 2003).

O algoritmo da Busca Tabu tem a seguinte forma (BLUM; ROLI, 2003):

$s \leftarrow \text{GerarSoluçãoInicial}( )$

$\text{ListaTabu} \leftarrow \emptyset$

**enquanto** as condições de término não forem alcançadas **faça**

$s \leftarrow \text{encontrarmelhor}(N(s) \setminus \text{ListaTabu})$

Atualizar(*ListaTabu*)

**fim enquanto**

Blum e Roli (2003) comentam que no algoritmo acima apresentado é aplicado um processo de busca local visando uma melhoria na qualidade da solução encontrada como elemento básico e o uso de *memória de curto prazo* a fim de escapar da solução local e evitar ciclos. Esta memória de curto prazo é implementada como uma *lista tabu* que mantém o registro das melhores soluções encontradas recentemente, proibindo novos movimentos em direção a elas. A vizinhança da solução corrente é então restringida às soluções que não pertencem à lista tabu que compõem o *conjunto de soluções permitidas*.

Segundo Martí (2003) o objetivo principal de rotular soluções já visitadas como tabu é de evitar a formação de ciclo em torno destas. O tamanho das listas pode ser pequeno (o que restringe o espaço de busca) ou então ajustado dinamicamente conforme a estratégia que está sendo utilizada.

Entretanto, a implementação da memória de curto prazo como uma lista que contém soluções completas não é um processo prático devido à ineficiência do controle. Com isso, ao invés das soluções propriamente ditas, *atributos* destas é que são armazenados. Tais atributos podem ser representados por componentes da solução, movimentos, ou diferenças entre duas soluções. O conjunto de atributos e as listas tabus correspondentes definem as *condições tabus* as quais são usadas para filtrar a vizinhança de uma solução e gerar o conjunto de soluções permitidas. Apesar do armazenamento de atributos ser muito mais eficiente, corre-se o risco da perda de informação, uma vez que a proibição de um atributo significa alocar o *status* de tabu para provavelmente mais de uma solução. É possível então, que soluções não visitadas de boa qualidade sejam excluídas do conjunto das soluções permitidas (BLUM; ROLI, 2003).

Para contornar esta situação indesejada são definidos *critérios de aspiração* que permitem incluir uma solução no conjunto permitido mesmo que esta seja proibida pelas condições tabu. O critério de aspiração define as condições que serão usadas para construção do conjunto permitido. O critério de aspiração mais comumente usado seleciona soluções que são

melhores do que a melhor solução corrente encontrada (BLUM; ROLI, 2003; MARTÍ, 2003).

O algoritmo da Busca Tabu é encerrado quando uma condição de término é atingida. Gendreau (2003) afirma que tais condições de término podem se dar:

- a) quando é atingido um número previamente determinado de iterações ou de tempo de processamento computacional;
- b) após um determinado número de iterações sem melhoria no valor da função objetivo;
- c) quando é atingido um valor limite pré-estabelecido.

Uma significativa melhoria no desempenho da Busca Tabu pode ser alcançada com a aplicação de estratégias de intensificação e diversificação. Tais estratégias compõem a *memória de longo prazo*. Segundo Martí (2003) a intensificação consiste no regresso a regiões já exploradas do espaço de busca a fim de estudá-las mais a fundo, favorecendo o aparecimento de atributos associados a soluções de boa qualidade encontradas. Já a diversificação consiste em visitar áreas que não foram exploradas no espaço de busca, modificando regras de escolha para incorporar às soluções atributos que não haviam sido usados frequentemente.

Os aspectos teóricos da Busca Tabu são apresentados em maiores detalhes por Gendreau (2003) e Laguna (2003).

Golden *et al.* (1998) discutem diferentes configurações dos elementos da Busca Tabu apresentadas na literatura para resolução do PRV.

Ho e Haugland (2004) utilizam a Busca Tabu na resolução do Problema da Roteirização de Veículos com Janelas de Tempo e Entregas Fracionadas. No algoritmo proposto a solução para a roteirização é construída através da troca de vértices entre rotas, sendo ao mesmo tempo melhorada através da introdução e eliminação de frações de carga. Testes computacionais foram

realizados com instâncias da literatura de 100 clientes.

Brandão (2004) emprega a Busca Tabu para resolução do Problema da Roteirização de Veículos Aberto. Testes computacionais foram realizados com um conjunto de 16 instâncias da literatura com número de clientes variando de 50 a 199.

A Busca Tabu também é utilizada por Montané e Galvão (2006) para resolução do Problema da Roteirização de Veículos com Entregas e Coletas Simultâneas. O algoritmo utiliza três tipos de movimento entre diferentes rotas e um tipo de movimento para trocas internas a uma rota. Foram implementados 4 tipos de vizinhança e duas estratégias de busca. A intensificação e a diversificação são feitas através de penalização de frequência. Testes computacionais foram realizados com 87 instâncias da literatura com o número de clientes variando de 50 a 400.

Bortfeldt *et al.* (2003) empregam a Busca Tabu com processamento paralelo para resolução do Problema do Carregamento de Contêineres. Testes computacionais foram realizados com instâncias da literatura.

Pureza e Morabito (2006) apresentam um algoritmo de Busca Tabu para o Problema do Carregamento de Pallets da Manufatura. O algoritmo consiste de uma implementação simplificada da Busca Tabu, restrita a estruturas de memória de curto prazo. Tais estruturas armazenam e penalizam algumas características ou atributos da solução que já foi visitada, por um certo número de iterações. Além disso, a busca produz somente soluções factíveis, permitindo disponibilizar um padrão a cada iteração. Os movimento são executados sobre blocos e não sobre caixas individuais. O algoritmo foi testado computacionalmente em 21 instâncias da literatura, com número de caixas variando de 23 a 100.

#### 5.2.3.5 Computação Evolutiva

Conforme Laguna (2003), sob o termo Computação Evolutiva são compreendidas uma

série de procedimentos como os *Algoritmos Genéticos*, as *Estratégias Evolutivas*, a *Programação Evolutiva* e a *Programação Genética*. Sem dúvida, foram os Algoritmos Genéticos que encontraram larga aplicação na resolução dos Problemas de Otimização Combinatória, e por esta razão serão descritos sucintamente abaixo.

Os Algoritmos Genéticos, de acordo com Sherali e Driscoll (2000), tentam imitar o processo de seleção natural, no qual sobrevivem os indivíduos que se adaptam melhor ao ambiente, constituindo-se nos genitores das próximas gerações. Sherali e Driscoll (2000, p. 336) descrevem da seguinte forma sua concepção em termos de algoritmo:

Na estrutura algorítmica para tais métodos, o procedimento inicia com alguma população de soluções finita e desejável, o oposto a uma única solução. Cada solução é representada via algum código binário ou seqüência (*string*) inteira de números e sua adequação é avaliada com base em uma função de mérito (a qual pode ter a forma de uma função de penalidade). Um par de *pais* é selecionado aleatoriamente, com uma alta probabilidade da seleção ser atribuída a soluções superiores. Os dois pais são combinados usando um esquema de cruzamento que tente misturar as seqüências que os representam de um modo adequado a produzir uma prole (solução). As proles também podem ser modificadas por alguma perturbação aleatória da mutação. Tendo como base a adequação da prole então produzida *versus* aquela da população original, uma nova população com cardinalidade igual a anterior é formada e o processo repetido.

A estrutura básica de um Algoritmo Genético pode ser dada da seguinte forma (REEVES, 2003):

```

Escolher uma população inicial de cromossomos
enquanto as condições de término não forem alcançadas faça
  repita
    se condição de cruzamento satisfeita então
      {selecionar cromossomos pais;
       escolher parâmetros de cruzamento;
       executar cruzamento};
    se a condição de mutação for satisfeita então
      {escolher pontos de mutação;
       executar mutação};
  
```

avaliar aptidão da prole  
**até** que uma prole de tamanho suficiente seja criada;  
selecionar uma nova população;  
**fim enquanto**

Uma descrição detalhada dos Algoritmos Genéticos pode ser encontrada em Reeves (2003).

Os Algoritmos Genéticos são usados por Baker e Ayechev (2003) para resolução do PRV. O modelo proposto foi testado em um conjunto de instâncias da literatura com número de pontos variando de 50 a 199.

Ho *et al.* (2008) empregam os Algoritmos Genéticos na resolução do Problema da Roteirização de Veículos com Múltiplos Depósitos. O modelo foi testado em duas instâncias geradas aleatoriamente pelos autores com 50 e 100 clientes, respectivamente.

Uma estratégia que combina os Algoritmos Genéticos com um procedimento de busca local é utilizada por Prins (2004) para resolução do PRV. Com esta estratégia foi possível tratar problemas da literatura com número de clientes variando de 50 a 483.

Uma revisão da literatura sobre o desenvolvimento e a aplicação dos algoritmos evolutivos na resolução do PRV é apresentada por Potvin (2009).

Bortfeldt e Gehring (2001) empregam os Algoritmos Genéticos na resolução do Problema do Carregamento de Contêineres, sendo os testes computacionais com o modelo realizados em instâncias da literatura.

### 5.2.3.6 Busca Dispersa

De acordo com Glover e Laguna (2003) a Busca Dispersa (*Scatter Search*), em termos de classificação de metaheurísticas, pode ser vista como um algoritmo evolutivo (baseado em população) onde são construídas soluções através da combinação de outras. Segundo os mesmos autores seus fundamentos teóricos são derivados de estratégias originalmente propostas para combinação de regras de decisão e restrições no contexto da programação inteira.

Martí (2003, p. 50) descreve assim o funcionamento da Busca Dispersa:

[...] A Busca Dispersa se baseia no princípio de que a informação sobre a qualidade ou o atrativo de um conjunto de regras, restrições ou soluções pode ser utilizado mediante a combinação destas. De concreto, dadas duas soluções, se pode obter uma nova mediante sua combinação de modo melhor do que as que a originaram. [...] Da mesma forma que os Algoritmos Genéticos, a Busca Dispersa se baseia em manter um conjunto de soluções e realizar combinações com estas; porém ao contrário do primeiro não está fundamentada na aleatorização sobre um conjunto relativamente grande de soluções mas nas escolhas sistemáticas e estratégicas sobre um conjunto pequeno de soluções.

Tendo como objetivo equilibrar a intensificação e a diversificação da busca, pode ser integrado à Busca Dispersa o método de *Path Relinking*. Segundo Glover *et al.* (2003) esta abordagem gera novas soluções através da exploração de trajetórias que conectam soluções de alta qualidade. Inicia-se por uma destas soluções, denominada *solução de partida*, gerando a seguir um caminho no espaço vizinho que conduz a outras soluções, chamadas *soluções guias*. Este procedimento é efetuado pela seleção de movimentos que introduzem atributos contendo as soluções guia.

O algoritmo para Busca Dispersa e Path Relinking é assim apresentado por Blum e Roli (2003):

*Fase inicial*

GerarSementes( )

**Repetir**

GeradordeDiversificação( )

Melhoria( )

AtualizarConjuntodeReferencia( )

**Até** que o conjunto de referencia seja de cardinalidade  $n$

*Fase de Busca Dispersa/Path Relinking*

**Repetir**

GeraçãodeSubconjunto( )

CombinaçãodeSolução( )

Melhoria( )

AtualizarConjuntodeReferencia( )

**Até** que o critério de término seja alcançado

Para maiores detalhes sobre a Busca Dispersa e o Path Relinking é sugerido o trabalho de Glover *et al.* (2003).

Belfiori e Yoshizaki (2009) empregam a Busca Dispersa para o Problema da Roteirização de Veículos com Frotas Heterogêneas, Janelas de Tempo e Entregas Divididas. A solução inicial é gerada com a adaptação de duas heurísticas. O modelo foi aplicado em um caso real de um grupo varejista brasileiro no qual 519 lojas em 11 estados são atendidas a partir de um depósito central.

#### *5.2.3.7 Otimização por Colônia de Formigas*

Segundo Blum e Roli (2003) a Otimização por Colônia de Formigas - OCF (*Ant Colony Optimization*) é uma metaheurística que tem como inspiração o comportamento vasculhador das formigas, possibilitando a estas encontrar caminhos mais curtos entre as fontes de alimento e os seus ninhos. Durante o deslocamento entre as fontes de alimento e o ninho e vice-versa as formigas depositam no solo uma substancia chamada *feronômio*. Assim, quando decidem qual direção tomar escolherão, mais provavelmente, os caminhos que estão marcados com



concentrações mais fortes de tal substância. Este comportamento é o fundamento para uma interação cooperativa que leva a definição de caminhos mais curtos.

Dorigo e Stützle (2003, p. 255) descrevem da seguinte forma a aplicação da OCF na resolução de Problemas de Otimização Combinatória:

As formigas artificiais usadas na OCF correspondem a procedimentos para construção de solução estocástica que probabilisticamente define uma solução através da adição de componentes da solução sobre soluções parciais levando em conta (i) a informação heurística a respeito da instância do problema que está sendo resolvido, se disponível, e (ii) trilhas de feromônio (artificial) as quais mudam dinamicamente a cada rodada para refletir a experiência adquirida pelos agentes durante a busca. [...] O componente estocástico na OCF permite que as formigas construam uma ampla variedade de diferentes soluções e assim explorem um número de soluções muito maior do que as heurísticas construtivas. Ao mesmo tempo, o uso de informações heurísticas, a qual está prontamente disponível para muitos problemas, pode guiar as formigas em direção a soluções mais promissoras.

O algoritmo de OCF é assim apresentado por Gajpal e Abad (2009):

Inicializar as intensidades das trilhas e os parâmetros usando uma solução inicial através de uma heurística de vizinho mais próximo

**Enquanto** as condições de término não forem atingidas **faça**

    Gerar uma solução para cada formiga usando as intensidades das trilhas

    Melhorar cada solução aplicando uma busca local

    Atualizar as soluções de elite

    Atualizar a intensidade das trilhas

Retornar a melhor solução encontrada até o momento

Para maiores informações sobre a OCF é recomendado o trabalho de Dorigo e Stützle (2003).

Gajpal e Abad (2009a) empregam a OCF para resolução do Problema da Roteirização de Veículos com Coletas e Entregas Simultâneas. Neste trabalho foram empregada três formas de busca local: baseado em troca do tipo *2-opt*, a inserção/troca de clientes em multi-rotas e a troca

de sub-caminhos em multi-rotas. Os testes computacionais foram realizados com três conjuntos de instâncias da literatura.

Um algoritmo de OCF que utiliza dois tipos de formigas (em um procedimento Agrupar primeiro – Roteirizar depois) é empregado por Gajpal e Abad (2009b) para resolução do Problema da Roteirização de Veículos com Coletas de Retorno. O algoritmo foi testado em dois conjuntos de instâncias da literatura com número de clientes variando de 25 a 150 e 21 a 100, respectivamente.

A OFC com o uso de mais de um tipo de formiga também é usado por Donati *et al.* (2008) para resolução do Problema da Roteirização de Veículos com Tempo Dependente. Os testes computacionais foram realizados em um conjunto de instâncias da literatura e em outro construído a partir de uma rede viária real.

#### 5.2.3.8 Estratégias Híbridas

A combinação em um dado algoritmo, de elementos de duas ou mais metaheurísticas, aparece como uma estratégia a ser explorada quando se tem por objetivo construir soluções de melhor qualidade para os problemas mais complexos. A flexibilidade dos algoritmos metaheurísticos possibilita a construção de tais estratégias, denominadas *híbridas*. Além disso, busca-se reforçar os aspectos positivos apresentados pelos algoritmos das metaheurísticas apresentados anteriormente.

Para Blum e Roli (2003) as três principais formas de hibridização de metaheurísticas são:

- a) a troca de componentes entre metaheurísticas, como, por exemplo, a combinação de elementos dos métodos de trajetória com elementos de métodos baseados em população para possibilitar uma exploração eficiente do espaço de busca;

- b) a busca cooperativa, que consiste em uma busca executada com a troca de informações entre diferentes algoritmos sobre determinadas características do espaço de busca;
- c) a integração entre metaheurísticas e métodos sistemáticos de busca, como a integração de uma metaheurística com a Programação por Restrições.

Zachariadis *et al.* (2009b) propõem a resolução do Problema da Roteirização de Veículos com Entregas e Coletas Simultâneas através de uma estratégia híbrida que combina a Busca Tabu com a BLG. Para auxiliar a Busca Tabu a não se prender em um mínimo prematuramente encontrado, é empregado um mecanismo de guia que incorpora o raciocínio da BLG. Testes computacionais foram realizados em três conjuntos de instâncias da literatura, com número de clientes variando de 50 a 199, com valor igual a 50 e o último variando de 100 a 400 clientes.

Lin *et al.* (2009) empregam uma estratégia híbrida, combinando a Busca Tabu e a Têmpera Simulada para resolução do CVRP. O modelo proposto é testado em um conjunto de 14 instâncias da literatura com número de clientes variando de 50 a 199 e em outro conjunto de 20 instâncias com o número de clientes variando de 240 a 420.

### 5.3 OTIMIZAÇÃO INTERATIVA

Segundo Bodin *et al.* (1983), a otimização interativa consiste em uma abordagem de cunho geral na qual um elevado grau de interação humana é incorporado ao processo de resolução do problema. A concepção desta estratégia de resolução considera que a experiência do tomador de decisão torna mais efetivo o estabelecimento e a revisão de parâmetros, além de adicionar aspectos subjetivos baseados no conhecimento e intuição ao modelo de otimização. Segundo os autores isto aumenta a probabilidade de que o modelo seja implementado e utilizado.

Em geral, o emprego da otimização interativa ocorre quando o problema em questão é solucionado via Sistema de Apoio à Decisão, no qual o resultado apresentado por um modelo matemático pode ser aprimorado através da análise e intervenção do decisor.

Basnet *et al.* (1996) utilizam a otimização interativa em um sistema para roteirização e programação de caminhões tanque para coleta de leite. Uma heurística do tipo agrupar primeiro – roteirizar depois é utilizada para construção dos roteiros que, a seguir, são aprimorados com a intervenção do tomador de decisão. Outro desenvolvimento, também direcionado a uma aplicação real (distribuição de rações), é apresentado por Ruiz *et al.* (2004). As soluções são geradas a partir de duas abordagens exatas e posteriormente avaliadas e aprimoradas com a intervenção do usuário. Os resultados apresentados indicam uma redução de 7% a 12% na distância de percurso e de 9% a 11% no custo operacional quando comparado ao procedimento anterior de determinação das rotas.

#### 5.4 GERAÇÃO DE COLUNAS

Segundo Hoffman (2000), uma das alternativas na resolução dos Problemas de Otimização Combinatória consiste em examinar a sua estrutura e encontrar uma relaxação ou decomposição que seja a forma mais fácil de resolvê-lo. Tenta-se então reforçar esta aproximação através da adição de restrições, colunas ou alterando-se os coeficientes das restrições ou da função-objetivo. Esta técnica é denominada como *geração de colunas* ou *branch-and-price* (ramificar e valorar).

Choi e Tcha (2007) propõem um algoritmo baseado em geração de colunas que incorpora programação dinâmica e a técnica de branch-and-bound para definição da solução inteira para o Problema da Roteirização de Veículos com Frota Heterogênea. Testes computacionais foram realizados em 3 grupos de 12 instâncias da literatura com número de clientes variando de 20 a 100.

Christiansen e Lysgaard (2007) apresentam um algoritmo de geração de colunas para o Problema da Roteirização de Veículos Estocástico. O problema é formulado como um particionamento de conjuntos, sendo desenvolvido um algoritmo de programação dinâmica para solução do sub-problema associado de geração de colunas. Para assegurar a integralidade da solução foi desenvolvido um procedimento de ramificação que explora a natureza assimétrica dos custos das rotas. Testes computacionais foram realizados com um conjunto de instâncias adaptado da literatura.

Azi *et al.* (2010) propõem uma abordagem para resolução do Problema da Roteirização de Veículos com Janelas de Tempo e Múltiplo Uso no qual limites mínimos são computados através da resolução da relaxação de programação linear de um problema de particionamento de conjuntos utilizando geração de colunas. Testes computacionais foram realizados com dois conjuntos de instâncias com 25 e 40 clientes respectivamente.

Scheithauer (1999) utiliza a geração de colunas na resolução do problema do carregamento de um único e de múltiplos contêineres. Novas relaxações para o problema de programação linear são propostas neste trabalho. O procedimento é testado em um conjunto de instâncias geradas aleatoriamente.

## 5.5 ABORDAGEM HÍBRIDA

A *abordagem híbrida*, também conhecida como *branch-and-cut*, é uma combinação dos métodos de *branch-and-bound* e de planos de corte (HOFFMAN, 2000). Conforme Caccetta e Hill (2001) o princípio de enumeração completa de uma árvore de busca, para obtenção de uma solução ótima que aparece no método de *branch-and-bound*, nem sempre é possível devido ao grande número de soluções que devem ser consideradas. Desta forma, o *branch-and-bound* depende em muito da qualidade dos limites mínimos que são gerados. Caccetta e Hill (2001, p. 519) definem a estrutura do método de *branch-and-cut* da seguinte forma:

Limites de alta qualidade podem ser freqüentemente obtidos usando procedimento de planos de corte e restrições expressando a estrutura do espaço de solução. O método de branch-and-cut se refere a algoritmos que utilizam um procedimento de planos de corte para fortalecer os limites mínimos de cada nó dentro de uma rotina de busca de branch-and-bound. Além disso, um grande subconjunto de restrições usado é válido em cada nó da árvore de busca e esta propriedade é explorada.

Bard *et al.* (2002) propõem um algoritmo de branch-and-cut para o Problema da Roteirização de Veículos com Janelas de Tempo. Neste algoritmo, cada aumento no limite mínimo em relação a solução ótima é obtido com a resolução de uma série de problemas de relaxação que incorporam inequações válidas. Soluções factíveis ou limites superiores são obtidos com o emprego do GRASP. Cortes são então introduzidos para limitar as soluções fracionárias. Testes foram realizados com instâncias derivadas da literatura com 50 e 100 clientes.

Um procedimento de branch-and-cut também é proposto por Lu e Dessouky (2004) para o Problema da Roteirização de Veículos com Entregas e Coletas. Os autores propõem quatro classes de inequações válidas para tal procedimento. Testes foram realizados com instâncias da literatura com o número de clientes chegando a 25.

Alvarez-Valdes *et al.* (2005) propõem um algoritmo de branch-and-cut para resolução do Problema do Carregamento de Pallets através da adaptação de uma formulação de problemas de corte a qual são adicionadas novas restrições, bem como procedimentos para redução de variáveis. Testes computacionais foram realizados com dois conjuntos de instâncias da literatura com mais de 50 e 100 caixas respectivamente.

## 5.6 PROGRAMAÇÃO POR RESTRIÇÕES

A programação por restrições é definida da seguinte forma por Corrêa *et al.* (2007, p. 1691-1692):

Um modelo de programação por restrições é composto por um conjunto de variáveis ( $X$ ), um conjunto de domínios ( $D$ ) e um conjunto de restrições ( $C$ ) especificando quais designações de valores em  $D$  para a variável  $X$  são permitidos. A eficiência do paradigma da programação por restrições apóia-se em poderosos algoritmos de propagação de restrições os quais removem do domínio das variáveis os valores que gerarão soluções infactíveis. Se a propagação de restrições não é suficiente para encontrar uma solução viável, então um processo de ramificação é executado para restringir ainda mais o domínio; uma solução factível é encontrada quando cada domínio contém um único valor.

O próximo capítulo aborda de forma específica os métodos que foram empregados para resolução integrada dos problemas de roteirização e carregamento de veículos.

## 6 MÉTODOS APRESENTADOS NA LITERATURA PARA RESOLUÇÃO INTEGRADA DA ROTEIRIZAÇÃO E CARREGAMENTO DE VEÍCULOS

Como frisado anteriormente, a abordagem integrada durante a resolução dos problemas da roteirização e do carregamento de veículos é recente na literatura. Assim, o número de trabalhos publicados ainda é pequeno, quando comparado ao número de trabalhos que tratam da roteirização de veículos e, em menor proporção ao carregamento de veículos (considerando a similaridade com o Problema do Carregamento de Contêineres). A seguir, nas seções 6.1 e 6.2, serão descritos os métodos apresentados na literatura para resolução do 2L-CVRP e do 3L-CVRP, respectivamente.

### 6.1 RESOLUÇÃO DO 2L-CVRP

Um algoritmo exato para solução do 2L-CVRP, que faz uso do método de *branch-and-bound*, é apresentado por Iori *et al.* (2007). O algoritmo utiliza classes básicas de inequações válidas derivadas do CVRP, bem como inequações válidas associadas a seqüências infactíveis. A factibilidade de um dado padrão de carregamento é determinada através de limites inferiores, de heurísticas e por um algoritmo especializado de *branch-and-bound*. O algoritmo foi testado através da aplicação em instâncias apresentadas na literatura do CVRP, resolvendo de forma ótima instâncias com mais de 35 clientes e mais de 100 itens.

Gendreau *et al.* (2008) propõem um algoritmo de Busca Tabu para o 2L-CVRP, considerando os casos de carregamento irrestrito e carregamento sequencial. A Busca Tabu desenvolvida para este problema pode aceitar movimentos que resultem em soluções infactíveis. No caso do carregamento sequencial, todas as rotas consideradas na busca satisfazem a esta restrição. Entretanto, tanto para o carregamento sequencial como para o irrestrito, as rotas podem ser infactíveis em peso ou infactíveis em carregamento se for necessária uma superfície de carga que exceda a altura máxima permitida. O algoritmo não gera carregamentos que requeiram uma



largura maior do que a máxima permitida ou com sobreposição de itens. Uma penalidade proporcional ao nível de violação é imposta sobre movimentos infactíveis. Assim, sempre que um movimento é executado, o algoritmo deve considerar a melhoria obtida na solução corrente. Os procedimentos de roteirização foram adaptados do Taburoute (GENDREAU *et al.*, 1994). Testes computacionais foram realizados a partir de um conjunto modificado de 36 instâncias provenientes da literatura nas quais o número de clientes varia de 15 a 255 e o número de itens de 15 a 786.

Zachariadis *et al.* (2009a) propõem um algoritmo metaheurístico para o 2L-CVRP que incorpora o raciocínio da Busca Tabu e da Busca Local Guiada, denominado Busca Tabu Guiada. Considerando os aspectos relacionados com a roteirização do problema examinado, o algoritmo explora o espaço de soluções empregando uma estratégia de busca baseada na Busca Tabu, guiada por um mecanismo de alteração da função objetivo (baseado nos princípios da BLG) que penaliza características de baixa qualidade presente em uma solução corrente. Este mecanismo de guia induz à diversificação e auxilia o processo de busca a cobrir vastas áreas do espaço de soluções. Os aspectos relacionados ao carregamento são tratados por meio de cinco heurísticas para empacotamento de conjuntos que produzem diversas configurações de carga. Para acelerar o processo de busca, é feita a redução da vizinhança a ser explorada, e empregada uma estrutura de memória para registrar a informação de viabilidade do carregamento. Experimentos prévios foram realizados para calibrar os parâmetros do algoritmo. A efetividade do algoritmo metaheurístico proposto foi testada em 360 problemas-teste (180 para a versão seqüencial e 180 para a versão irrestrita do problema) e conduziram a várias novas soluções.

Fuellerer *et al.* (2009) apresentam uma heurística baseada na Otimização por Colônia de Formigas – OCF para resolução do 2L-CVRP. O procedimento utiliza um Método das Economias baseado em OCF para resolução do CVRP, o qual é modificado e estendido para incorporar heurísticas de carregamento. O algoritmo pesquisa o espaço de soluções da roteirização, enquanto avalia a factibilidade do carregamento em duas dimensões de cada roteiro através de limites mínimos, de heurísticas e de procedimento de *branch-and-bound*. O algoritmo proposto foi testado em instâncias do 2L-CVRP apresentadas na literatura, sendo que para instâncias de pequeno tamanho, obteve a solução ótima em 46 de um total de 58 casos. Os

autores também comparam os resultados quando é considerada a restrição de carregamento seqüencial e irrestrito, bem como de orientação fixa dos itens e possibilidade de rotação destes. Observou-se que em média (considerando mais de 180 instâncias) cerca de 5% dos custos totais de transporte podem ser economizados quando as restrições de carregamento seqüencial e orientação fixa são relaxadas. Se somente uma das duas restrições é relaxada, as economias podem ainda passar de 3%. As economias se mostraram maiores em instâncias de maior dimensão.

## 6.2 RESOLUÇÃO DO 3L-CVRP

O 3L-CVRP foi apresentado pela primeira vez por Gendreau *et al.* (2006). Neste trabalho, um algoritmo de Busca Tabu trata a roteirização de veículos e iterativamente invoca um segundo algoritmo de Busca Tabu para gerar os padrões de carregamento tridimensional. As demandas são compostas por caixas de diferentes tamanhos e devem ser carregadas em uma frota com número fixo de veículos.

No problema tratado por Gendreau *et al.* (2006) é definida inicialmente uma seqüência ordenada de clientes a serem visitados, decidindo-se a seguir quais itens devem ser carregados em um certo veículo considerando que a sua capacidade de carga não seja excedida, bem como restrições de carregamento tridimensional: orientação vertical fixa, itens não-frágeis não podem ser colocados sobre itens frágeis, área mínima de suporte e carregamento seqüencial.

Uma Busca Tabu simples explora a vizinhança modificando a seqüência na qual os itens do conjunto demandado são carregados no veículo. A partir desta seqüência, duas heurísticas construtivas são aplicadas para definir um carregamento factível de comprimento mínimo em relação ao comprimento do compartimento de carga. Assim, cada heurística acomoda os itens seqüencialmente ao mesmo tempo em que satisfaz as condições de carregamento, fazendo uso do espaço de carga com máxima largura ( $W$ ), máxima altura ( $H$ ) e mínimo comprimento de carregamento dado por  $\lambda$ . Se  $\lambda < L$  ( $L$  representa o comprimento do compartimento de carga do

veículo), considera-se que o carregamento requerido foi obtido e é encerrada a Busca Tabu. Caso contrário, a solução incumbente (correspondente ao mínimo  $\lambda > L$ ) é possivelmente atualizada e uma nova seqüência de carregamento tentada.

Após a primeira execução das heurísticas, se  $\lambda > L$ , o algoritmo classifica os itens conforme o modo como foram carregados: os itens acondicionados totalmente no compartimento de carga são classificados como de *tipo 1*, enquanto aqueles que tem uma porção acondicionada fora do compartimento de carga (na direção do comprimento deste) são classificados como de *tipo 2*. A partir daí a vizinhança é explorada considerando como possíveis movimentos todas as seqüências obtidas na seqüência corrente, combinando, a cada vez, um diferente par de itens  $(i, j)$ , de modo que  $i$  é do *tipo 1* e  $j$  de *tipo 2*. Para cada seqüência as heurísticas são executadas e determinado um escore para o movimento. O movimento de menor escore é selecionado. O algoritmo faz uso de duas listas tabu, uma para cada tipo de item. Um movimento combinando  $i$  e  $j$  é tabu se  $i$  está em uma lista e  $j$  em outra. Entretanto, um movimento tabu é aceito quando produz uma solução que melhora a incumbente. Um valor conveniente para o tamanho da lista tabu foi determinado experimentalmente como o mínimo entre 10 e a metade do número de itens a serem carregados. A busca é encerrada quando um carregamento factível de comprimento  $\lambda \leq L$  é encontrado ou após um número pré-definido de iterações.

No algoritmo de Busca Tabu desenvolvido movimentos que levem a soluções infactíveis (inviáveis) são permitidos. Esta infactibilidade pode ser resultado da violação da capacidade de peso ou quando o comprimento do carregamento excede a dimensão  $L$  do compartimento de carga.

Para determinar uma solução inicial é utilizado um ou dois algoritmos, sendo um para grafos genéricos e outro para grafos euclidianos. Esses dois algoritmos foram adaptados a partir do Método das Economias para o CVRP e do algoritmo para roteirização periódica de veículos com múltiplos depósitos. Uma vez obtida a solução inicial, explora-se uma vizinhança na qual um cliente é retirado de um roteiro e designado a outro. Os roteiros envolvidos no movimento são posteriormente re-otimizados através da inserção generalizada 4-*opt* GENI desenvolvida por Gendreau *et al.* (1992).

Para avaliar as soluções geradas, Gendreau *et al.* (2006) utilizam a seguinte função objetivo:

$$\text{Avaliação} = (\text{distância total}) + \alpha(\text{excesso de peso}) + \beta(\text{excesso de comprimento}) + \gamma \cdot f(i, j) \quad (19)$$

Na expressão acima,  $f(i, j)$  representa a razão entre o número de vezes que um movimento designa o cliente  $i$  para o veículo  $j$  e o número de movimentos executados. O segundo e o terceiro termo da expressão penalizam inactibilidades, enquanto o quarto termo promove uma diversificação na busca.

Os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  penalizam inactibilidades e são ajustados durante o processo de busca, tomando como base a variação da inactibilidade total do peso e comprimento do carregamento, respectivamente. Quando a variação da inactibilidade é positiva o respectivo parâmetro é incrementado em 10% e decrementado em 10% se a variação for negativa.

Para realizar os testes computacionais, Gendreau *et al.* (2006) utilizaram vinte e sete instâncias derivadas do CVRP (TOTH; VIGO, 2002) e cinco instâncias reais da indústria moveleira italiana. Nas instâncias oriundas da literatura, o número de clientes varia de 15 a 100, com um total de caixas variando de 26 a 199 unidades. Já as instâncias reais apresentam de 44 a 64 clientes e um total de caixas variando de 141 a 181 unidades. O número de veículos é determinado de modo a garantir a existência de soluções factíveis. Duas versões do algoritmo proposto são consideradas, com um ou múltiplos inícios.

Nos testes com as instâncias da literatura, as restrições de carregamento são consideradas em conjunto e em separado. Quando as restrições de fragilidade são desconsideradas a distância total diminui, na média, 2,66%, quando as restrições de carregamento seqüencial são desconsideradas a distância total diminui 8,74% e desconsiderando as restrições de área mínima de suporte, a distância total diminui 9,86%. Se somente restrições de sobreposição são consideradas, o ganho na distância total chega a 15,87%.

Os testes realizados com instâncias reais foram realizados considerando limite no tempo

de processamento de 1 hora, 10 horas e 24 horas, apresentando decréscimo na distância total de 33,7%, 35,3% e 37,8%, respectivamente.

Araújo (2006) desenvolve uma heurística construtiva com múltiplos inícios para o carregamento de contêineres, propondo uma abordagem baseada em cubóides (que podem ser caracterizados como conjuntos de itens demandados por certo cliente) de tamanho variável. Este algoritmo é posteriormente aplicado pelo autor na implementação de um método de Busca em Vizinhança Variável para tratar o problema *bin packing 3D* (neste caso, os *bins* representam um conjunto previamente definido de contêineres a serem carregados com itens de vários clientes). O desempenho destes algoritmos é avaliado a partir de diversos conjuntos de instâncias com diferentes grupos de restrições (tais como estabilidade, empilhamento e distribuição de peso). Testes computacionais revelam que o uso de cubóides de tamanho variável é uma abordagem efetiva, mesmo para conjuntos de itens com um alto grau de heterogeneidade, e que o uso de heurísticas construtivas é uma alternativa simples e competitiva quando comparada com outras metaheurísticas disponíveis na literatura para estes problemas. Por fim, este estudo apresenta a integração destes métodos desenvolvidos ao PRV. Foi proposto aqui um algoritmo de Busca Tabu que invoca os procedimentos de carregamento anteriormente apresentados. Este algoritmo é aplicado nas mesmas instâncias constantes no trabalho de Gendreau *et al.* (2006), tendo apresentado melhor desempenho tanto para a distância total percorrida como para o número de veículos utilizados.

Moura e Oliveira (2009) apresentam duas estratégias de resolução para o 3L-VRP com janelas de tempo. A primeira estratégia trata o problema de forma sequencial, na qual os roteiros e os carregamentos são planejados ao mesmo tempo. O processo de resolução considera a relaxação de duas restrições: cada cliente atendido por somente um veículo e a acomodação da carga segundo o sistema LIFO. No método sequencial três abordagens de busca são aplicadas: a simulação Monte Carlo, uma heurística de busca local e o GRASP. Estas três abordagens utilizam uma Lista de Candidatos Sequencial – LCS, e a mesma heurística construtiva para gerar as rotas. A simulação Monte Carlo gera de forma iterativa, soluções aleatórias construídas a partir da LCS. A busca local gera uma solução inicial com a mesma heurística construtiva, iniciando por uma solução aleatória construída a partir da LCS. Então, uma fase de busca local, baseada em

uma vizinhança do tipo 2-opt da LCS é aplicada. O GRASP constrói sobre o paradigma de uma Lista de Candidatos Restritos – LCR uma solução inicial. Seguindo este paradigma, o próximo candidato a ser inserido na solução é escolhido aleatoriamente com uma determinada probabilidade a partir de uma *lista elite* definida pelo ranqueamento de todos os candidatos ainda não inseridos na solução. Cinco diferentes esquemas de ranqueamento dão origem a cinco diferentes variantes para o GRASP. Para melhorar a solução inicial, um procedimento de busca local é aplicado utilizando uma estratégia de 2-opt.

A segunda estratégia utiliza uma abordagem hierárquica, considerando todas as restrições impostas ao problema. A principal diferença em relação à estratégia anterior é de que o problema de carregamento é considerado um sub-problema da roteirização de veículos com janelas de tempo. Portanto, na primeira fase, os roteiros são construídos e somente após isso, para cada roteiro, os itens são organizados sobre o espaço de carga. Além disso, todas as restrições são consideradas. Nesta abordagem hierárquica, os dados do problema são representados em uma *lista de clientes*, na qual a cada cliente é alocada a totalidade de sua demanda. O processo de resolução é composto de três fases: *construtiva*, *pós-construtiva* e *busca local*. Na fase construtiva, os roteiros são construídos utilizando o GRASP e desconsiderando a acomodação da carga. A função-objetivo do problema da roteirização com janelas de tempo consiste na minimização do número de veículos e na minimização do tempo de viagem total. Como resultado, alguns roteiros viáveis são construídos. A seguir, o algoritmo tenta reduzir o número de roteiros. Por último, a busca local é executada. Esta busca local tem como objetivo melhorar a solução inicial e tentar minimizar o tempo total de viagem. Então, para cada roteiro, os itens são organizados no espaço de carga utilizando uma heurística construtiva do tipo gulosa. O objetivo é minimizar o espaço ocioso no compartimento no veículo. Ao final da fase construtiva, gera-se uma solução com pares factíveis de roteiros e carregamentos. Na fase pós-construtiva o algoritmo busca pelo par (roteiro-carregamento) que tem a menor utilização do espaço de carga e tenta inserir todos os clientes daquele par em outros pares cujos veículos ainda tenham espaço disponível. Se todos os clientes estão inseridos em outros roteiros sem violar qualquer restrição, uma melhoria na solução é obtida devido à diminuição do número de veículos. A última fase é um procedimento de busca local. O principal objetivo é realizar uma busca na vizinhança da solução corrente com o objetivo de encontrar uma melhor em termos de tempo total de viagem.

Se uma solução melhor é encontrada, esta se torna uma nova solução corrente. Uma vizinhança é construída de dois modos diferentes, cada uma delas usando o procedimento de melhoria 2-opt. Estes procedimentos são aplicados sequencialmente, primeiro para cada par (trocas intra-rota) e depois entre todos os pares (trocas inter-rotas). Uma solução melhor é aceita usando uma estratégia “primeira melhoria”, isto é, quando a solução melhor é encontrada se torna a nova solução corrente.

Os testes computacionais foram realizados com uma série de problemas já existentes na literatura e outros gerados pelos próprios autores. Em todas as instâncias do problema, a abordagem hierárquica sempre apresentou melhores resultados no tocante ao tempo total dos roteiros. Porém, esta estratégia não apresentou bom resultado, a medida que o número de itens aumentava. Estes dois efeitos foram considerados resultado do domínio do problema de roteirização com janelas de tempo nesta abordagem. A estratégia seqüencial se mostrou mais adequada para problemas no qual o problema do carregamento tem impacto maior sobre a solução total final.

Portal *et al.* (2009) apresentam uma abordagem de resolução para o 3L-CVRP através da aplicação da Busca Tabu, na qual a construção dos roteiros e do carregamento é feita de forma simultânea. A solução inicial é gerada com a aplicação da versão seqüencial do Método das Economias de Clarke e Wright (1964), sendo que a cada vez que um cliente é inserido em uma rota é acionada uma heurística de carregamento que fornece uma determinada solução para organização dos respectivos itens que pode ser ineficaz.

A heurística de carregamento insere os itens de um determinado cliente na ordem em que são lidos, acomodando-os a partir do fundo do compartimento de carga. O carregamento é feito considerando como limites as medidas de altura e largura do compartimento de carga, porém com comprimento igual a duas vezes o seu valor real. O valor utilizado para avaliar um certo carregamento é o máximo valor utilizado em relação ao comprimento. Se não foi possível realizar o carregamento, um valor infinito é atribuído a este. Caso contrário, armazena-se o possível excesso utilizado no comprimento (maior que o comprimento original mas ainda menor do que duas vezes seu valor original), bem como o possível excesso de peso. Estes valores são

usados posteriormente para avaliar a qualidade da solução. Uma tentativa de factibilizar um certo carregamento é feita com o uso de uma busca local do tipo *primeira melhoria* a qual procederá uma troca de posição entre itens adjacentes.

Na etapa seguinte é aplicada uma Busca Tabu para melhoria dos roteiros. A avaliação de uma dada solução é feita com a mesma função-objetivo utilizada por Gendreau *et al.* (2006) (Equação 19), porém sem o quarto membro desta.

Um estudo comparativo foi realizado com as mesmas instâncias de Gendreau *et al.* (2006) e considerando as respectivas restrições de fragilidade, área mínima de suporte e carregamento seqüencial. Os testes computacionais indicaram um resultado ligeiramente melhor, com uma redução de 0,25% no custo final médio da solução.

Fuellerer *et al.* (2010) estendem ao caso do 3L-CVRP, uma abordagem de Otimização por Colônia de Formigas apresentada em Fuellerer *et al.* (2009) para resolução do 2L-CVRP. A roteirização é feita por algoritmo baseado em sistema de formigas que re-utiliza algumas características bem-sucedidas do Método das Economias baseado em OCF para resolução do CVRP. As modificações no método têm como base a introdução de uma medida de visualização adicional relacionada ao carregamento.

Para computar alguma infactibilidade potencial do roteiro, inicialmente é verificado se a restrição de peso não é violada, aplicando-se a seguir limites mínimos para o problema de *bin packing* tridimensional. Se os limites mínimos não provam a infactibilidade, são aplicadas repetitivamente as duas heurísticas construtivas utilizadas por Gendreau *et al.* (2006).

Este algoritmo de Otimização por Colônias de Formigas para resolução do 3L-CVRP foi testado no mesmo conjunto de instâncias utilizado por Gendreau *et al.* (2006). Os resultados obtidos apresentaram uma melhora de 6,43% no custo final médio da solução.

Os trabalhos descritos nas seções 6.1 e 6.2 deste capítulo formam a literatura disponível até o momento sobre as abordagens integradas de roteirização e carregamento de veículos. O



próximo capítulo apresenta um novo modelo com restrições de carregamento tridimensionais que considera ainda o tempo máximo de ciclo, a distribuição de peso nos eixos do veículo e diferentes tipos de veículos.

## **7 PROPOSIÇÃO DE UM MODELO PARA RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DA ROTEIRIZAÇÃO E DO CARREGAMENTO DE VEÍCULOS**

A integração das restrições de carregamento bidimensional e tridimensional ao PRV resulta em uma nova variante para este problema com um significativo potencial em termos de aplicação prática e de novos desenvolvimentos. O problema do carregamento, por sua vez, vem sendo tratado há tempo, porém sem uma aplicação concreta no caso específico do carregamento de veículos, o qual apresenta certas particularidades.

Os modelos que tratam do carregamento tridimensional descritos na literatura, carecem de uma visão mais alinhada com as operações reais que ocorrem no transporte rodoviário de cargas, especialmente no sistema de distribuição via centro de triagem ou distribuição. O modelo proposto, que é descrito neste capítulo, visa preencher esta lacuna.

Na seção 7.1 será feita a definição do problema que serviu de base para o desenvolvimento do modelo. A seção 7.2 apresenta a justificativa para a abordagem de resolução adotada e as características do modelo. A apresentação e descrição das etapas de resolução que compõem o modelo é feita na seção 7.3. Por último, a seção 7.4 aborda a implementação computacional do modelo.

### **7.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA**

O problema que serve de base para o desenvolvimento do modelo de resolução da roteirização e carregamento de veículos proposto nesta tese provém de atividades cotidianas das empresas de transporte rodoviário de cargas que operam o sistema de distribuição via centro de triagem e dos prestadores de serviços logísticos que efetuam entregas a partir de centros de distribuição. Tais atividades referem-se ao planejamento operacional destas empresas, que é renovado diariamente conforme as solicitações feitas pelos clientes. O relato das atividades

apresentado a seguir foi elaborado a partir da experiência profissional do autor e entrevistas realizadas com supervisores operacionais de transportadoras e de prestadores de serviços logísticos.

A estrutura para execução destas atividades compreende os seguintes elementos:

- a) centro de triagem ou distribuição;
- b) frota fixa de veículos (que podem ser próprios ou de terceiros);
- c) veículos extras que podem ser agregados conforme a necessidade;
- d) tripulações formadas por motoristas e ajudantes.

Esta estrutura é complementada pelos equipamentos de movimentação de cargas, além dos conferentes e auxiliares.

Diariamente, uma frota de veículos é despachada de um centro de triagem ou centro de distribuição para efetuar as entregas que são solicitadas por clientes localizados na região de atendimento de tal centro. Em geral, as solicitações dos clientes são processadas no final da tarde ou no período da noite para entrega no dia seguinte. Os itens demandados por cada cliente são agrupados, conferidos e enviados para as docas de embarque.

Paralelo a isso, um despachador analisa as quantidades totais demandadas, os locais das entregas e os veículos disponíveis, definindo então a seqüência de entregas (roteiro) que cada veículo irá realizar. Uma vez conhecidas as cargas que serão embarcadas em cada veículo é feito o arranjo dos itens no compartimento de carga de modo a:

- a) facilitar seu manuseio e conferência durante a descarga;
- b) preservar sua integridade conforme exista alguma observação relacionada à

fragilidade, ao limite de empilhamento e à estabilidade;

- c) possibilitar uma distribuição adequada do peso da carga sobre os eixos do veículo.

Aspectos que trazem complexidade adicional para este trabalho de planejamento advém da possibilidade de alocar veículos com diferentes capacidades, do tempo de ciclo que pode ser definido para cada tripulação conforme a jornada de trabalho estabelecida, da possibilidade de aproveitamento de veículos em mais de uma rota e da consideração de metas relacionadas ao custo operacional do transporte.

Após o carregamento, os veículos estão prontos para atender as rotas. Partindo do centro de triagem ou distribuição no início da manhã cada veículo se desloca até o primeiro cliente indicado em sua rota. Chegando aí transcorre um tempo de espera (devido a conferência e registro da documentação e filas de outros veículos que aguardam atendimento) até a efetiva descarga dos itens. Após sua liberação deste cliente, o veículo repete esta operação nos clientes seguintes até o último designado em sua rota, retornando então ao centro de triagem ou distribuição. Se houver tempo disponível para cumprir um segundo roteiro no dia, o veículo é novamente carregado e despachado para entregas.

## 7.2 JUSTIFICATIVA PARA A ABORDAGEM ADOTADA E CARACTERÍSTICAS DO MODELO PROPOSTO

A natureza combinatorial e o elevado grau de complexidade dos problemas de roteirização e carregamento de veículos constituem aspectos decisivos a serem considerados quando é definida uma estratégia de resolução. Além destes aspectos matemáticos básicos, há a necessidade de tratar elementos práticos da operação em análise, contribuindo diretamente para tornar o modelo mais adequado a realidade. Esta sintonia entre modelo e realidade constitui um dos principais desafios enfrentados durante a elaboração de uma estratégia de resolução para o problema de roteirização, bem como do problema de carregamento. Assim, tal estratégia deve ser

suficientemente flexível para descrever a realidade que está sendo considerada.

Levando em conta as considerações feitas acima foi escolhida uma abordagem aproximativa para o desenvolvimento do modelo aqui proposto para resolução do problema de roteirização e carregamento de veículos. Nota-se que esta abordagem foi adotada para os demais trabalhos que tratam deste problema apresentados na literatura (conforme apresentado na seção 6.2) com resultados que se mostram bastante satisfatórios em termos de tempo de processamento computacional e qualidade das soluções.

O modelo proposto é definido como um método aproximativo composto por uma heurística de carregamento (que combina um procedimento construtivo com uma busca local), uma heurística de roteirização (que corresponde a um procedimento de economia e inserção) e uma metaheurística (classificada como método de trajetória).

A adoção de tal estrutura para o modelo é justificada da seguinte forma:

- a) o uso de heurísticas facilita a consideração das características de ordem prática do problema;
- b) a complexidade do problema torna bastante difícil e limitado o tratamento por abordagens exatas de programação matemática;
- c) o tempo de processamento computacional deve ser reduzido uma vez que o problema corresponde a uma decisão operacional que deve ser tomada no menor prazo possível;
- d) o bom desempenho apresentado pelas metaheurísticas para exploração de soluções de boa qualidade, mesmo em problemas complexos;
- e) a abordagem aproximativa é uma tendência observada na literatura mas que devido ao reduzido número de trabalhos sobre a integração entre roteirização e

carregamento pode ser intensamente explorada.

A escolha da Busca Tabu, de modo particular, se justifica pela facilidade de adaptação de seu algoritmo as características do problema em análise. Segundo Golden *et al.* (1998) os algoritmos de Busca Tabu para o PRV tem a capacidade de incorporar vários componentes que formam a base desta metaheurística, como a definição da vizinhança, as memórias de curto e longo prazo e os critérios de aspiração.

A partir da abordagem de resolução definida, são estabelecidas as seguintes características para o modelo proposto:

- a) determina roteiros de percurso mínimo com início e fim no centro de triagem ou distribuição;
- b) é caracterizado como um CVRP com restrições de carregamento tridimensional (3L-CVRP) e ao contrário dos trabalhos de Gendreau *et al.* (2006), Araújo (2006), Portal *et al.* (2009) e Fuellerer *et al.* (2010) considera restrições de distribuição de peso nos eixos do veículos e de tempo máximo para jornada de trabalho;
- c) constrói roteiros e carregamentos de forma simultânea, a semelhança de Gendreau *et al.* (2006), Araújo (2006), Moura e Oliveira (2009), Portal *et al.* (2009) e Fuellerer *et al.* (2010);
- d) ao contrário dos trabalhos de Gendreau *et al.* (2006), Araújo (2006), Portal *et al.* (2009) e Fuellerer *et al.* (2010) determina somente soluções iniciais factíveis em termos de carregamento tridimensional e tempo máximo de ciclo;
- e) as demandas são conhecidas antecipadamente (determinísticas), a semelhança de Gendreau *et al.* (2006), Araújo (2006), Moura e Oliveira (2009), Portal *et al.* (2009) e Fuellerer *et al.* (2010);

- f) diferentemente dos trabalhos de Gendreau *et al.* (2006), Araújo (2006), Portal *et al.* (2009) e Fuellerer *et al.* (2010) não é estipulado um número máximo de veículos para solução inicial, uma vez que na prática veículos extras podem ser agregado quando necessário;
- g) constrói rotas para veículos idênticos e também analisa a possibilidade de inserção de veículo de maior ou menor capacidade, diferentemente dos trabalhos de Gendreau *et al.* (2006), Araújo (2006), Moura e Oliveira (2009), Portal *et al.* (2009) e Fuellerer *et al.* (2010) que tratam somente de veículos idênticos;
- h) a semelhança dos trabalhos de Gendreau *et al.* (2006), Araújo (2006), Moura e Oliveira (2009), Portal *et al.* (2009) e Fuellerer *et al.* (2010) lida com itens tridimensionais que apresentam restrições de fragilidade, área mínima de suporte, carregamento sequencial;
- i) os clientes podem receber mais de um tipo de item e vários itens de um mesmo tipo, fato considerado somente por Moura e Oliveira (2009);
- j) se houver possibilidade, um veículo é alocada a mais de uma rota por dia, fato não considerado pelos trabalhos de Gendreau *et al.* (2006), Araújo (2006), Moura e Oliveira (2009), Portal *et al.* (2009) e Fuellerer *et al.* (2010);
- k) calcula o custo operacional relativo a cada roteiro após a determinação da solução inicial e após a fase de melhoria, fato não considerado por Gendreau *et al.* (2006), Araújo (2006), Moura e Oliveira (2009), Portal *et al.* (2009) e Fuellerer *et al.* (2010).

### 7.3 APRESENTAÇÃO E DESCRIÇÃO DO MODELO

A estratégia de resolução proposta nesta tese contempla duas etapas. Na primeira delas, os roteiros e a acomodação dos itens no compartimento de carga são definidos simultaneamente, respeitando as restrições de carregamento tridimensionais (fragilidade, área mínima de apoio e carregamento seqüencial) e do tempo máximo de jornada de trabalho. É definida assim a frota máxima de veículos que deverá ser empregada. Conhecidos os roteiros que formam a solução inicial e os seus respectivos tempos de percurso, é analisada a possibilidade de alocar mais de um roteiro a um dado veículo. Ao final desta etapa é calculado um valor inicial para o custo operacional total do transporte.

Na segunda etapa busca-se uma melhoria da solução inicial através da aplicação de um algoritmo de Busca Tabu sobre os roteiros definidos na etapa anterior. Esta melhoria visa reduzir ainda mais a distância percorrida nos roteiros. As iterações realizadas nesta etapa consideram infactibilidades nas restrições citadas acima (exceto para aquelas de carregamento tridimensional), possibilitando uma exploração mais ampla do espaço de busca. Nesta etapa busca-se também factibilizar a distribuição de peso nos eixos. Uma vez atingido o critério de parada é escolhida a solução com melhor valor para a função objetivo e na qual todas as restrições são factibilizadas. Ao final desta etapa, é re-avaliada a possibilidade de alocar mais de um roteiro a um veículo, sendo calculado novamente o custo operacional total do transporte.

A Figura 7 ilustra a seqüência dos procedimentos gerais de execução do modelo nas duas etapas que compõem a estratégia de resolução, conforme descrição feita acima.



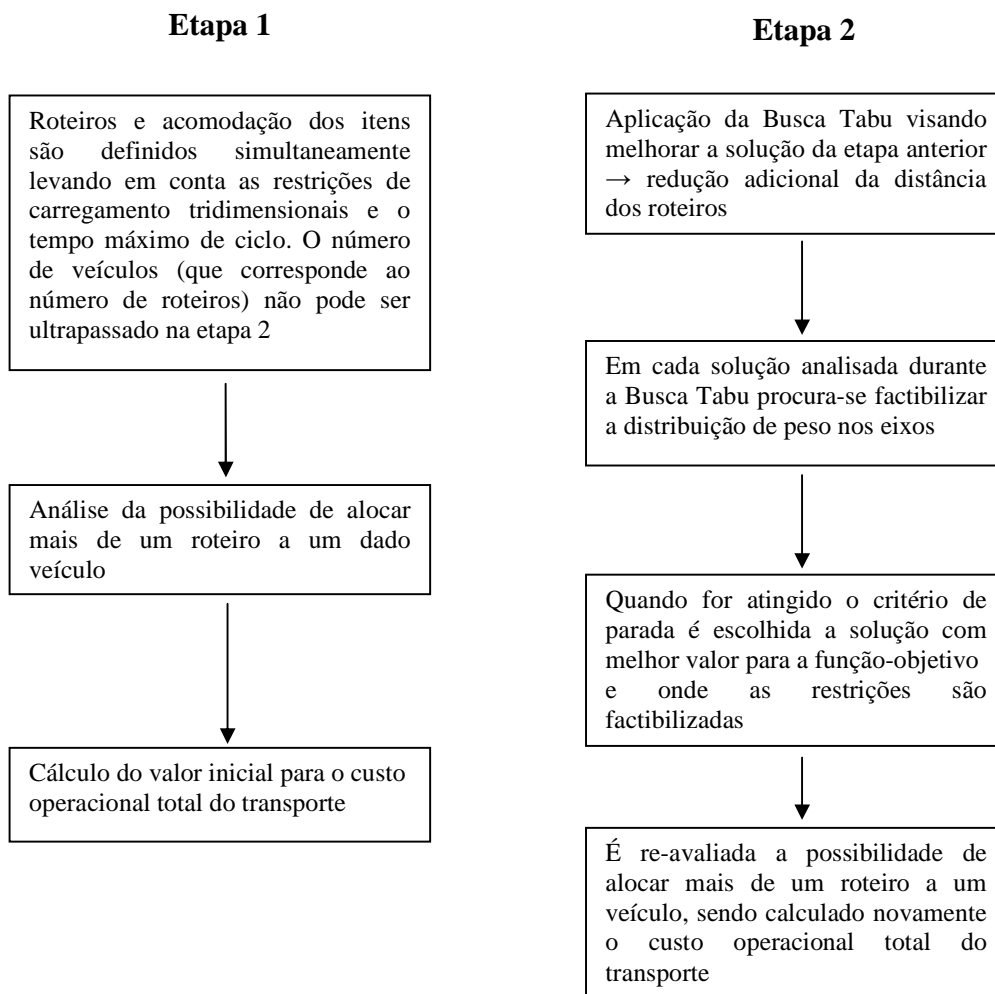


Figura 7 - Seqüência dos procedimentos gerais de execução do modelo  
Fonte: O autor

A seguir são comentados em detalhes os procedimentos que compõem o modelo proposto.

### 7.3.1 Representação do Carregamento

Os problemas de carregamento que consideram o arranjo de itens tridimensionais requerem, para sua adequada resolução, que seja adotada uma forma eficiente de representação em termos computacionais do compartimento de carga do veículo e dos respectivos itens que aí

são acomodados. Portal *et al.* (2009) destacam que esta necessidade surge do significativo número de vezes em que o procedimento de carregamento invoca a inserção e movimentação de itens. Deve-se propiciar também uma consulta fácil a itens adjacentes a um outro.

Tendo em vista esta necessidade foi adotada, a exemplo de Portal *et al.* (2009), como forma de representação do carregamento a matriz dinâmica proposta por Ngoi *et al.* (1994), na qual pode ser feita a representação do compartimento de carga em duas dimensões usando o menor número possível de células em cada dimensão da matriz. Cada item é representado pelas células ocupadas, sendo que no início uma célula representa todo o espaço livre no compartimento de carga. Na medida em que novos itens são inseridos, as células da matriz vão sendo subdivididas de acordo com a necessidade. A matriz bidimensional gerada armazena ainda, para cada uma de suas células, a altura correspondente. Armazena-se, complementarmente, duas listas com o tamanho das células em cada uma das dimensões.

Portal *et al.* (2009) apresentam o seguinte exemplo que ilustra a aplicação da matriz dinâmica: dado um veículo vazio cujo compartimento de carga tem dimensões  $W = 25$ ,  $H = 30$  e  $L = 60$ , a estrutura inicial é uma matriz  $1 \times 1$  representando tal espaço de carga disponível (Figura 8a). O número em cada célula indica a altura ocupada do compartimento naquela porção. Após a inserção de um elemento  $I_1$  com dimensões  $w_1 = 10$ ,  $h_1 = 20$  e  $l_1 = 25$  na posição  $s_1 = (0, 0, 0)$  ocorrerá uma modificação como mostrado na Figura 8b. O compartimento é subdividido em quatro partes retangulares, sendo que a primeira contém o elemento  $I_1$ , com altura 20. As outras três mantêm-se com altura 0. Inserindo-se, então, um elemento  $I_2$  com dimensões  $w_2 = 8$ ,  $h_2 = 17$  e  $l_2 = 20$  na posição  $s_2 = (10, 0, 0)$  obtém-se o resultado apresentado pela Figura 8c. Percebe-se, com esta inserção, que o compartimento ficou mais subdividido e que a única célula que correspondia à altura 20 dividiu-se em duas células com altura 20. Por fim, com a inserção de um elemento  $I_3$  com dimensões  $w_3 = 10$ ,  $h_3 = 13$  e  $l_3 = 20$  na posição  $s_3 = (10, 17, 0)$ , a estrutura é atualizada, como mostrado na Figura 8d. Neste caso, uma das dimensões do elemento inserido corresponde ao tamanho da célula onde este foi inserido e, assim, apenas uma dimensão do compartimento foi subdividida.

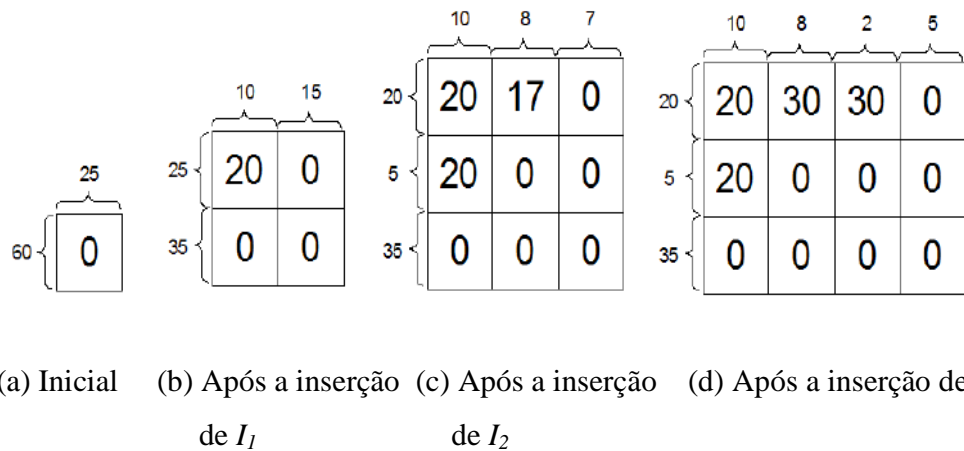


Figura 8 - Representação da matriz bidimensional de carregamento  
 Fonte: Portal *et al.* (2009)

Entretanto, por ser bidimensional, esta estrutura não possibilita uma informação completa sobre a altura efetivamente ocupada, uma vez que se um item for inserido numa posição e ficar com uma pequena parte sem apoio, a porção imediatamente abaixo ficará perdida, mesmo que esteja livre. Isto acontece porque a representação da altura é feita como uma vista superior do compartimento de carga, resultando em perda de informação quando um item que está no topo da carga não estiver totalmente apoiado (base de apoio menor que 100%) sobre o que está abaixo. Como a restrição de exigência de base mínima de apoio é de 75% para o problema em questão, esta representação traz limitações em visualizar espaços ociosos no carregamento.

Para contornar esta situação foram introduzidas no modelo aqui proposto algumas modificações na estrutura da matriz dinâmica de modo a trabalhar com múltiplas vistas. A partir de uma matriz principal são geradas sub-matrizes que representam o espaço ocupado pela altura de itens com altura inferior ao item que está no topo do carregamento. Nestas sub-matrizes a leitura é feita a partir da base de caixas que estão acima e não possuem apoio da base de 100%. Com isso, obtiveram-se melhores resultados no tocante ao uso de espaços ociosos.

### 7.3.2 Heurística de Carregamento

O desenvolvimento de um procedimento específico para construção de carregamentos tridimensionais requer que sejam consideradas as características físicas dos itens (dimensões, pesos, fragilidade), bem como a diversidade e as quantidades solicitadas pelos clientes. Desta forma, estarão sendo representadas de forma adequada no modelo as características dos carregamentos que são manuseados diariamente pelas empresas transportadoras e pelos prestadores de serviços logísticos.

A heurística de carregamento foi desenvolvida de modo a lidar com situações onde:

- a) os itens são de tamanho real e representam a diversidade de dimensões (pequenas, médias e grandes) encontradas nas operações reais;
- b) existe repetição de itens destinados a um único cliente;
- c) a organização dos itens destinados a um cliente no compartimento de carga é feita de forma que facilite o manuseio e conferência durante a descarga. Para atender esta necessidade possibilita-se a construção de agrupamentos de itens na forma cubos, pilhas e grupos de pilhas.

Na heurística de carregamento o compartimento de carga é representado como um espaço cartesiano  $x$ - $y$ - $z$  onde estas dimensões correspondem respectivamente as dimensões  $W$ - $H$ - $L$ .

São descritos a seguir os dois procedimentos que formam a heurística de carregamento que são o *agrupamento de itens* e a *construção do carregamento*.

### 7.3.2.1 Procedimento de agrupamento dos itens

Este procedimento é acionado sempre que a carga destinada a um cliente que está sendo inserido em um roteiro for composta por um conjunto de itens idênticos. Como resultado tem-se agrupamentos de itens, organizados na forma de cubos, pilhas ou grupos de pilhas com largura de até 1,2 metros. As Figuras 9, 10 e 11 mostram os tipos de agrupamentos feitos pelo procedimento.

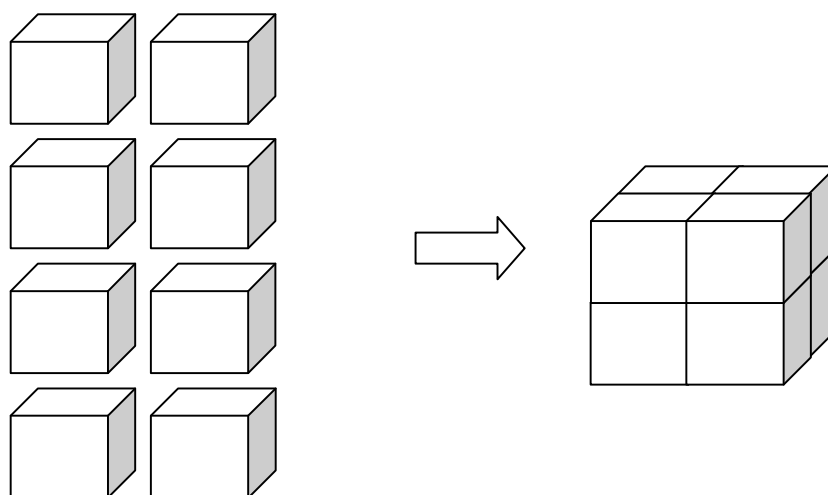


Figura 9 - Agrupamento de itens em cubos  
Fonte: O autor

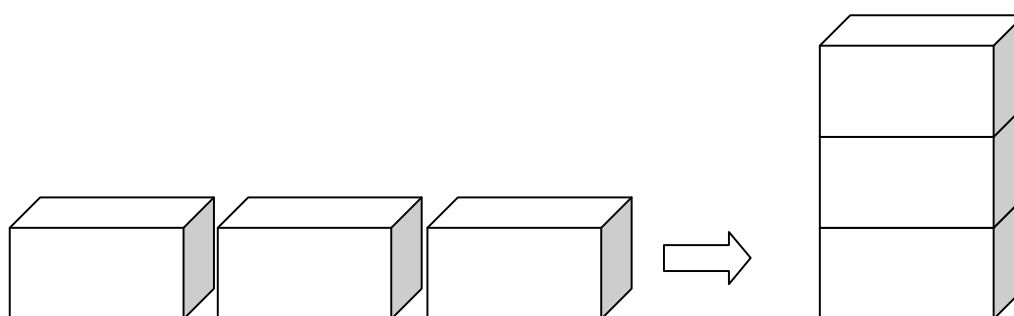


Figura 10 - Agrupamento de itens em pilhas  
Fonte: O autor

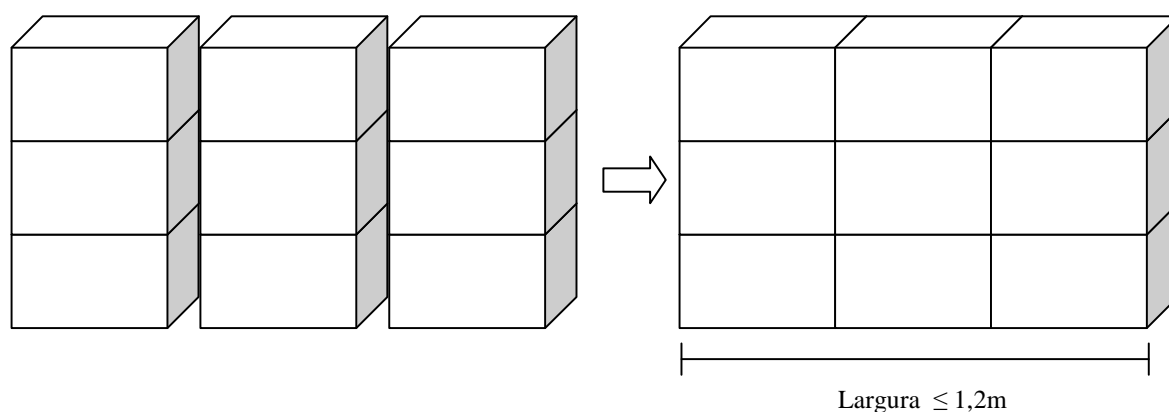


Figura 11 – Conjunto de pilhas  
Fonte: O autor

Eley (2002) emprega a estratégia de agrupamento de itens idênticos na resolução Problema do Carregamento de Contêineres. Além de providenciar uma melhor organização dos itens no compartimento de carga o agrupamento auxilia a reduzir o tempo de processamento do procedimento de construção do carregamento, já que vários itens passam a ser tratados como um único.

O agrupamento de itens idênticos ocorre quando é feita a leitura da lista dos itens destinados a um certo cliente. O pseudocódigo do algoritmo do procedimento de agrupamento dos itens é apresentado na Figura 12.

No procedimento da Figura 12, uma primeira análise (linha 2) é feita sobre a possibilidade dos itens formarem um cubo com largura que não ultrapasse a largura do compartimento de carga. Por serem mais estáveis, a altura dos cubos tem como limite de altura do compartimento de cargas.

Se não for possível a formação de cubos é avaliada a formação de pilhas (linha 5). Neste tipo de agrupamento, itens idênticos são colocados uns sobre os outros até atingirem um total de 10 itens. Se não for possível formar pilhas com esta quantidade de itens, toma-se como referência um número de itens na pilha com até 6 vezes a medida do menor lado do item considerado, o que favorece a organização de itens maiores. Em ambas situações a altura resultante da pilha é

comparada com a altura interna do compartimento de carga. Se pilhas forem formadas, tenta-se a seguir construir grupo com largura de até 1,2 metros de modo a preservar sua estabilidade.

	<b>Procedimento</b> agrupamento de itens
1	<b>Para</b> cada conjunto de itens iguais de um cliente da lista / <b>faça</b>
2	<b>Se</b> quantidade do conjunto é divisível por 4 e $2 * \text{menor lado do item} < \text{largura do veiculo}$ <b>então</b>
3	Une itens em cubos com quantidade que respeite altura do compartimento de carga
4	<b>Senão</b>
5	Une itens em pilhas com quantidade que respeite altura do compartimento de carga
6	Une pilhas lado a lado enquanto dimensão de união $\leq 1,2\text{m}$
7	<b>Fim se</b>
8	<b>Fim para</b>

Figura 12 – Pseudo-código do procedimento de agrupamento de itens

Fonte: O autor

A medida que os agrupamentos são formados, passam na seqüência a serem organizados no compartimento de carga pelo procedimento de construção do carregamento.

### 7.3.2.2 Procedimento de construção do carregamento

Para obter uma solução inicial para o carregamento foi empregado um procedimento que segue em linhas gerais a heurística construtiva utilizada inicialmente por Gendreau *et al.* (2006) (denominada  $BL_{3L-SV}$ ) e posteriormente por Portal *et al.* (2009) e Fuellerer *et al.* (2010). Entretanto, algumas mudanças foram introduzidas nesta heurística, especialmente na etapa de melhoria, objetivando adapta-la a situação em que são permitidos somente carregamentos factíveis (a exceção da distribuição de peso nos eixos).

A Figura 13 mostra o pseudo-código do procedimento de construção do carregamento.

	<b>Procedimento</b> construção do carregamento
1	<b>Para</b> cada item (ou agrupamento) $m_i$ <b>faça</b>
2	Busca pontos com menor valor na ordenação $z$ , $x$ e $y$ , respectivamente onde o item $m_i$ pode ser inserido na
3	matriz verificando suas dimensões
4	Verificar restrições:
5	<b>Para</b> cada ponto <b>faça</b>
6	<b>Se</b> neste ponto o item $m_i$ tem ao menos dois apoios laterais e respeita as restrições
7	Modifica a estrutura de dados para incluir $m_i$ na célula da matriz referenciada por este ponto
8	Sai do loop
9	<b>Fim se</b>
10	Rotaciona o item $m_i$ $90^\circ$ ao redor do eixo $y$
11	<b>Se</b> neste ponto o item $m_i$ tem ao menos dois apoios laterais e respeita as restrições
12	Modifica a estrutura de dados para incluir $m_i$ nas células da matriz referenciada por este ponto
13	Sai do loop
14	<b>Fim se</b>
15	<b>Fim para</b>
16	<b>Se</b> o item $m_i$ não foi inserido
17	<b>Para</b> cada ponto <b>faça</b>
18	<b>Se</b> neste ponto o item $m_i$ respeita as restrições
19	Modifica a estrutura de dados para incluir $m_i$ nas células da matriz referenciada por este ponto
20	Sai do loop
21	<b>Fim se</b>
22	Rotaciona o item $m_i$ $90^\circ$ ao redor do eixo $y$
23	<b>Se</b> neste ponto o item $m_i$ respeita as restrições
24	Modifica a estrutura de dados para incluir $m_i$ nas células da matriz referenciada por este ponto
25	Sai do loop
26	<b>Fim se</b>
27	<b>Fim para</b>
28	<b>Fim se</b>
29	<b>Se</b> o item $m_i$ não foi inserido
30	Desiste do carregamento
31	<b>Fim se</b>
32	<b>Fim para</b>
33	Retorna a ocupação máxima do compartimento de carga na dimensão $z$

Figura 13 – Pseudo-código do procedimento de construção do carregamento  
Fonte: O autor



Na Figura 13 cada item (ou agrupamento) é inserido na posição com menor valor para a coordenada  $z$  que tenha pelo menos dois apoios laterais disponíveis, (propiciando contenção lateral (linha 6). Busca-se assim ocupar primeiramente o fundo do veículo e no sentido da esquerda para a direita. Em caso de empate, considera-se o menor valor na coordenada  $x$  e se ocorrer um segundo empate, o menor valor da coordenada  $y$  (linha 18). Quando um item é chamado da lista, a primeira posição a ser testada considera sua maior dimensão (no plano  $w-l$ ) colocada paralela a dimensão  $W$  do compartimento de carga. Se não for possível realizar esta inserção no espaço disponível é feita então a rotação de  $90^\circ$  no plano  $w-l$  (linhas 10 e 22). Dessa forma, considerando um compartimento de carga vazio, o primeiro item é sempre inserido na origem, conforme Figura 14. Na medida em que o carregamento é construído são verificadas as restrições de fragilidade, área mínima de apoio e carregamento sequencial. Se, após uma primeira rodada, não exista ponto para inserção do item que respeite as restrições de carregamento e de dois apoios laterais disponíveis, a lista de pontos é verificada novamente sem verificação das laterais de apoios.

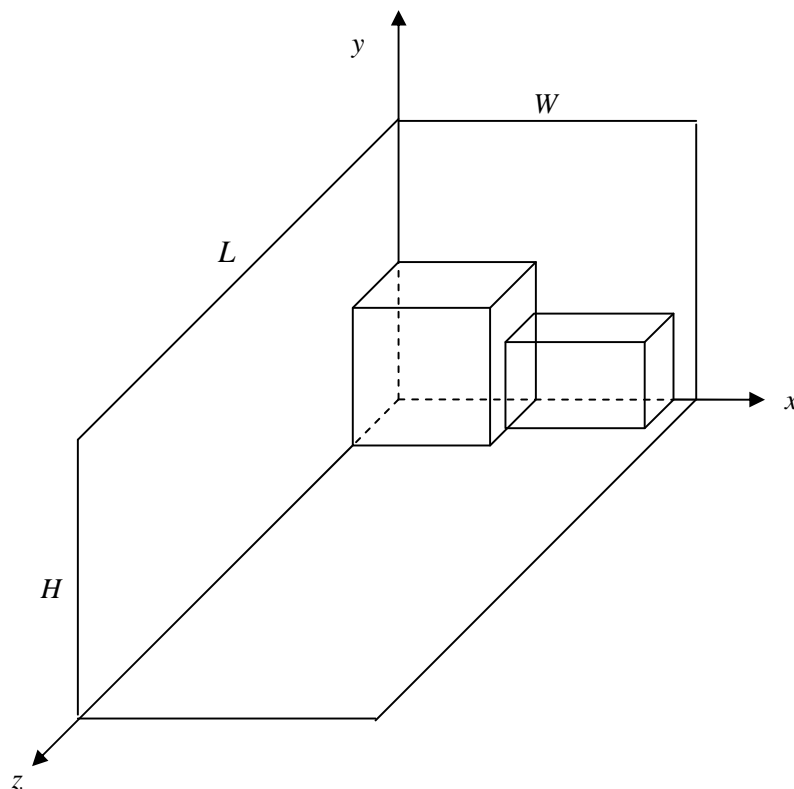


Figura 14 – Ordem de inserção dos itens no compartimento de carga  
Fonte: O autor

Depois que os itens de um cliente da rota que está sendo construída são acomodados no veículo é executado pela primeira vez o procedimento de melhoria do carregamento. Este procedimento consiste em uma heurística do tipo *primeira melhoria* no qual é feita a troca da ordem em que os itens são inseridos conforme a leitura na lista (consistindo na verdade em uma troca virtual). A Figura 15 mostra o pseudo-código do procedimento de melhoria do carregamento.

	<b>Procedimento</b> de primeira melhoria
1	Inicializa MelhorOrdem com a ordem inicial de itens
2	Inicializa MelhorAvaliação com valor de avaliação da heurística de carregamento para ordem inicial de itens
3	Executa primeira melhoria:
4	<b>Para</b> o primeiro item da lista até o penúltimo
5	Inicializa OrdemVizinha com MelhorOrdem
6	Troca a posição da carga atual com a próxima dentro da OrdemVizinha
7	Armazena OrdemVizinha na ListadeVizinhos
8	<b>Fim para</b>
9	<b>Para</b> cada OrdemdeCarga da ListadeVizinhos
10	Inicializa NovaAvaliação com o resultado da heurística de carregamento para ordem de cargas
11	<b>Se</b> NovaAvaliação for melhor que MelhorAvaliação <b>então</b>
12	MelhorAvaliação recebe NovaAvaliação
13	MelhorOrdem recebe OrdemdeCarga
14	<b>Ir para</b> Execute primeira melhoria
15	<b>Fim se</b>
16	<b>Fim para</b>

Figura 15 – Pseudo-código do procedimento de primeira melhoria  
Fonte: O autor

As trocas são realizadas duas a duas gerando novas soluções até que todos os itens sejam trocados (linha 7). A lista de trocas gerada é avaliada tomando-se uma a uma as soluções da lista, acomodando-a no espaço de carga, verificando-se o uso da dimensão  $L$  disponível (comprimento original do compartimento de carga) (linha 10). É feita então uma comparação: caso o comprimento corrente tenha sido menor do que o carregamento original (quando os itens foram lidos da lista e acomodados inicialmente), esta passa a ser a melhor solução, interrompe-se a leitura das soluções seguintes e geram-se novas soluções a partir desta melhor (a melhoria é novamente executada) (linha 12). Este procedimento é repetido até que nenhuma das novas

soluções geradas seja melhor do que a solução incumbente. A primeira melhoria será acionada novamente quando da aplicação da Busca Tabu sobre os roteiros.

### 7.3.3 Busca Tabu Aplicada na Melhoria dos Roteiros

Para gerar uma solução inicial foi empregada a versão paralela do método das economias de Clarke e Wright (1964) na qual roteiros são construídos de forma simultânea a partir da leitura de uma lista de economias  $s_{i,j}$  em ordem decrescente dos valores. O algoritmo da versão paralela do Método das Economias é mostrado na Figura 16.

**Algoritmo** da versão paralela do Método das Economias

*Passo 1.* Selecionar um veículo disponível. Caso não haja mais veículos, parar

*Passo 2.* Calcular as economias  $s_{i,j}$  para todos os pares de pontos de parada  $i, j$ :  $s_{i,j} = d_{0,i} + d_{0,j} - d_{i,j}$

*Passo 3.* Ordenar os pares  $i, j$  na ordem decrescente dos valores das economias  $s_{i,j}$

*Passo 4.* Começar pelo par de vértices  $i, j$  com maior economia e proceder na seqüência obtida no *Passo 2*. Para um par  $i, j$  da seqüência, verificar se  $i, j$  estão ou não incluídos em um roteiro existente:

*Passo 4.1.* Se  $i$  e  $j$  não foram incluídos em nenhum dos roteiros já abertos, então criar um novo roteiro com os vértices  $i$  e  $j$  se a(s) restrição(ões) não for(em) violada(s)

*Passo 4.2.* Se exatamente um dos pontos  $i$  ou  $j$  já pertence a algum roteiro pré-estabelecido, verificar se este ponto é o primeiro ou último do roteiro. Se isso ocorrer, acrescentar a ligação  $i, j$  a esse roteiro caso a(s) restrição(ões) não seja(m) violada(s). Caso contrário, desconsiderar o par  $i, j$ .

*Passo 4.3.* Se ambos os vértices  $i$  e  $j$  já pertencem a dois roteiros distintos pré-estabelecidos (roteiros diferentes), verificar se ambos são extremos dos respectivos roteiros (vértices adjacentes a base). Nesse caso, unir os roteiros em um só, se a(s) restrição(s) não for(em) violada(s)

Figura 16 – Algoritmo da versão paralela do Método das Economias  
Fonte: Clarke e Wright (1964)

A solução inicial define uma primeira seqüência de visita aos clientes conforme os critérios do CVRP, sem exceder o peso, o comprimento do compartimento de carga, respeitando as restrições de carregamento tridimensionais e de jornada máxima de trabalho. Para o cálculo das economias  $s_{i,j}$  é definida uma matriz simétrica de distâncias euclidianas (não arredondadas)

entre os pontos. O número de veículos (que corresponde ao número de rotas) é definido nesta etapa, sendo que este valor não poderá ser ultrapassado na fase seguinte de melhoria. Uma modificação pré-melhoria é executada sobre os roteiros resultantes da solução inicial. Este procedimento é idêntico ao movimento intra-rota que será detalhado posteriormente.

O processo de melhoria da solução inicial foi realizado com a aplicação da Busca Tabu, uma metaheurística que, desde sua introdução por Glover (1986), vem sendo largamente empregada na resolução de problemas combinatoriais. O pseudo-código com o procedimento de Busca Tabu para o modelo proposto é mostrado na Figura 17.

Nas linhas de 1 a 5 da Figura 17 é feita a inicialização da Busca Tabu tornando a solução inicial (e a possível pré-melhoria) como solução corrente. Neste estágio também, a solução incumbente (a melhor solução encontrada até o momento) assume o valor da solução corrente. É inicializado também o contador de tempo, uma vez que o critério de parada é um tempo limite de processamento.

A aplicação da Busca Tabu requer inicialmente a definição de um espaço de busca e de uma estrutura de vizinhança. No modelo proposto o espaço de busca foi definido como o conjunto de rotas que satisfaz a todas as restrições, mas ele pode ser explorado considerando também as inactiváveis a fim de favorecer a diversificação. Já a vizinhança é explorada através de dois tipos de movimento: *inserção inter-rotas* e *trocias intra-rota* respectivamente.

Na inserção inter-rotas (linha 12) para cada rota  $j$  toma-se cada um dos  $i$  clientes na seqüência em que aparecem e insere-se cada um destes no final de cada uma das  $k$  outras rotas. O cliente enviado é inserido na rota  $k$  sendo testado em todas as posições adjacentes aos  $n/2$  pares de melhores economias da rota (sendo  $n$  o tamanho da rota para onde foi enviado), o que já constitui um movimento intra-rota (linha 13).

	<b>Procedimento</b> de Busca Tabu para o modelo proposto
1	Inicializa parâmetros gerais a partir da leitura da instância.
2	Inicializa SoluçãoCorrente a partir do método das economias considerando restrições de peso, carregamento
3	tridimensional, distribuição de peso e tempo.
4	Armazena SoluçãoCorrente como a SoluçãoIncumbente
5	Inicializa contador de tempo
6	<b>Enquanto</b> tempo for menor que tempo de critério de parada <b>faça</b>
7	Inicializa MelhorTroca com maior custo possível
8	<b>Para</b> $j=1$ até número de rotas da SoluçãoCorrente
9	<b>Para</b> $i=1$ até número de clientes da rota $j$
10	<b>Para</b> $k=1$ até número de rotas da SoluçãoCorrente sendo $k$ diferente de $j$
11	Inicializa TrocaAtual com SoluçãoCorrente.
12	Insere cliente $i$ da rota $j$ no final da rota $k$ da TrocaAtual.
13	Faz melhoria na rota $j$ e na rota $k$ da TrocaAtual.
14	<b>Se</b> TrocaAtual é melhor que MelhorTroca <b>então</b>
15	MelhorTroca recebe TrocaAtual.
16	<b>Fim se</b>
17	<b>Se</b> MelhorTroca é melhor que SoluçãoCorrente <b>então</b>
18	<b>Vai para</b> ExecutarMovimento.
19	<b>Fim se</b>
20	<b>Fim para</b>
21	<b>Fim para</b>
22	<b>Fim para</b>
23	Inicializa ExecutarMovimento:
24	Armazena MelhorTroca na SoluçãoCorrente
25	<b>Se</b> SoluçãoCorrente for melhor que SoluçãoIncumbente <b>então</b>
26	SoluçãoIncumbente recebe SoluçãoCorrente
27	<b>Fim se</b>
28	<b>Fim enquanto</b>

Figura 17 – Pseudo-código do procedimento de Busca Tabu  
Fonte: O autor

O movimento *intra-rota* (linha 13) inicia quando um cliente é removido da rota  $j$  para a rota  $k$  (seguindo a lógica da inserção inter-rotas). Na rota original ( $j$ ) procura-se trocar cada um dos clientes de posição, avaliando a distância final resultante.

Neste tipo de movimento, caso tenha sido encontrada uma ordenação de menor distância que a inicial, é realizado o procedimento de avaliação do carregamento no veículo desta rota. Esta avaliação contempla também a verificação da factibilidade da distribuição de peso nos eixos do veículo (peso máximo por eixo). Tal distribuição é calculada para cada item considerando a concentração do peso em seu ponto central. O peso de cada item incidente no eixo traseiro é calculada através da seguinte expressão, derivada de Valente *et al.* (1997):

$$C_{at} = (D_{di} \times P_i) / D_{ee} \quad (20)$$

onde:

$C_{at}$  é o peso de cada item no eixo traseiro;

$D_{di}$  é a distância entre o eixo dianteiro e o ponto central do item  $m_i$ ;

$P_i$  é o peso do item  $m_i$ ;

$D_{ee}$  é a distância entre eixos.

Ao final é feito o somatório dos valores de  $C_{at}$  calculados para todos os itens. O valor obtido é então comparado com o limite de carga conforme a especificação técnica do veículo. A carga sobre o eixo dianteiro será a diferença entre a carga total e a carga incidente no eixo traseiro.

Caso a avaliação da nova solução pela função-objetivo tenha sido melhor que a inicial então esta nova solução da rota é retornada. Do contrário retorna uma resposta informando que há uma melhor solução possível da rota inicial. O objetivo deste passo é realizar uma busca sem a verificação contínua do carregamento para cada troca de posição dos clientes já que este é o que demanda maior tempo computacional. Pelo fato de um cliente ter sido retirado da rota é muito provável que o carregamento seja bem sucedido independente da ordenação imposta na rota. Mesmo assim supõe-se que, em boa parte das vezes, para um dado conjunto de clientes suas diferentes ordenações possíveis não impossibilitarão a factibilidade do carregamento.

Uma segunda etapa é executada no movimento intra-rota se e apenas se o valor da solução que a etapa anterior encontrou não foi melhor que a inicial (probabilidade de uma ordenação

diferente com distância menor gerar excessos no carregamento) e houve uma ordenação encontrada com menor distância. É efetuada a troca de posição dos clientes na rota dois a dois por proximidade (clientes adjacentes) avaliando a solução gerada. Para todas as trocas realizadas dois a dois verifica qual foi a melhor e se houve melhoria em relação a solução inicial reinicia o procedimento de trocas. Caso contrário retorna a solução inicialmente enviada.

Na linha 14 se uma melhoria (menor distância) é encontrada na troca do cliente que está sendo avaliado atualmente, então essa nova ordenação será escolhida como a melhor, e o procedimento é reiniciado. Quando não houver melhoria para a troca de posições realizada com todos os clientes, então o procedimento é encerrado.

A inserção inter-rotas e as trocas intra-rotas são realizadas até que não ocorram mais melhorias na solução incumbente.

Os movimentos detalhados acima são realizados possibilitando excesso de peso e também excesso de comprimento, o qual é limitado a 50% do comprimento do compartimento de carga. O número de veículos nesta etapa não pode ultrapassar o valor definido na solução inicial. Uma solução  $R$  gerada por um movimento é avaliada através da seguinte função-objetivo:

$$f(R) = D_T + \alpha \cdot E_{pt} + \beta \cdot E_c + \delta_1 \cdot E_{ed} + \delta_2 \cdot E_{et} + \pi \cdot E_{tc} + \gamma f(i, j) \quad (21)$$

onde:

$D_T$  representa a distância total do roteiro definido na solução;

$\alpha$  representa uma penalidade aplicada sobre a infactibilidade de peso total e seu valor é igual a  $20\bar{e}/D$  onde  $\bar{e}$  representa o custo médio de uma aresta e  $D$  o peso máximo permitido para um veículo;

$E_{pt}$  representa o excesso de peso total;

$\beta$  representa uma penalidade aplicada sobre a infactibilidade de comprimento da carga e seu valor  $20\bar{e}/L$  onde  $\bar{e}$  representa o custo médio de uma aresta e  $L$  o comprimento máximo do compartimento de carga;

$E_c$  representa o excesso de comprimento da carga em relação ao comprimento do compartimento de carga;

$\delta_1$  representa uma penalidade aplicada sobre a infeasibilidade de peso no eixo dianteiro e seu valor é igual a  $20\bar{e}/P_1$  onde  $\bar{e}$  representa o custo médio de uma aresta e  $P_1$  o peso máximo permitido no eixo dianteiro;

$E_{ed}$  representa o excesso de peso no eixo dianteiro;

$\delta_2$  representa uma penalidade aplicada sobre a infeasibilidade de peso no eixo traseiro e seu valor é igual a  $20\bar{e}/P_2$  onde  $\bar{e}$  representa o custo médio de uma aresta e  $P_2$  o peso máximo permitido no eixo traseiro;

$E_{et}$  representa o excesso de peso no eixo traseiro;

$\pi$  representa uma penalidade aplicada sobre a infeasibilidade de tempo de ciclo e seu valor é igual a  $20\bar{e}/T_c$  onde  $\bar{e}$  representa o custo médio de uma aresta e  $T_c$  o tempo máximo de ciclo;

$E_{tc}$  representa o excesso no tempo de ciclo;

$\gamma$  representa um parâmetro de diversificação dado por  $\sqrt{2n \times v}$  onde  $n$  é o número de clientes da instância e  $v$  é o número de rotas (que provém da solução inicial)

$f(i, j)$  a razão entre o número de vezes que um movimento designa o cliente  $i$  para o veículo  $j$  e o número de movimentos aceitos

O custo médio de uma aresta é dado pela divisão entre o somatório dos coeficientes  $c_{ij}$  de todas as arestas que compõem o grafo  $G$  (que representa a rede de atendimento) e o número de arestas em  $G$ . Além disso, os excessos de peso total, comprimento, peso no eixo dianteiro, peso no eixo traseiro e de tempo de ciclo, referem-se ao somatório das parcelas individuais que correspondem a cada roteiro da solução.

A equação 21 tem o primeiro, segundo, terceiro e sexto termos com o mesmo significado do primeiro, segundo, terceiro e quarto termos da equação 19 utilizada por Gendreau *et al.* (2006) e Araújo (2006).

Assim como em Gendreau *et al.* (2006), foram adotados valores dinâmicos para  $\alpha$  e  $\beta$  que variam 10% para mais quando o excesso de peso e excesso de comprimento, entre um



movimento e outro, aumentam e 10% para menos quando diminuem. Já os coeficientes  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  e  $\pi$  são mantidos estáticos, o que produz melhores resultados conforme avaliado previamente em testes.

A diversificação da busca é promovida pelo terceiro termo da expressão sendo  $\gamma = \sqrt{2n \times v}$  (melhor valor demonstrado pelos experimentos computacionais) e  $f(i, j)$  a razão entre o número de vezes que um movimento designa o cliente  $i$  para o veículo  $j$  e o número de movimentos aceitos, estabelecido da mesma forma que em Gendreau *et al.* (2006).

Para restrição de vizinhança, foi adotado aqui um valor de  $p = \min [n/4; 20]$ . A vizinhança de um ponto é estabelecida como os pares econômicos  $(s_{i,j})$  que contém o ponto em consideração, ordenados conforme valores decrescentes das respectivas economias. Esta lista é percorrida até o valor  $p$  definido anteriormente. A Lista Tabu armazena o inverso de todos os movimentos feitos nas últimas iterações: se o cliente  $i$  passa da rota  $j$  para a rota  $k$  nas próximas iterações, é proibido mover o cliente  $i$  da rota  $k$  de volta para a rota  $j$ . O tabu tenure, que indica o número de iterações durante as quais um movimento deve permanecer com o status de tabu, foi definido experimentalmente como o mínimo valor entre  $n/2$  e 15.

Como critério de aspiração considera-se que um movimento tabu é permitido se este resulta em um valor melhor para a função-objetivo do que aquele encontrado para a solução incumbente. Foi adotado também um critério de intensificação duplicando o valor de  $p$  nas 3 iterações seguintes quando a solução corrente melhora a solução incumbente.

É comentada a seguir a implementação computacional do modelo.

#### 7.4 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO MODELO

Os procedimentos para resolução do 3L-CVRP descritos na seção anterior foram implementados em C++ com opção de otimização na compilação, rodando no sistema

operacional Windows XP. O compilador usado foi o Mingw. A estrutura de dados empregada é mostrada na figura 18.

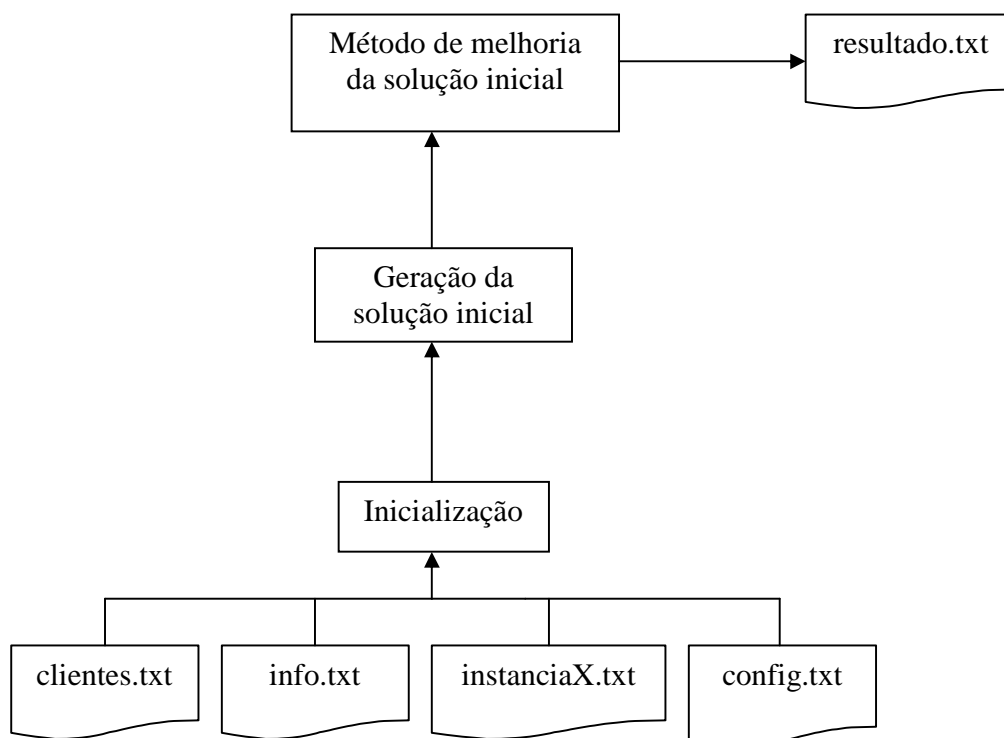


Figura 18 – Estrutura de dados da implementação computacional do modelo  
Fonte: O autor

Os elementos que compõem a estrutura de dados podem ser assim descritos:

- a) clientes.txt: arquivo contendo a localização espacial dos clientes presentes em todas as instancias;
- b) info.txt: arquivo que armazena informações detalhadas do veículo disponível (dimensões, capacidades e custo) e dados que serão usados para cálculos de tempo de rota;

- c) `instanciaX.txt`: arquivo contendo a instância específica que estará sendo utilizada no momento de execução. Possui informação de quais clientes estarão presentes e a relação de itens demandados por cada um;
- d) `config.txt`: arquivo que armazena algumas opções e configurações para execução, como o controle de restrições que deverão ser executadas;
- e) inicialização: procedimento que realiza a leitura dos arquivos e faz a alocação das variáveis do problema, relacionando os clientes existentes e seus itens, o cálculo da distancia entre cada cliente e veículo disponível;
- f) geração da solução inicial: a partir dos dados do problema gera uma solução com rotas iniciais. O procedimento utilizado aqui foi baseado no método das economias de Clarke e Wright;
- g) método de melhoria da solução inicial: a partir da solução inicial tenta realizar modificações com o intuito de melhorar seu resultado. Aqui foi aplicada a Busca Tabu;
- h) `resultado.txt`: arquivo indicando a solução final encontrada ao final do método de melhoria, com informações das rotas geradas e a posição dos itens em cada veículo.

Para visualização dos roteiros foi adotado o **Graphviz** (*Graph Visualization Software*), um software *Open Source* que é utilizado para criar representações visuais de informações estruturais como grafos e diagramas, estando disponível em <<http://www.graphviz.org/>>.

Neste trabalho, o Graphviz foi utilizado como uma maneira simples de gerar a representação final dos roteiros conforme a seqüência em que os pontos de demanda vão sendo visitados. O tipo de layout utilizado da biblioteca Graphviz foi o *neato* permitindo colocar os vértices em posições específicas do espaço e relacioná-los com arestas direcionadas.

Pela natureza da distribuição dos pontos e sua quantidade, a visualização em alguns casos se tornou difícil de ser entendida, dependendo para tanto da ampliação da imagem. Para atenuar esse fator foi utilizado de forma geral um aumento das dimensões dos vértices e a opção de remoção de *overlaps* como *vpsc* (ver documentação do Graphviz disponível no site para maiores detalhes), o que acaba movendo levemente a posição de alguns vértices que estão sobrepostos ocasionando uma pequena alteração na posição real em relação uns aos outros. Para não haver uma alteração significativa que pudesse influenciar espacialmente a rota, as dimensões foram apenas levemente aumentadas, o que ainda em muitos casos pode dificultar a visualização sem a ampliação adequada da imagem.

No próximo capítulo será descrita a aplicação do modelo proposto em um conjunto de 12 instâncias desenvolvidas para esta finalidade e também em um conjunto de instâncias para o 3L-CVRP da literatura.

## 8 APLICAÇÃO DO MODELO

Conforme destacado na seção 4.1, um estudo de Pesquisa Operacional (no qual se enquadra esta tese) é composto por 5 fases que são a definição do problema, a construção do modelo, a solução do modelo, a validação e a implementação da solução. As duas primeiras fases foram apresentadas no capítulo anterior. No presente capítulo serão descritas as fases de solução e validação do modelo. Uma vez que as instâncias aqui propostas não correspondem exatamente a uma situação real, não é realizada a última fase que envolve a implementação da solução.

Para gerar resultados a partir do modelo proposto foram criadas instâncias que procuram simular com o maior grau de realismo possível as operações de entrega de produtos a partir de centros de triagem ou distribuição. Esta estratégia foi adotada devido à grande dificuldade de acesso a dados reais completos provenientes das operações já realizadas de empresas transportadoras e prestadores de serviços logísticos. Apesar de terem sido concebidas sob uma perspectiva acadêmica, tais instâncias são compostas por dados que representam medidas reais dos itens, peso real dos itens, clientes que recebem mais de um tipo de item com repetição destes, veículos adequados para entregas urbanas com dimensões e capacidades reais, pontos de demanda localizados em zonas com concentração de comércio, prestação de serviços ou atividade industrial, centro de triagem localizado em zona apropriada. Com isto, procura-se preencher uma lacuna existente na literatura da integração dos problema de roteirização e carregamento de veículos, tornando possível avaliar com mais detalhes o desempenho de um modelo que busca replicar com mais fidelidade as operações reais.

Na seção 8.1 é feita a definição dos dados e dos parâmetros utilizados. As instâncias propostas são descritas em 8.2. Os cenários construídos com a execução do modelo são apresentados na seção 8.3. A seguir, na seção 8.4, é feita a análise dos resultados obtidos. Por fim, a seção 8.5 apresenta a execução de testes complementares com instâncias da literatura.

## 8.1 DEFINIÇÃO DOS DADOS E PARÂMETROS

A definição dos dados e parâmetros necessários para construção das instâncias concentrou-se em quatro aspectos principais que dizem respeito a configuração da rede de atendimento (conforme o local escolhido) que representam o centro de triagem e os clientes; as cargas formadas por caixas na forma de paralelepípedo com os respectivos pesos, dimensões e características de fragilidade; os veículos com suas especificações técnicas; e a restrição de tempo as quais o problema está submetido. Estes quatro aspectos serão descritos em detalhes a seguir.

### 8.1.1 Determinação da Rede de Atendimento

O local escolhido para definição da rede de atendimento foi o município de Porto Alegre, com população estimada de 1.436.123 habitantes e 497km<sup>2</sup> de área total (IBGE, 2009). Tal escolha se justifica pela preocupação manifestada atualmente com o transporte de mercadorias nos centros urbanos, que é essencial para manutenção das atividades produtivas e sociais da cidade, mas que por outro lado gera uma série de impactos no tráfego que devem ser minimizados. Assim, a roteirização, de modo especial, pode colaborar para tornar os percursos dos caminhões mais eficientes no meio urbano, reduzindo seus impactos negativos. Alinha-se assim este estudo com o conceito de *City Logistics* que consiste, segundo Crainic *et al.* (2009), em um rompimento da idéia que considera de forma isolada cada carregamento, empresa e veículo, para trata-los na forma de um sistema logístico integrado que deve ser otimizado.

Inicialmente foi definida a localização do centro de triagem responsável pelo atendimento das demandas neste município. Conforme indicação do Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano e Ambiental (PDDUA) do município, as empresas de transporte de cargas e operadores logísticos devem instalar-se preferencialmente na região denominada Porto Seco situada na zona norte da cidade. Foi arbitrado então nesta região um ponto para localização do centro de triagem.

A seguir foram definidos 300 pontos de entrega, que corresponde aproximadamente ao número de clientes cadastrados de uma empresa transportadora ou de um prestador de serviços logísticos de médio-grande porte. Estes pontos foram distribuídos num total de 73 bairros que correspondem juntos a uma área de 260,46km<sup>2</sup>. Os locais escolhidos para estes pontos correspondem às principais aglomerações comerciais, industriais e de serviços da cidade.

As coordenadas dos pontos foram levantadas em mapa disponibilizado pela Secretaria Municipal do Planejamento. Com estas coordenadas foram calculadas as distâncias euclidianas entre os pontos de demanda e entre estes e o centro de triagem. A distância euclidiana reta foi corrigida segundo um fator de 1,35 sugerido por Novaes (2001) para o sistema viário urbano. O Apêndice C, que está no CD-ROM anexo a este trabalho, relaciona os pontos e suas coordenadas.

### **8.1.2 Características das Cargas**

As cargas destinadas aos clientes são formadas por caixas em forma de paralelepípedo. Foram coletadas as medidas reais de comprimento, largura e altura, além do peso, de uma série de caixas reais manuseadas por um prestador de serviços logísticos em suas entregas. Estas caixas correspondem a embalagem de produtos como gêneros alimentícios não-perecíveis, artigos de vestuário, eletrodomésticos e componentes mecânicos e eletrônicos para a indústria. Com isso, foi gerada uma lista com 55 itens, conforme mostrado no Apêndice D (CD-ROM anexo) que formam as solicitações feitas pelos clientes.

Como nesta coleta de dados não foram encontrados itens frágeis, tal característica foi atribuída de forma aleatória como um rótulo a 5% do total de caixas da lista. Este percentual foi definido conforme opinião de supervisores da área operacional de empresas.

Para fins de contabilização do tempo unitário de manuseio, os itens foram classificados em:

- a) tipo 1: volume  $\leq 0,2m^3$
- b) tipo 2: volume  $> 0,2m^3$

### 8.1.3 Características dos Veículos

Para efetuar o transporte entre o centro de triagem e os clientes foram considerados dois tipos de veículos: leve com Peso Bruto Total – PBT de 7850kg e médio com PBT de 13000kg. Ambos os modelos são equipados com carroceria fechada (compartimento de carga) do tipo furgão com acesso pelas portas traseiras, que é a mais utilizada nas operações de coleta e entrega urbana. As especificações técnicas dos veículos e das carrocerias foram obtidas junto a distribuidores autorizados dos fabricantes. O Quadro 1 relaciona as especificações técnicas necessárias para execução do modelo proposto.

<b>Especificações</b>	<b>Veículo leve</b>	<b>Veículo Médio</b>
Número de eixos	2	2
Dimensões internas do compartimento de carga (comprimento, largura e altura) (m)	5,0 x 2,0 x 2,3	7,3 x 2,3 x 2,4
Carga útil (kg)	4352	8214
Carga útil no eixo dianteiro (kg)	820	1072
Carga útil no eixo traseiro (kg)	3532	7143
Distância entre eixos (m)	3,9	5,2
Distância entre o eixo dianteiro e a face externa de fundo do compartimento de carga (m)	0,7	0,66

Quadro 1 – Especificações técnicas dos veículos utilizados nos testes do modelo

Fonte: O autor

Foi calculado o custo operacional total unitário para estes dois tipos de veículo. Os parâmetros de cálculo foram definidos segundo as condições mais comuns da operação de coleta e entrega no meio urbano e as especificações técnicas fornecidas pelos fabricantes. As parcelas do custo operacional são formadas pelos seguintes itens:

- a) custos fixos: depreciação, remuneração de capital, mão-de-obra (motorista e dois ajudantes), seguro facultativo, licenciamento e impostos;



- b) custos variáveis: combustível, peças e serviços de oficina, pneus e recapagens, lubrificantes, lavagens.

As expressões utilizadas para o cálculo dos itens que formam os custos fixos e variáveis são as mesmas apresentadas por Alvarenga e Novaes (2005). Os preços de veículos, equipamentos e insumos foram pesquisados junto a fornecedores de Porto Alegre e eram praticados no mês de fevereiro de 2010. Na Tabela 1 são apresentados os valores do custo fixo e do custo variável, ambos por veículo, para os dois tipos considerados. O custo fixo é expresso em valor mensal e diário, sendo este último utilizado, juntamente com o custo variável no cálculo do custo operacional total de cada instância (após solução inicial e após a Busca Tabu).

**Tabela 1 – Custos fixos e variáveis por veículo**

Tipo de veículo	Custo fixo por veículo (R\$/mês)	Custo fixo por veículo (R\$/dia)	Custo variável (R\$/km)
Veículo leve	7460,18	339,10	0,58
Veículo médio	7952,28	361,47	0,76

Fonte: O autor.

#### 8.1.4 Restrição de Tempo

O tratamento da restrição de tempo máximo de jornada de trabalho no modelo requer a consideração de alguns parâmetros específicos, relacionados com tempos de deslocamento e tempos de parada nos clientes ao longo das rotas, o que reflete o processo operacional.

Para definição do tempo de deslocamento ( $t_d$ ) entre dois pontos é considerada a distância ( $d_{i,j}$ ) (a mesma definida na matriz de distâncias do Método das Economias) e a velocidade média de percurso ( $v_m$ ), estipulada neste caso como de 40km/h. A velocidade média foi definida com base na realidade de Porto Alegre, conforme opinião de supervisores de operação que atuam em empresas transportadoras. O tempo de deslocamento (em horas) é calculado então da seguinte forma:

$$t_d = d_{i,j} / v_m \quad (21)$$

O tempo de parada leva em consideração a soma de dois outros tempos: o tempo de espera e o tempo de descarga. O tempo de espera foi estipulado em 0,25 horas. Já o tempo de descarga depende da quantidade de itens manuseados e de sua respectiva classificação conforme o volume unitário, apresentado abaixo:

- a) tipo 1: 30 segundos;
- b) tipo 2: 40 segundos.

Os valores para os tempos de espera e descarga foram estimados também conforme opinião de supervisores operacionais de empresas do setor.

Por razões de ordem operacional, o tempo de jornada de trabalho foi estipulado em 8,5 horas, que representa um valor de referência utilizado pelas empresas transportadoras que realizam entregas e coletas no meio urbano. Como o modelo avalia também a possibilidade de um veículo realizar mais de um roteiro em uma jornada de trabalho, quando é confirmada esta situação adiciona-se o tempo correspondente a re-carga do veículo no centro de triagem. Este tempo adicional foi estipulado em uma hora, resultando então em uma jornada de trabalho de 9,5 horas.

## 8.2 INSTÂNCIAS PROPOSTAS

O modelo foi testado em um conjunto de 12 instâncias, configuradas de modo que a complexidade, expressa pelo número de clientes e número de itens, fosse incrementada de forma sequencial. O Quadro 2 apresenta as características das instâncias em termos de número de clientes, número total de itens a ser entregues, volume total dos itens a ser entregues e peso total.

<b>Instância</b>	<b>Nº de clientes</b>	<b>Nº de itens</b>	<b>Volume total (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Peso total (kg)</b>
Instância 1	10	400	46,221	4.882,2
Instância 2	20	587	52,092	6.167,1
Instância 3	30	571	83,199	7.511,1
Instância 4	40	570	90,039	10.341,0
Instância 5	50	808	114,824	13.779,5
Instância 6	60	1.344	117,380	15.228,9
Instância 7	70	1.650	156,425	20.021,1
Instância 8	80	1.653	172,607	20.957,5
Instância 9	90	1.996	183,768	22.965,0
Instância 10	100	1.981	226,047	27.527,1
Instância 11	110	2.182	238,339	28.495,9
Instância 12	120	2.688	245,999	31.008,3

Quadro 2 – Características das instâncias

Fonte: O autor.

O número de clientes varia nas 12 instâncias de 10 a 120, em intervalos de 10. Todos os 300 pontos de entrega cadastrados foram considerados pelo menos uma vez em alguma das instâncias. Isto reflete a frequência das entregas observada na prática, onde nem todos os clientes cadastrados são visitados em um dia. A alocação dos clientes às instâncias foi feita considerando inicialmente os pontos representando maior potencial de demanda (atratividade), acrescentando-se gradativamente os demais pontos a medida que o número de clientes requerido aumentava.

A formação da carga de um cliente no tocante aos tipos de itens, repetição ou não destes e as respectivas quantidades foi gerada aleatoriamente a partir da lista de itens do apêndice D. Uma vez que 5% dos itens da lista são frágeis e os itens eram alocados de forma aleatória, as instâncias 2, 3 e 5 não possuem itens com este rótulo.

Estas 12 instâncias foram utilizadas para a construção dos cenários descritos a seguir.

### 8.3 CONSTRUÇÃO DE CENÁRIOS ATRAVÉS DA EXECUÇÃO DO MODELO

Os testes computacionais foram realizados em um Intel Core 2 Duo 6300, com 1,86 GHz e 2 Gb de RAM. Cada instância rodou em um *core*. O tempo de processamento adotado foi de 2 horas para as instâncias 1, 2 e 3 e 3 horas para as demais. Adotaram-se estes valores por serem aceitáveis na prática e possibilitarem um adequado número de iterações. Levou-se em conta também como referência os tempos adotados nos testes realizados por Gendreau *et al.* (2006), Araújo (2006), Portal *et al.* (2009) e Fuellerer *et al.* (2010) cujas instâncias possuíam itens e demandas com características bem diferentes daquelas constantes nas instâncias propostas que devido a variedade e quantidade necessitam de um maior tempo para realização dos movimentos na Busca Tabu.

Para as 12 instâncias propostas foram construídos 4 cenários assim caracterizados:

- a) cenário 1: emprega somente veículos leves;
- b) cenário 2: emprega veículos leves, mas com possibilidade de inserção de veículos médios
- c) cenário 3: emprega somente veículos médios;
- d) cenário 4: emprega veículos médios, mas com possibilidade de inserção de veículos leves.

O Cenário 2 considera a possibilidade de uso de uma frota mista, ou seja, são utilizados veículos leves mas é analisada a inserção de veículos médios. Não há limite na quantidade deste tipo de veículo que pode ser inserida. Para este caso, o procedimento de inserção do veículo médio é feito sobre a solução inicial gerada. É escolhida a rota com menor volume dentre todas e é feita uma avaliação desta rota unida a cada uma das demais rotas sendo atendidas por um veículo médio. A solução que apresentar factibilidade e que possuir o menor aumento de distância total ocasionado pela inserção da rota de menor volume sobre outra será selecionada e

adicionada à solução geral. Caso não seja encontrada nenhuma união entre a rota de menor volume e outra que gere factibilidade então a solução inicial não é alterada, continuando apenas com veículos leves. Este procedimento visa diminuir a distância total de forma imediata ao reduzir a necessidade de um dos veículos existentes. Em algumas instâncias do Cenário 2 não foi possível inserir o veículo médio, permanecendo a solução somente com veículos leves.

No Cenário 4 a inserção de um veículo leve é feita diretamente sobre a rota de menor volume. Se esta carga produz uma solução factível, então essa solução é adicionada a solução geral. Caso não seja factível o veículo leve não é inserido. O objetivo dessa inserção é fazer a troca de um veículo médio, de maior custo, por um veículo leve com menor custo, objetivando diminuir o custo total final.

Tanto no Cenário 2 como no Cenário 4 a tentativa de inserção é feita sobre a solução inicial antes, portanto, da melhoria intra-rotas e da Busca Tabu.

A seguir são analisados os resultados obtidos nestes 4 cenários.

#### 8.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O Quadro 3 apresenta os resultados para o Cenário 1, no qual são utilizados somente veículos leves. Neste quadro, assim como nos 3 seguintes, a primeira coluna indica a instância, a segunda o número de roteiros definido na solução inicial ( $v_o$ ), a terceira o valor da função-objetivo para a solução inicial ( $z_o$ ) (conforme equação 21), a quarta o número de roteiros obtido na melhor solução factível da Busca Tabu ( $v_f$ ), a quinta o valor da função-objetivo na melhor solução factível da Busca Tabu ( $z_f$ ) (também dado conforme a equação 21) e a sexta coluna o tempo de processamento (em segundos) no qual foi atingida a melhor solução factível. Importante frisar que o valor de  $z_o$  corresponde somente a soma das distâncias dos roteiros definidos na solução inicial já que não há infactibilidade de peso, comprimento e tempo e a distribuição de peso nos eixos ainda não foi avaliada.

<b>Instância</b>	$v_o$	$z_o$	$v_f$	$z_f$	<b>Tempo (s)</b>
Instância 1	4	114,739	3	100,202	59,10
Instância 2	4	147,193	4	140,725	1.254,65
Instância 3	6	222,654	6	222,654	5,64
Instância 4	7	221,807	6	208,602	1.432,47
Instância 5	9	303,104	9	300,316	8.035,50
Instância 6	8	262,766	8	261,035	895,88
Instância 7	11	331,014	11	328,490	5.662,84
Instância 8	12	420,790	12	413,477	9.022,06
Instância 9	12	219,185	12	218,511	10.241,25
Instância 10	16	559,683	15	541,718	7.524,09
Instância 11	17	507,382	17	506,950	5.313,43
Instância 12	17	327,395	17	325,498	10.596,79

Quadro 3 – Resultados para o Cenário 1

Fonte: O autor

Nota-se no Quadro 3 que houve redução do número de roteiros em relação a solução inicial nas instâncias 1, 4 e 10. Este fato estar relacionado com as dimensões reduzidas do compartimento de carga do veículo leve que limitam de certa forma as opções de acomodação da carga na solução inicial. A medida que novas soluções são exploradas na Busca Tabu aumenta a probabilidade de encontrar uma melhor configuração dos roteiros e dos respectivos carregamentos.

Com exceção da instância 3, houve melhora no valor da função objetivo com a aplicação da Busca Tabu. Na instância 3 o melhor valor foi atingido já na solução inicial, sendo que a Busca Tabu, apesar do número significativo de movimento (423 conforme listagem apresentada no Apêndice F do CD-ROM em anexo) não obteve solução factível de menor valor. No Apêndice F é apresentada a listagem de execução do modelo no Cenário 1. A representação gráfica dos roteiros construídos no Cenário 1 é mostrada no Apêndice J do CD-ROM em anexo.

O Quadro 4 apresenta os resultados do Cenário 2. Observa-se na instância 1 redução no número de roteiros entre a solução inicial e a melhor solução factível da Busca Tabu. Em todas as instâncias a Busca Tabu propicia uma melhoria no valor da função-objetivo quando comparado ao valor da solução inicial. Chama a atenção, também no Quadro 4, o aumento no tempo de

processamento requerido para obtenção da melhor solução quando comparado ao Cenário 1. Isto se deve a maior capacidade do veículo médio que é inserido e por consequência, ao aumento número de opções de carregamento a serem avaliadas em cada movimento.

<b>Instância</b>	$v_o$	$z_o$	$v_f$	$z_f$	<b>Tempo (s)</b>
Instância 1	3	91,934	2	78,268	5.049,99
Instância 2	4	147,930	4	140,725	1.170,81
Instância 3	5	208,943	5	206,758	345,19
Instância 4	6	213,374	6	207,694	777,23
Instância 5	8	290,645	8	284,475	3.404,24
Instância 6	7	256,955	7	249,517	9.940,14
Instância 7	10	325,947	10	316,998	3.547,5
Instância 8	12	420,790	12	413,477	9.161,72
Instância 9	12	219,185	12	218,799	10.037,14
Instância 10	15	546,228	15	536,774	10.516,47
Instância 11	16	503,420	16	502,172	5.656,87
Instância 12	17	327,395	17	325,498	10.774,32

Quadro 4 – Resultados para o Cenário 2

Fonte: O autor

Conforme listagem do Cenário 2, apresentada no Apêndice G do CD-ROM em anexo, ocorre inserção do veículo médio nas instâncias 1, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 11 e 12. Nas instâncias 2 e 8 permanece a solução com o uso de veículos leves somente. Entretanto, o Quadro 4 mostra para estes dois casos tempos de processamento diferentes em relação ao Quadro 3, o que é perfeitamente aceitável uma vez que o algoritmo realiza uma etapa adicional de verificação de inserção do veículo médio. O Apêndice K do CR-ROM em anexo mostra a representação gráfica dos roteiros construídos no Cenário 2.

Os resultados obtidos para o Cenário 3, que emprega somente veículos médios, são mostrados no Quadro 5.

<b>Instância</b>	$v_o$	$z_o$	$v_f$	$z_f$	<b>Tempo (s)</b>
Instância 1	2	78,268	2	78,268	3,89
Instância 2	2	104,527	2	99,941	3.677,74
Instância 3	4	152,657	4	151,660	297,00
Instância 4	4	160,739	4	158,318	7.248,39
Instância 5	6	217,639	6	217,639	358,38
Instância 6	5	193,143	5	190,887	7.542,13
Instância 7	7	229,518	7	227,520	2.825,88
Instância 8	7	273,946	7	271,650	8.532,03
Instância 9	7	156,484	7	156,484	594,87
Instância 10	10	363,093	10	362,550	9.362,55
Instância 11	9	343,236	9	342,976	4.734,97
Instância 12	10	222,956	10	218,937	708,92

Quadro 5 – Resultados para o Cenário 3

Fonte: O autor

Os resultados do Quadro 5 mostram que não houve redução no número de roteiros da solução inicial para a melhor solução factível definida na Busca Tabu. Este fato pode ser explicado pelas maiores dimensões do compartimento de carga do veículo médio, o que facilita o processo de acomodação dos itens na solução inicial.

Não ocorreu melhoria no valor da função-objetivo com a Busca Tabu nas instâncias 1, 5 e 9. Para as duas últimas o tempo para definição da solução inicial (que corresponde a melhor) foi de 358,38 e 594,87 segundos respectivamente. Nota-se então que, o aumento da capacidade de carga, apesar de possibilitar uma melhor ocupação do espaço, torna muito grande o número de opções a ser avaliadas, o que pode comprometer o desempenho em termos de tempo de processamento e por consequência o número total de movimentos que podem ser efetuados durante a Busca Tabu. Este efeito foi especialmente severo na instância 9, onde foi realizado um único movimento. No Apêndice H do CD-ROM em anexo é apresentada a listagem de execução do modelo no Cenário 3. A representação gráfica dos roteiros deste cenário é mostrada no Apêndice L do CD-ROM em anexo.

No Quadro 6 são apresentados os resultados para o Cenário 4. Neste cenário não ocorreu redução do número de roteiros após a Busca Tabu. A exceção das instâncias 1, 6, 8 e 12, houve



melhora no valor da função-objetivo com a aplicação da Busca Tabu.

Instância	$v_o$	$z_o$	$v_f$	$z_f$	Tempo (s)
Instância 1	2	78,268	2	78,268	3,89
Instância 2	2	104,527	2	99,941	3.677,74
Instância 3	4	152,657	4	151,660	299,46
Instância 4	4	160,739	4	158,318	7.236,14
Instância 5	6	217,639	6	217,639	358,38
Instância 6	5	193,143	5	190,887	9.406,43
Instância 7	7	229,518	7	227,520	2.828,01
Instância 8	7	273,946	7	271,650	8.532,03
Instância 9	8	156,484	8	156,484	594,87
Instância 10	10	363,093	10	362,550	9.348,42
Instância 11	10	343,236	10	342,976	4.719,08
Instância 12	10	222,956	10	218,937	708,92

Quadro 6 – Resultados para o Cenário 4

Fonte: O autor

Conforme indicado no Apêndice I do CD-ROM em anexo, a inserção do veículo leve ocorreu nas instâncias 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10 e 11. Como a inserção do veículo leve ocorre somente se houverem roteiros com carregamento compatível com a sua capacidade ao final da solução inicial e não favorece a opção de troca durante a Busca Tabu, os valores obtidos para a função objetivo (para  $z_o$  e  $z_f$ ) são os mesmos do Cenário 3. A representação gráfica deste cenário é a mesma mostrada no Apêndice L.

A Tabela 2 mostra a variação percentual entre os valores de  $z_o$  e  $z_f$  nos quatro cenários em que o conjunto de instâncias foi aplicado. Tal variação é calculada através da seguintes expressão:

$$\% \Delta = 100(z_f - z_o) / z_o \quad (22)$$

**Tabela 2 – Variação percentual dos valores de  $z_o$  e  $z_f$  nos cenários construídos**

Instância	Cenário 1			Cenário 2			Cenário 3			Cenário 4		
	$z_o$	$z_f$	$\Delta\%$	$z_o$	$z_f$	$\Delta\%$	$z_o$	$z_f$	$\Delta\%$	$z_o$	$z_f$	$\Delta\%$
Instância 1	114,739	100,202	-12,67	91,934	78,268	-14,87	78,268	78,268	0,00	78,268	78,268	0,00
Instância 2	147,193	140,725	-4,39	147,930	140,725	-4,87	104,527	99,941	-4,39	104,527	99,941	-4,39
Instância 3	222,654	222,654	0,00	208,943	206,758	-1,05	152,657	151,660	-0,65	152,657	151,660	-0,65
Instância 4	221,807	208,602	-5,95	213,374	207,694	-2,66	160,739	158,318	-1,51	160,739	158,318	-1,51
Instância 5	303,104	300,316	-0,92	290,645	284,475	-2,12	217,639	217,639	0,00	217,639	217,639	0,00
Instância 6	262,766	261,035	-0,66	256,955	249,517	-2,89	193,143	190,887	-1,17	193,143	190,887	-1,17
Instância 7	331,014	328,490	-0,76	325,947	316,998	-2,75	229,518	227,520	-0,87	229,518	227,520	-0,87
Instância 8	420,790	413,477	-1,74	420,790	413,477	-1,74	273,946	271,650	-0,84	273,946	271,650	-0,84
Instância 9	219,185	218,511	-0,31	219,185	218,799	-0,18	156,484	156,484	0,00	156,484	156,484	0,00
Instância 10	559,683	541,718	-3,21	546,228	536,774	-1,73	363,093	362,550	-0,15	363,093	362,550	-0,15
Instância 11	507,382	506,950	-0,09	503,420	502,172	-0,25	343,236	342,976	-0,08	343,236	342,976	-0,08
Instância 12	327,395	325,498	-0,58	327,395	325,498	-0,58	222,956	218,937	-1,80	222,956	218,937	-1,80
Média			-2,61			-2,97			-0,96			-0,96
Desvio padrão			3,68			3,97			1,25			1,25

Fonte: O autor

Chama a atenção na Tabela 2 as melhorias obtidas na instância 1, para os Cenários 1 e 2, na instância 2 para os quatro cenários e na instância 4 também para os quatro cenários. Em média, as melhorias mais significativas ocorrem nos Cenários 1 e 2, porém os Cenários 3 e 4 a melhoria apresenta menor variabilidade.

As Tabelas 3 e 4 apresentam a variação percentual dos valores de  $z_o$  e  $z_f$  quando são comparados os Cenários 1 e 2 e os Cenários 1 e 3, respectivamente. A Tabela 3 indica uma melhoria significativa quando é feita a inserção de veículos médios na instância 1. Este caso pode ter sido favorecido pelo número mais reduzido de cliente e de itens. A variabilidade entre os valores de  $z_o$  e  $z_f$  mostra maior entre os Cenários 1 e 2 quando comparada a variabilidade dos Cenário 1 e 3.

**Tabela 3 - Variação percentual dos valores de  $z_o$  e  $z_f$  entre os Cenários 1 e 2**

Instância	Cenário 1		Cenário 2		$\Delta z_{o1-2}\%$	$\Delta z_{f1-2}\%$
	$z_o$	$z_f$	$z_o$	$z_f$		
Instância 1	114,739	100,202	91,934	78,268	-19,88	-21,89
Instância 2	147,193	140,725	147,930	140,725	0,50	0,00
Instância 3	222,654	222,654	208,943	206,758	-6,16	-7,14
Instância 4	221,807	208,602	213,374	207,694	-3,80	-0,44
Instância 5	303,104	300,316	290,645	284,475	-4,11	-5,27
Instância 6	262,766	261,035	256,955	249,517	-2,21	-4,41
Instância 7	331,014	328,490	325,947	316,998	-1,53	-3,50
Instância 8	420,790	413,477	420,790	413,477	0,00	0,00
Instância 9	219,185	218,511	219,185	218,799	0,00	0,13
Instância 10	559,683	541,718	546,228	536,774	-2,40	-0,91
Instância 11	507,382	506,950	503,420	502,172	-0,78	-0,94
Instância 12	327,395	325,498	327,395	325,498	0,00	0,00
Média					-3,36	-3,70
Desvio padrão					5,58	6,23

Fonte: O autor

Na Tabela 4 nota-se que é significativa a melhoria entre os valores das soluções iniciais e soluções finais quando é empregado o veículo médio, fato que está relacionado diretamente com a redução da distância total percorrida por instância em razão da maior capacidade de carga

deste tipo de veículo.

**Tabela 4 - Variação percentual dos valores de  $z_o$  e  $z_f$  entre os Cenários 1 e 3**

Instância	Cenário 1		Cenário 3		$\Delta z_{o1-2}\%$	$\Delta z_{f1-2}\%$
	$z_o$	$z_f$	$z_o$	$z_f$		
Instância 1	114,739	100,202	78,2677	78,2677	-31,79	-21,89
Instância 2	147,193	140,725	104,527	99,941	-28,99	-28,98
Instância 3	222,654	222,654	152,657	151,66	-31,44	-31,89
Instância 4	221,807	208,602	160,739	158,318	-27,53	-24,11
Instância 5	303,104	300,316	217,639	217,639	-28,20	-27,53
Instância 6	262,766	261,035	193,143	190,887	-26,50	-26,87
Instância 7	331,014	328,490	229,518	227,52	-30,66	-30,74
Instância 8	420,790	413,477	273,946	271,65	-34,90	-34,30
Instância 9	219,185	218,511	156,484	156,484	-28,61	-28,39
Instância 10	559,683	541,718	363,093	362,550	-35,13	-33,07
Instância 11	507,382	506,950	343,236	342,976	-32,35	-32,35
Instância 12	327,395	325,498	222,956	218,937	-31,90	-34,74
Média					-30,67	-29,57
Desvio padrão					2,77	4,02

Fonte: O autor

A Tabela 5 mostra a variação percentual entre o custo operacional total definido na solução inicial ( $C_o$ ) e o custo operacional total definido na melhor solução factível ( $C_f$ ). Em ambos os casos o cálculo do custo ocorre após a verificação da possibilidade de um veículo realizar mais de um roteiro. A maior redução média ocorre quando são empregados somente veículos leves. Com exceção da instância 3 no Cenário 1, instâncias 1, 9, 10 e 12 no Cenário 3 e também 1, 9, 10 e 12 no Cenário 4 há redução de custo em todas as instâncias considerando os quatro cenários. Chama a atenção a redução obtida no custo da instância 7 no Cenário 1 e da instância 12 nos Cenários 1 e 2.

**Tabela 5 - Variação percentual dos valores de  $C_o$  e  $C_f$  nos cenários construídos**

Instância	Cenário 1			Cenário 2			Cenário 3			Cenário 4		
	$C_o$ (R\$)	$C_f$ (R\$)	$\Delta\%$	$C_o$ (R\$)	$C_f$ (R\$)	$\Delta\%$	$C_o$ (R\$)	$C_f$ (R\$)	$\Delta\%$	$C_o$ (R\$)	$C_f$ (R\$)	$\Delta\%$
Instância 1	744,75	736,32	-1,13	763,78	761,52	-0,29	420,92	420,92	0,00	420,92	420,92	0,00
Instância 2	763,57	759,82	-0,49	763,57	759,82	-0,49	807,15	798,90	-1,02	807,15	798,90	-1,02
Instância 3	1.146,44	1.146,44	0,00	1.166,48	1.165,29	-0,10	1.200,52	1.199,67	-0,07	1.537,00	1.536,00	-0,06
Instância 4	1.146,83	1.138,29	-0,74	1.507,05	1.502,88	-0,28	1.208,58	1.204,73	-0,31	1.544,37	1.542,08	-0,14
Instância 5	1.532,25	1.530,58	-0,10	1.557,43	1.554,03	-0,22	1.614,84	1.611,29	-0,22	1.950,46	1.946,91	-0,18
Instância 6	1.848,00	1.846,90	-0,06	1.875,57	1.869,69	-0,31	1.599,16	1.590,95	-0,51	1.936,97	1.928,77	-0,42
Instância 7	2.227,74	1.886,02	-15,34	2.252,54	2.244,83	-0,34	1.984,00	1.980,26	-0,19	2.322,38	2.318,65	-0,16
Instância 8	2.278,66	2.274,33	-0,19	2.278,66	2.274,33	-0,19	2.738,50	2.736,74	-0,06	2.738,50	2.736,74	-0,06
Instância 9	2.161,86	2.161,34	-0,02	2.161,86	2.161,34	-0,02	2.287,79	2.287,75	0,00	2.626,07	2.626,03	0,00
Instância 10	3.038,39	3.027,00	-0,37	3.064,41	3.057,10	-0,24	3.167,87	3.167,30	0,00	3.505,80	3.505,22	0,00
Instância 11	3.007,46	3.006,83	-0,02	3.371,38	3.370,27	-0,03	3.153,63	3.152,42	-0,03	3.491,09	3.489,88	-0,03
Instância 12	3.241,97	2.901,59	-10,5	3.241,97	2.901,59	-10,5	3.787,19	3.781,09	0,00	3.787,19	3.781,09	0,00
Média			-2,41			-1,08			-0,20			-0,17
Desvio padrão			5,03			2,97			0,30			0,29

Fonte: O autor

Nas Tabelas 6, 7 e 8 são apresentadas as variações percentuais dos valores de  $C_o$  e  $C_f$  comparando-se os Cenários 1 e 2, 1 e 3 e 3 e 4 respectivamente. A análise dos valores apresentados nestas tabelas mostra que somente no caso de duas instâncias (instâncias 1 e 6 quando são comparados os Cenários 1 e 3) é que ocorre uma efetiva redução de custo. Nos demais casos da comparação feita entre os Cenários 1 e 2 (a exceção das instâncias 2, 8, 9 e 12 onde o custo ficou inalterado) e entre os Cenários 1 e 3 nota-se que há um aumento dos custos. Isto pode ser explicado pelo fato de que a redução da distância percorrida é muito pequena e não consegue compensar o custo de um veículo médio (que é maior tanto na parcela fixa quanto na variável). Já na comparação dos Cenários 3 e 4 há um aumento porque não é possível a alocação mais de um roteiro ao veículo leve, pois este não pode receber a carga que seria transportada por um veículo médio devido a sua menor capacidade.

**Tabela 6 - Variação percentual dos valores de  $C_o$  e  $C_f$  entre os Cenários 1 e 2**

Instância	Cenário 1		Cenário 2		$\Delta C_{o1-2}\%$	$\Delta C_{f1-2}\%$
	$C_o$ (R\$)	$C_f$ (R\$)	$C_o$ (R\$)	$C_f$ (R\$)		
Instância 1	744,75	736,32	763,78	761,52	2,56	3,42
Instância 2	763,57	759,82	763,57	759,82	0,00	0,00
Instância 3	1.146,44	1.146,44	1.166,48	1.165,29	1,75	1,64
Instância 4	1.146,83	1.138,29	1.507,05	1.502,88	31,41	32,03
Instância 5	1.532,25	1.530,58	1.557,43	1.554,03	1,64	1,53
Instância 6	1.848,00	1.846,90	1.875,57	1.869,69	1,49	1,23
Instância 7	2.227,74	1.886,02	2.252,54	2.244,83	1,11	19,02
Instância 8	2.278,66	2.274,33	2.278,66	2.274,33	0,00	0,00
Instância 9	2.161,86	2.161,34	2.161,86	2.161,34	0,00	0,00
Instância 10	3.038,39	3.027,00	3.064,41	3.057,10	0,86	0,99
Instância 11	3.007,46	3.006,83	3.371,38	3.370,27	12,1	12,09
Instância 12	3.241,97	2.901,59	3.241,97	2.901,59	0,00	0,00
Média					4,41	6,00
Desvio padrão					9,12	10,10

Fonte: O autor

**Tabela 7 - Variação percentual dos valores de  $C_o$  e  $C_f$  entre os Cenários 1 e 3**

Instância	Cenário 1		Cenário 3		$\Delta C_{o1-3}\%$	$\Delta C_{f1-3}\%$
	$C_o$ (R\$)	$C_f$ (R\$)	$C_o$ (R\$)	$C_f$ (R\$)		
Instância 1	744,75	736,32	420,92	420,92	-43,48	-42,83
Instância 2	763,57	759,82	807,15	798,90	5,71	5,14
Instância 3	1.146,44	1.146,44	1.200,52	1.199,67	4,72	4,64
Instância 4	1.146,83	1.138,29	1.208,58	1.204,73	5,38	5,84
Instância 5	1.532,25	1.530,58	1.614,84	1.611,29	5,39	5,27
Instância 6	1.848,00	1.846,90	1.599,16	1.590,95	-13,47	-13,86
Instância 7	2.227,74	1.886,02	1.984,00	1.980,26	-10,94	5,00
Instância 8	2.278,66	2.274,33	2.738,50	2.736,74	20,18	20,33
Instância 9	2.161,86	2.161,34	2.287,79	2.287,75	5,83	5,85
Instância 10	3.038,39	3.027,00	3.167,87	3.167,30	4,26	4,63
Instância 11	3.007,46	3.006,83	3.153,63	3.152,42	4,86	4,84
Instância 12	3.241,97	2.901,59	3.787,19	3.781,09	16,82	30,31
Média					0,44	2,93
Desvio padrão					16,70	17,76

Fonte: O autor.

**Tabela 8 - Variação percentual dos valores de  $C_o$  e  $C_f$  entre os Cenários 3 e 4**

Instância	Cenário 3		Cenário 4		$\Delta C_{o3-4}\%$	$\Delta C_{f3-4}\%$
	$C_o$ (R\$)	$C_f$ (R\$)	$C_o$ (R\$)	$C_f$ (R\$)		
Instância 1	420,92	420,92	420,92	420,92	0,00	0,00
Instância 2	807,15	798,90	807,15	798,90	0,00	0,00
Instância 3	1.200,52	1.199,67	1.537,00	1.536,00	28,03	28,04
Instância 4	1.208,58	1.204,73	1.544,37	1.542,08	27,78	28,00
Instância 5	1.614,84	1.611,29	1.950,46	1.946,91	20,78	20,83
Instância 6	1.599,16	1.590,95	1.936,97	1.928,77	21,12	21,23
Instância 7	1.984,00	1.980,26	2.322,38	2.318,65	17,06	17,09
Instância 8	2.738,50	2.736,74	2.738,50	2.736,74	0,00	0,00
Instância 9	2.287,79	2.287,75	2.626,07	2.626,03	14,79	14,79
Instância 10	3.167,87	3.167,30	3.505,80	3.505,22	10,67	10,67
Instância 11	3.153,63	3.152,42	3.491,09	3.489,88	10,7	10,70
Instância 12	3.787,19	3.781,09	3.787,19	3.781,09	0,00	0,00
Média					12,58	12,61
Desvio padrão					10,77	10,81

Fonte: O autor.

Por fim, com base nos dados da Tabela 5, o Quadro 7 apresenta os cenários de melhor desempenho para as 12 instâncias em termos de custo operacional.

<b>Instância</b>	<b>Melhor cenário</b>
Instância 1	Cenários 3 e 4
Instância 2	Cenários 1 e 2
Instância 3	Cenário 1
Instância 4	Cenário 1
Instância 5	Cenário 1
Instância 6	Cenário 3
Instância 7	Cenário 3
Instância 8	Cenários 3 e 4
Instância 9	Cenários 1 e 2
Instância 10	Cenário 4
Instância 11	Cenário 1
Instância 12	Cenário 1 e 2

Quadro 7 – Cenários de melhor desempenho de custo para as 12 instâncias  
Fonte: O autor.

#### 8.5 TESTES COMPLEMENTARES COM AS INSTÂNCIAS DE GENDREAU *et al.* (2006)

Os experimentos computacionais adicionais foram realizados com as 27 instâncias propostas por Gendreau *et al.* (2006), disponíveis em <http://www.or.deis.unibo.it/research.html> e que são as únicas disponíveis na web para o 3L-CVRP. Nestas instâncias os coeficientes  $c_{ij}$  das arestas foram determinados como as distâncias euclidianas (não arredondadas) entre as coordenadas dos clientes; o compartimento de carga no qual são acondicionados os itens tem dimensões  $W = 25$ ,  $H = 30$  e  $L = 60$ ; o número de itens (caixas) solicitado por cada cliente foi gerado aleatoriamente e varia de 1 a 3; as dimensões dos itens também foram aleatoriamente geradas segundo uma distribuição uniforme com intervalo entre 20% e 60% da dimensão correspondente do compartimento de carga ( $W$ ,  $H$  e  $L$ ).

Entretanto, deve-se frisar as limitações destas instâncias para representar de forma adequada uma operação de distribuição via centro de triagem ou distribuição: considera somente



itens de grande tamanho, não há repetição de um mesmo tipo para um mesmo cliente (itens iguais); o peso de cada item não é conhecido, mas somente o peso total da carga de um certo cliente, as demandas dos clientes variam de 1 a 3 itens.

Considerando a natureza determinística da Busca Tabu, foram adotados os mesmos tempos de processamento utilizados por Gendreau et al (2006). Divididas em três grupos, foram estabelecidos tempos limites de processamento para as instâncias de 1800 segundos (para as instâncias de 1 a 9), de 3600 segundos (para as instâncias de 10 a 18) e de 7200 segundos (para as instâncias de 19 a 27).

Na aplicação do modelo proposto a este conjunto de instâncias foi considerado um relaxamento de 20% do comprimento do compartimento de carga. A avaliação de uma dada solução foi feita através da equação 19, mas considerando os parâmetros da Busca Tabu descritos em 7.4.3.

A Tabela 9 apresenta os resultados dos testes comparativos com as instâncias de Gendreau *et al.* (2006). Nesta tabela as três primeiras colunas informam, respectivamente, a instância tratada, o número de clientes por instância ( $n$ ) e o número total de itens entregues por instância ( $M$ ). Nas três colunas seguintes mostram-se os resultados obtidos por Gendreau *et al.* (2006) com relação ao número de veículos necessários ( $v_G$ ), melhor valor para a função objetivo ( $z_G$ ) e tempo de processamento para atingir tal valor. As colunas 7, 8 e 9 mostram, respectivamente, os resultados obtidos com o modelo proposto para este conjunto de instâncias em relação ao número de veículos necessários ( $v_{MP}$ ), melhor valor para a função objetivo ( $z_{MP}$ ) e tempo de processamento para atingir tal valor. A última coluna mostra a variação percentual entre as soluções obtidas em cada instância por Gendreau *et al.* (2006) e pelo modelo proposto. Tal variação é calculada através da seguinte equação:

$$\% \Delta z_G - z_{MP} = 100(z_{MP} - z_G) / z_G \quad (23)$$

**Tabela 9 – Resultados dos testes comparativos com as instâncias de Gendreau *et al.* (2006)**

Instância	$n$	$M$	Gendreau <i>et al.</i> (2006)			Modelo Proposto			
			$v_G$	$z_G$	Tempo (seg)	$v_{MP}$	$z_{MP}$	Tempo (seg)	$\% \Delta z_G - z_{MP}$
1	15	32	5	316,32	129,5	5	318,53	10,64	0,70
2	15	26	5	350,58	5,3	6	332,30	2,14	-5,21
3	20	37	5	447,73	461,1	5	391,65	65,52	-12,53
4	20	36	6	448,48	181,1	7	439,15	4,34	-2,08
5	21	45	7	464,24	75,8	6	475,18	8,97	2,36
6	21	40	6	504,46	1.167,9	7	500,93	229,40	-0,70
7	22	46	6	831,66	181,1	5	796,63	427,28	-4,21
8	22	43	8	871,77	156,1	6	828,07	1.515,55	-5,01
9	25	50	8	666,10	1.468,5	9	628,78	2,75	-5,60
10	29	62	10	911,16	714	8	859,30	17,53	-5,69
11	29	58	9	819,36	396,4	8	847,01	19,80	3,37
12	30	63	9	651,58	268,1	10	637,06	0,84	-2,23
13	32	61	9	2.928,34	1.639,1	7	2.846,10	73,16	-2,81
14	32	72	11	1.559,64	3.451,6	8	1.576,83	12,44	1,10
15	32	68	10	1.452,34	2.327,4	8	1.509,18	52,23	3,91
16	35	63	11	707,85	2.550,3	11	711,21	644,08	0,47
17	40	79	14	920,87	2.142,5	15	893,82	3,12	-2,94
18	44	94	14	1.400,52	1.452,9	12	1.311,49	654,59	-6,36
19	50	99	13	871,29	1.822,3	11	819,70	1.994,55	-5,92
20	71	147	20	732,12	790,0	18	673,64	822,40	-7,99
21	75	155	18	1.275,20	2.370,3	17	1.195,87	3.373,97	-6,22
22	75	146	19	1.277,94	1.611,3	17	1.219,96	1.897,58	-4,54
23	75	150	18	1.258,16	6.725,6	17	1.209,18	4.385,16	-3,89
24	75	143	18	1.307,09	6.619,3	17	1.216,20	2.547,10	-6,95
25	100	193	24	1.570,72	5.630,9	23	1.550,03	389,61	-1,32
26	100	199	28	1.847,95	4.123,7	25	1.725,36	1.188,76	-6,63
27	100	198	25	1.747,52	7.127,2	26	1.679,23	5.094,73	-3,91
Média				1.042,26	2.058,9		1.007,13		
Total			336			314			

Fonte: O autor.

Os resultados da Tabela 9 indicam um bom desempenho do modelo proposto quando aplicado a este conjunto de 27 instâncias, uma vez que em 21 delas atingiu melhores valores finais. Também em 21 instâncias apresenta um tempo de processamento sensivelmente inferior para determinação da melhor solução. Apesar do modelo proposto não considerar limitação no número de veículos, em 17 instâncias foi capaz de utilizar um número menor destes.

Demonstra-se assim o bom desempenho do modelo proposto para tratar instâncias com características diferentes das 12 instâncias apresentadas em 8.3.

No próximo capítulo serão apresentadas as conclusões deste trabalho.

## 9 CONCLUSÕES

A complexidade observada no planejamento operacional do transporte rodoviário de cargas, especialmente quando é operado o sistema de distribuição via centro de triagem ou distribuição, gera a necessidade por modelos de otimização que auxiliem os tomadores de decisão em suas tarefas cotidianas. Os dois problemas que se destacam nesta área compreendem a roteirização e o carregamento de veículos, ambos de natureza combinatorial.

Recentemente estes dois problemas passaram a ser tratados de forma conjunta, o que resulta em uma nova variante para o Problema de Roteirização de Veículos. Nos trabalhos apresentados até aqui na literatura são consideradas restrições de carregamento bidimensional e tridimensional, derivadas dos problemas de carregamento de pallets e de contêineres.

Nesta tese foi proposto um modelo de resolução para o problema de roteirização de veículos com restrições de carregamento tridimensionais, sendo que além deste elemento já abordado na literatura, foram agregadas restrições de tempo de ciclo e distribuição de peso nos eixos. Considerou-se também a possibilidade de avaliar o uso de diferentes tipos de veículos (em frota idêntica e mista) e seus respectivos custos operacionais. Buscou-se assim replicar de forma mais efetiva as operações reais que ocorrem nos sistemas de distribuição via centro de triagem ou distribuição.

Como estratégia de resolução foi adotada uma abordagem aproximativa baseada no uso de heurísticas de carregamento e a Busca Tabu para melhoria dos roteiros. Esta abordagem, além de se mostrar efetiva para geração de uma solução inicial, bem como de uma melhor solução factível, tornou possível agregar ao modelo procedimentos que descrevessem de forma adequada certos elementos das operações reais, como no caso do carregamento (agrupamento de itens), da roteirização (sem limitação do número inicial de veículos), a inserção de veículos de diferente tipo e a alocação de mais de um roteiro a um determinado veículo. A Busca Tabu, de modo particular, demonstrou sua capacidade e flexibilidade para lidar com implementações de problemas complexos. Assim, esta abordagem capacitou o modelo como uma ferramenta que

pode ser empregada na construção de diferentes cenários destinados a avaliação de um decisor.

Na maioria das instâncias empregadas nos quatro cenários o critério de parada adotado para as iterações da Busca Tabu mostrou-se adequado, fornecendo um tempo suficiente para a exploração do espaço de busca. Em alguns casos porém, o número de iterações foi bastante reduzido, deixando de ser avaliadas outras opções.

O conjunto de 12 instâncias propostas para execução do modelo trouxe um importante grau de realismo para os testes realizados com o modelo, pois sua construção teve por princípio a idéia de simular somente da forma mais fiel possível as operações reais. Devem ser destacado também o bom desempenho do modelo nos testes realizados com as instâncias da literatura para o 3L-CVRP, em termos de valor da solução, número de roteiros requeridos e tempo de processamento para atingir a melhor solução. Apesar das limitações destas instâncias na representação de uma operação real, possibilitaram um estudo comparativo, o que não ocorreu com as 12 instâncias propostas.

Os recursos obtidos com a implementação do modelo em linguagem C++ possibilitaram um bom desempenho computacional, tanto para a programação dos vários procedimentos como dos tempos de processamento. Devem ser destacados também o aprimoramento introduzido na matriz dinâmica de representação do carregamento e do salvamento parcial do carregamento, que colaborou de forma decisiva para a qualidade das soluções e para redução do tempo entre iterações sucessivas na Busca Tabu.

As recomendações para futuros trabalhos são as seguintes:

- a) adotar um mecanismo na Busca Tabu que favoreça mais o processo de diversificação;
- b) o emprego de uma metaheurística baseada em população (busca global) ou mesmo a adoção de uma abordagem híbrida que combine elementos de um método baseado em população com um método de trajetória;

- c) uma vez que o modelo já considera o tempo de ciclo, adapta-lo para o tratamento de janelas de tempo;
- d) considerar variabilidade nos tempos de deslocamento e de parada;
- e) adotar uma base de dados geográfica, o que tornaria mais exata a mensuração das distância de percurso;
- f) considerar coletas inseridas com entregas;
- g) disponibilizar uma interface com o usuário, no sentido de que este possa aprimorar conforme sua experiência os resultados atingidos pelo modelo.

## REFERÊNCIAS

ALVARENGA, A. C.; NOVAES, A. G. **Logística Aplicada**: suprimento e distribuição física. São Paulo: Edgar Blücher, 2005. 194p.

ALVAREZ-VALDES, R.; PARREÑO, F.; TAMARIT, J.M. A Branch-and-Cut Algorithm for the Pallet Loading Problem. **Computers and Operations Research**, New York, US, v. 32, p. 3007-3029, 2005.

ANGELELLI, E.; SPERANZA, M. G. The Periodic Vehicle Routing Problem with Intermediate Facilities. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, NL, v. 137, p. 233-247, 2002.

ANDRADE, E. L. **Introdução à Pesquisa Operacional**: métodos e modelos para a análise de decisão. Rio de Janeiro: LTC, 1998. 277p.

ARAÚJO, O. C. B. **Problemas de Corte e Empacotamento Tridimensional e Integração com Roteamento de Veículos**. Campinas, 2006, 141fls. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, 2006.

ARAÚJO, R. R. **Um Modelo de Resolução para o Problema de Roteirização em Arcos com Restrição de Capacidade**. Porto Alegre, 2003, 178fls. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

ARENALES, M. *et al.* **Pesquisa Operacional**. São Paulo: Elsevier, 2007. 523p.

AZI, N.; GENDREAU, M.; POTVIN, J-Y. An Exact Algorithm for a Vehicle Routing Problem with Time Windows and Multiple Use of Vehicles. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, NL, v. 202, p. 756-763, 2010.

BAKER, B. M.; AYECHIEW, M. A. A Genetic Algorithm for the Vehicle Routing Problem. **Computers and Operations Research**, New York, US, v. 30, p. 787-800, 2003.

BALLOU, R. H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/Logística Empresarial**. Porto Alegre: Bookman, 2006. Parte III, p. 150-237. Estratégia de Transporte.

BARD, J. F.; KONTORAVDIS, G.; YU, G. A Branch-and-Cut Procedure for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. **Transportation Science**, Baltimore, US, v. 36, n. 2, p. 250-269, 2002.

BASNET, C.; FOULDS, L.; IGBARIA, M. FleetManager: a microcomputer-based decision support system for vehicle routing. **Decision Support Systems**, Amsterdam, NL, v. 16, p. 195-207, 1996.

BELFIORE, P.; YOSHIZAKI, H. T. Y. Scatter Search for a Real-Life Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem with Time Windows and Split Deliveries in Brazil. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, NL, v. 199, p. 750-758, 2009.

BHATTACHARYA, S.; ROY, R.; BHATTACHARYA, S. An Exact Depth-First Algorithm for the Pallet Loading Problem. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, NL, v. 110, p. 610-625, 1998.

BISCHOFF, E. E. Three-dimensional Packing of Items with Limited Load Bearing Strength. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, NL, v. 168, p. 952-966, 2006.

BODIN, L.; BERMAN, L. Routing and Scheduling of School Buses by Computer. **Transportation Science**, Baltimore, US, v. 13, n. 2, p. 113-129, 1979.

BODIN, L. *et al.* Routing and Scheduling of Vehicles and Crews: the state of the art. **Computers and Operations Research**, New York, US, v. 10, p. 63-211, 1983.

BORTFELDT, A.; GEHRING, H. A Hybrid Genetic Algorithm for the Container Loading Problem. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, NL, v. 131, p. 143-161, 2001.

BORTFELDT, A.; GEHRING, H.; MACK, D. A Parallel Tabu Search Algorithm for Solving the Container Loading Problem. **Parallel Computing**, Amsterdam, NL, v. 29, p. 641-662, 2003.

BOTT, K.; BALLOU, R. H. Research Perspectives in Vehicle Routing and Scheduling. **Transportation Research – Part A**, Oxford, GB, v. 20A, p. 239-243, 1986.

BLUM, C.; ROLI, A. Metaheuristics in Combinatorial Optimization: overview and conceptual comparison. **ACM Computing Surveys**, New York, US, v. 35, n. 3, p. 268-308, Sep. 2003.

BRANDÃO, J. A Tabu Search Algorithm for the Open Vehicle Routing Problem. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, NL, v. 157, p. 552-564, 2004.

CACCETTA, L.; HILL, S. P. Branch and Cut Methods for Network Optimization. **Mathematical and Computer Modelling**, Oxford, GB, v. 33, p. 517-532, 2001.

CHOI, E.; TCHA, D-W. A Column Generation Approach to the Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem. **Computers and Operations Research**, New York, US, v. 34, p. 2080-2095, 2007.

CHRISTIANSEN, C. H.; LYSGAARD, J. A Branch-and-Price Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands. **Operations Research Letters**, Amsterdam, NL, v. 35, p. 773-781, 2007.

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

CORRÉA, A. I.; LANGEVIN, A.; ROUSSEAU, L-M. Scheduling and Routing of Automated Guided Vehicles: a hybrid approach. **Computers and Operations Research**, New York, US, v. 34, p. 1688-1707, 2007.

COUNCIL OF SUPPLY CHAIN MANAGEMENT PROFESSIONALS Glossary of Terms. Disponível em: <<http://cscmp.org/digital/glossary/glossary.asp>>. Acesso em: 08/04/2010.

COYLE, J. J.; BARDI, E. J.; NOVACK, R. A. **Transportation**. Mason: Thomson, 2006, 512p.

CRAINIC, T. G.; LAPORTE, G. Planning Models for Freight Transportation. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, NL, v. 97, p. 409-438, 1997.

CRAINIC, T. G.; GENDREAU, M.; POTVIN, J-Y. Intelligent Freight-Transportation Systems: assessment and the contribution of operations research. **Transportation Research – Part C**, New York, US, v. 17, p. 541-557, 2009.

CUNHA, C. B. Aspectos Práticos da Aplicação de Modelos de Roteirização de Veículos a Problemas Reais. **Transportes**, Rio de Janeiro, BR, v. 8, n. 2, p. 51-74, 2000.



CURRENT, J. R.; MARSH, M. Multiobjective Transportation Network Design and Routing Problem: taxonomy and annotation. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, NL, v. 65, p. 4 - 19, 1993.

DAGANZO, C. F. The Distance Traveled to Visit N Points with a Maximum of C Stops per Vehicle: an analytic model and an application. **Transportation Science**, Baltimore, US, v. 18, n. 4, p. 331-350, Nov. 1984.

DANTZIG, G. B.; RAMSER, J. H. The Truck Dispatching Problem. **Management Science**, Providence, US, v. 6, p. 80-91, 1959.

DASKIN, M. Logistics: overview of the state of the art and perspectives on future research. **Transportation Research – Part A**, Oxford, GB, v. 19, p. 383-398, 1985.

DAVIES, A. P.; BISCHOFF, E. E. Weight Distribution Considerations in Container Loading. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, NL, v. 114, p. 509-527, 1999.

DONATI, A. V. *et al.* Time Dependent Vehicle Routing Problem with a Multi Ant Colony System. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, NL, v. 185, p. 1174-1191, 2008.

DORIGO, M.; BLUM, C. Ant Colony Optimization Theory: a survey. **Theoretical Computer Science**. v. 344, p. 243-278, 2005.

DORIGO, M.; STÜTZLE, T. The Ant Colony Optimization Metaheuristic: algorithms, applications and advances. **In: Handbook of Metaheuristics**, Norwell: Kluwer Academic Publishers, p. 251-285, 2003.

DYCKHOFF, H. A Typology of Cutting and Packing Problems. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, NL, v. 44, p. 145-159, 1990.

EISELT, H. A.; GENDREAU, M.; LAPORTE, G. Arc Routing Problems, Part I: The Chinese Postman Problem. **Operations Research**, Baltimore, US, v. 43, n. 2, p. 231-242, Mar.-Apr. 1995.

EISELT, H. A.; GENDREAU, M.; LAPORTE, G. Arc Routing Problems, Part II: The Rural Postman Problem. **Operations Research**, Baltimore, US, v. 43, n. 3, p. 399-414, May-June 1995.

FISHER, M. L.; JAIKUMAR, R. A Generalized Assignment Heuristic for Vehicle Routing. **Networks**, v. 11, p. 109-124, 1981.

FLESZAR, K.; OSMAN, I. H.; HINDI, K. S. A Variable Neighborhood Search Algorithm for the Open Vehicle Routing Problem. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, NL, v. 195, p. 803-809, 2009.

FUELLERER, G. *et al.* Ant Colony Optimization for the Two-dimensional Loading Vehicle Routing Problem. **Computers and Operations Research**, New York, US, v. 36, p. 655-673, 2009.

FUELLERER, G. *et al.* Metaheuristics for Vehicle Routing Problems with Three-Dimensional Loading Constraints. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, NL, v. 201, p. 751-759, 2010.

FÜGENSCHUH, A.; MARTIN, A. Computational Integer Programming and Cutting Planes. **Handbooks in Operations Research and Management Science**. v. 12, p. 69-121, 2005.

G, Y-G; KANG, M-K. A Fast Algorithm for Two-dimensional Pallet Loading Problems of Large Size. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, NL, v. 134, p. 193-202, 2001.

GAJPAL, Y.; ABAD, P. An Ant Colony System (ACS) for Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pickup. **Computers and Operations Research**, New York, US, v. 36, p. 3215-3223, 2009.

GAJPAL, Y.; ABAD, P. Multi-ant Colony System (MACS) for a Vehicle Routing Problem with Backhauls. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, NL, v. 196, p. 102-117, 2009.

GENDREAU, M.; HERTZ, A.; LAPORTE, G. New Insertion and Postoptimization Procedures for the Traveling Salesman Problem. **Operations Research**, Baltimore, US, v. 40, p. 1086-1094, 1992.

GENDREAU, M.; HERTZ, A.; LAPORTE, G. A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem. **Management Science**, Providence, US, v. 40, p. 1276-1290, 1994.

GENDREAU, M.; LAPORTE, G.; SÉGUIN, R. Stochastic Vehicle Routing. **European Journal**

**of Operational Research** , Amsterdam, NL, v. 88, p. 3-12, 1996.

GENDREAU, M. An Introduction to Tabu Search. **In:** Handbook of Metaheuristics, Norwell: Kluwer Academic Publishers, p. 37-54, 2003.

GENDREAU, M. *et al.* A Tabu Search Algorithm for a Routing and Container Loading Problem. **Transportation Science**, Baltimore, US, v. 40, n. 3, p. 342-350, 2006.

GENDREAU, M. *et al.* A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Two-Dimensional Loading Constraints. **Networks**, New York, US, v. 51, n. 1, p. 4-18, 2008.

GLOVER, F.; LAGUNA, M.; MARTÍ, R. Scatter Search and Path Relinking: Advances and Applications. **In:** Handbook of Metaheuristics, Norwell: Kluwer Academic Publishers, p. 1-35, 2003.

GILLET, B.; MULLER, L. A Heuristic Algorithm for the Vehicle Dispatch Problem. **Operations Research**, Baltimore, US, v. 22, p. 340-349, 1974.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização Combinatória e Programação Linear**. Rio de Janeiro: Editora Campus, 2000. 649p.

GOLDEN, B. L.; DE ARMON, J. S.; BAKER, E. K. Computational Experiments with Algorithms for a Class of Routing Problems. **Computers and Operations Research**, New York, US, v. 10, n. 1, p. 47-59, 1983.

GOLDEN, B. L. *et al.* The Impact of Metaheuristics on Solving the Vehicle Routing Problem: algorithms, problem sets, and computational results. **In:** Fleet Management and Logistics. Norwell: Kluwer Academic Publishers, p. 33-56, 1998.

HANSEN, P.; MLADENOVIC, N. Variable Neighborhood Search. **In:** Handbook of Metaheuristics, Norwell: Kluwer Academic Publishers, p. 145-184, 2003.

HASHIMOTO, H. *et al.* The Vehicle Routing Problem with Flexible Time Windows and Traveling Times. **Discrete Applied Mathematics**, Amsterdam, NL, v. 154, p. 2271-2290, 2006.

HASHIMOTO, H.; YAGIURA, M.; IBARAKI, T. An Iterated Local Search Algorithm for the

Time-Dependent Vehicle Routing Problem with Time Windows. **Discrete Optimization**, v. 5, p. 434-456, 2008.

HEMMELMAYR, V. C.; DOERNER, K. F.; HARTL, R. F. A Variable Neighborhood Search Heuristic for Periodic Routing Problems. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, NL, v. 195, p. 791-802, 2009.

HENDERSON, D.; JACOBSON, S. H.; JOHNSON, A. W. The Theory and Practice of Simulated Annealing. **In: Handbook of Metaheuristics**, Norwell: Kluwer Academic Publishers, p. 287-319, 2003.

HO, S.C.; HAUGLAND, D. A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Time Windows and Split Deliveries. **Computers and Operations Research**, New York, US, v. 31, p. 1947-1964, 2004.

HO, W. *et al.* A Hybrid Genetic Algorithm for the Multi-Depot Vehicle Routing Problem. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 21, 548-557, 2008.

HOFFMAN, K. Combinatorial Optimization: current successes and directions for the future. **Journal of Computational and Applied Mathematics**, Antwerpen, BE, v. 124, p. 341-360, 2000.

HILLIER, F; LIEBERMAN, G. **Introduction to Operations Research**. New York: McGraw-Hill, 1994. 648p.

IORI, M.; SALAZAR-GONZÁLEZ, J. J.; VIGO, D. An Exact Approach for the Vehicle Routing Problem with Two-dimensional Loading Constraints. **Transportation Science**, Baltimore, US, v. 41, n. 2, p. 253-264, 2007.

KALLEHAUGE, B.; LARSEN, J.; MADSEN, O. B. G. Lagrangian Duality Applied to the Vehicle Routing Problem with Time Windows. **Computers and Operations Research**, New York, US, v. 33, p. 1464-1487, 2006.

KEEDY, S.; MENDONÇA, P. C. C. **Transportes e Seguros no Comércio Exterior**. São Paulo: Aduaneiras, 2000. 254p.

KEENAN, P. B. Spatial Decision Support Systems for Vehicle Routing. **Decision Support**

**Systems**, Amsterdam, NL, v. 22, p. 65-71, 1998.

KYTÖJOKI, J. *et al.* An Efficient Variable Neighborhood Search Heuristic for Very Large Scale Vehicle Routing Problems. **Computers and Operations Research**, New York, US, v. 34, p. 2743-2757, 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA **IBGE Cidades**. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>> Acesso em 14/04/2010.

LACHTERMACHER, G. **Pesquisa Operacional na Tomada de Decisões**. Rio de Janeiro: Ed. Campus, 2004. 384p.

LAGUNA, M. Global Optimization and Meta-Heuristics. College of Business, University of Colorado at Boulder. Disponível em: <<http://leeds.colorado.edu/faculty/laguna/articles/elss.pdf>>. Acesso em: 18/08/2003.

LAPORTE, G. Fifty Year of Vehicle Routing. **Transportation Science**, Baltimore, US, v. 43, n. 4, p. 408-416, 2009.

LIM, A.; ZHANG, X. The Container Loading Problem. In: SYMPOSIUM ON APPLIED COMPUTING, 2005, Santa Fe. **Anais ....** Santa Fe: ACM, 2005, p. 913-917.

LIN, S.; KERNIGHAN, B. An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling Salesman Problem. **Operations Research**, Baltimore, US, v. 21, p. 498-516, 1973.

LIN, S-W. *et al.* Applying Hybrid Meta-Heuristics for Capacitated Vehicle Routing Problem. **Expert Systems with Applications**, New York, US, v. 36, p. 1505-1512, 2009.

LOESCH, C.; HEIN, N. **Pesquisa Operacional: fundamentos e modelos**. Blumenau: Editora da Furb, 1999. 270p.

LOURENÇO, H. R.; MARTIN, O. C.; STÜTZLE, T. Iterated Local Search. **In: Handbook of Metaheuristics**, Norwell: Kluwer Academic Publishers, p. 320-353, 2003.

LU, Q.; DESSOUKY, M. An Exact Algorithm for the Multiple Vehicle Pickup and Delivery Problem. **Transportation Science**, Baltimore, US, v. 38, n. 4, p. 503-514, 2004.

MARTI, R. Procedimientos Metaheurísticos en Optimización Combinatoria. A ser publicado em: Publicacions Matemàtiques de la Universitat de Valencia. Disponível em: <<http://matheron.uv.es/investigador/metaheur.pdf>>. Acesso em: 18/08/2003.

MARTÍ, R.; LAGUNA, M.; GLOVER, F. Principles of Scatter Search. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, NL, v. 169, p. 359-372, 2006.

MENDOZA, J. E. *et al.* A Memetic Algorithm for the Multi-Compartment Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands. **Computers and Operations Research** (2009), doi 10.1016/j.cor.2009.06.015

MITCHELL, J. E. Cutting Plane Algorithms for Integer Programming. Encyclopedia of Optimization, v. 2, p. 525-533, 1998. Disponível em: <<http://rpi.edu/~mitchj/papers/Mitchell.pdf>>. Acesso em 24/08/07.

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**, New York, US, v. 33, p. 595-619, 2006.

MORABITO, R.; MORALES, S. R.; WIDMER, J. A. Loading Optimization of Palletized Products on Trucks. **Transportation Research – Part E**, Vancouver, CA, v. 36, p. 285-296, 2000.

MOURA, A.; OLIVEIRA, J. F. An Integrated Approach to the Vehicle Routing and Container Loading Problems. **OR Spectrum**, v. 31, n. 4, p. 775-800, 2009.

NEWELL, G. F., DAGANZO, C. F. Design of Multiple-Vehicle Delivery Tours – I: a ring-radial network. **Transportation Research**, Oxford, GB, v. 20, n. 5, p. 345-363, Oct. 1986.

NEWELL, G. F., DAGANZO, C. F. Design of Multiple-Vehicle Delivery Tours – II: other metrics. **Transportation Research**, Oxford, GB, v. 20, n. 5, p. 365-376, Oct. 1986.

NEWELL, G. F., DAGANZO, C. F. Design of Multiple-Vehicle Delivery Tours – III: valuable goods. **Transportation Research**, Oxford, GB, v. 20, n. 5, p. 377-390, Oct. 1986.

NISHI, T.; HIRANAKA, Y.; INUIGUCHI, M. Lagrangian Relaxation with Cut Generation for Hybrid Flowshop Scheduling Problems to Minimize the Total Weighted Tardiness. **Computers**

**and Operations Research**, New York, US, v. 37, p. 189-198, 2010.

NOVAES, A. G. **Sistemas Logísticos**: transporte, armazenagem e distribuição física de produtos. São Paulo: Edgard Blücher, 1989, 372p.

NOVAES, A. G. **Logística e Gerenciamento da Cadeia de Distribuição**. Rio de Janeiro: Ed. Campus, 2001, 409p.

NOVAES, A. G.; CURSI, J. E. S.; GRACIOLLI, O. D. A Continuous Approach to the Design of Physical Distribution Systems. **Computers and Operations Research**, New York, US, v. 27, n. 3, p. 877-893, 2000.

NOVAES, A. G.; GRACIOLLI, O. D. Designing Multi-vehicle Delivery Tours in a Grid-cell Format. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, NL, v. 119, p. 613-634, 1999.

OUYANG, Y. Design of Vehicle Routing Zones for Large-scale Distribution Systems. **Transportation Research – Part B**, New York, US, v. 41, p. 1079-1093, 2007.

PARTYKA, J. ; HALL, R. On the Road to Connectivity. **OR/MS Today**. Disponível em: <<http://www.lionhrtpub.com/orms/orms-2-10/frsurvey.html>>. Acesso em 15/03/10.

PISINGER, D. Heuristics for the Container Loading Problem. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, NL, v. 141, p. 382-392, 2002.

PISINGER, D.; ROPKE, S. A General Heuristic for Vehicle Routing Problems. **Computers and Operations Research**, New York, US, v. 34, p. 2403-2435, 2007.

PORTAL, G. M. *et al.* Uma Busca Tabu Aplicada ao Problema de Roteamento com Restrições de Empacotamento Tridimensionais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 41., 2009, Porto Seguro. **Anais ...**, Porto Seguro: SBPO, 2009.

POTVIN, J-Y. Evolutionary Algorithms for Vehicle Routing. **INFORMS Journal on Computing**, Lincicum, US, v. 21, n. 4, p. 518-548, 2009

PRINS, C. **Algorithmes de Graphes**. Paris: Eyrolles, 1994. 370p.

PRINS, C. A Simple and Effective Evolutionary Algorithm for the Vehicle Routing Problem. **Computers and Operations Research**, New York, US, v. 31, p. 1985-2002, 2004.

PUREZA, V.; MORABITO, R. Some Experiments with a Simple Tabu Search Algorithm for the Manufacturer's Pallet Loading Problem. **Computers and Operations Research**, New York, US, v. 33, p. 804-819, 2006.

RALPHS, T. K. Parallel Branch and Cut for Capacitated Vehicle Routing. **Parallel Computing**, Amsterdam, NL, v. 29, p. 607-629, 2003.

REEVES, C. Genetic Algorithms. **In: Handbook of Metaheuristics**, Norwell: Kluwer Academic Publishers, p. 55-82, 2003.

RESENDE, M. G. C.; RIBEIRO, C. C. Greedy Randomized Adaptive Search Procedures. **In: Handbook of Metaheuristics**, Norwell: Kluwer Academic Publishers, p. 219-249, 2003.

RIBEIRO, G. M.; LORENA, L. A. N. Lagrangean Relaxation with Clusters and Column Generation for the Manufacturer's Pallet Loading Problem. **Computers and Operations Research**, New York, US, v. 34, p. 2695-2708, 2007.

RUIZ, R.; MAROTO, C.; ALCARAZ, J. A Decision Support System for a Real Vehicle Routing Problem. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, NL, v. 153, p. 593-606, 2004.

SCHEITHAUER, G. LP-Based Bounds for the Container and Multi-Container Loading Problem. **International Transactions in Operational Research**, Oxford, GB, v. 6, p. 199-213, 1999.

SCHEITHAUER, G.; SOMMERWEIB, U. 4-block Heuristic for the Rectangle Packing Problem. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, NL, v. 108, p. 509-526, 1998.

SMITH, B. M. Constraint Programming in Practice: scheduling a rehearsal. Report APES-67-2003, 2003. Disponível em: <<http://www.dcs.st-and.ac.uk/apes>>. Acesso em 19/07/08.

SOAK, S-G. *et al.* An Effective Evolutionary Algorithm for the Multiple Container Packing Problem. **Progress in Natural Science**. V. 18, p. 337-344, 2008.



SPRAGUE Jr, R. H.; CARLSON, E. D. **Building Effective Decision Support Systems**. New Jersey: Prentice-Hall, 1982. 329p.

VALENTE, A. M.; PASSAGLIA, E.; NOVAES, A. G. **Gerenciamento de Transporte e Frotas**. São Paulo: Pioneira, 1997. 215p.

VOUDOURIS, C.; TSANG, E. P. K. Guided Local Search. **In: Handbook of Metaheuristics**, Norwell: Kluwer Academic Publishers, p. 185-218, 2003.

TAN, K. C.; CHEONG, C. Y.; GOH, C. K. Solving Multiobjective Vehicle Routing Problem with Stochastic Demand Via Evolutionary Computation. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, NL, v. 177, p. 813-839, 2007.

TARANTILIS, C. D.; KIRANOUDIS, C. T. Using a Spatial Decision Support System for Solving the Vehicle Routing Problem. **Information & Management**, Amsterdam, NL, v. 39, p. 359-375, 2002

TAVAKKOLI-MOGHADDAM, R. *et al.* A New Capacitated Vehicle Routing Problem with Split Service for Minimizing Fleet Cost by Simulated Annealing. **Journal of the Franklin Institute**, Elmsford, US, v. 344, p. 406-425, 2007.

TOTH, P.; VIGO, D. Exact Solution of the Vehicle Routing Problem. **In: Fleet Management and Logistics**. Norwell: Kluwer Academic Publishers, p. 1-31, 1998.

TOTH, P.; VIGO, D. Models, Relaxations and Exact Approaches for the Capacitated Vehicle Routing Problem. **Discrete Applied Mathematics**, Amsterdam, NL, v. 123, p. 487-512, 2002.

TURBAN, E.; McLEAN, E.; WETHERBE, J. **Tecnologia da Informação para Gestão: transformando os negócios na economia digital**. Porto Alegre: Bookman. 2004. 660p.

ZACHARIADIS, E. E.; TARANTILIS, C. D.; KIRANOUDIS, C. T. A Guided Tabu Search for the Vehicle Routing Problem with Two-dimensional Loading Constraints. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, NL, v. 195, p. 729-743, 2009.






















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. **Expert Systems with Applications**, New York, US, v. 36, p. 1070-1081, 2009.

ZACHARIADIS, E. E.; KIRANOUDIS, C. T. An Open Vehicle Routing Problem Metaheuristic for Examining Wide Solutions Neighborhoods. **Computers and Operations Research**, New York, US, v. 37, p. 712-723, 2010.

ZIVIANI, N. **Projeto de Algoritmos**. São Paulo: Ed. Pioneira, 1993. 267p.

ZHONG, Y.; COLE, M. H. A Vehicle Routing Problem with Backhauls and Time Windows: a guided local search solution. **Transportation Research – Part E**, Vancouver, CA, v. 41, p. 131-144, 2005.

**APÊNDICE A** – Estrutura de arquivos do programa implementado em C++

 BuscaTabu.h	 BuscaTabu.cpp
 Carga.h	 Carga.cpp
 Carregamento.h	 Carregamento.cpp
 CentroTriagem.h	 CentroTriagem.cpp
 Cliente.h	 Cliente.cpp
 Controle.h	 Controle.cpp
 MatrizDeCargas.h	 MatrizDeCargas.cpp
 MetodoEconomias.h	 MetodoEconomias.cpp
 Ponto.h	 Ponto.cpp
 Veiculo.h	 Veiculo.cpp
	 main.cpp

## APÊNDICE B – Programa principal

```

#include "BuscaTabu.h"
#include <assert.h>
#include <iostream>
#include "Controle.h"
#include "MatrizDeCargas.h"

using namespace std;

int main(int argc, char *argv[])
{
    //assert(argc == 2);

    Controle* config = NULL;
    config = Controle::getInstancia();
    config->setConfiguracaoRestricoes();

    cout << "configuracao de restricoes:" << endl;
    cout << "apoio = " << config->getRestricaoApoio() << endl;

    if(config->getRestricaoApoio())
    cout << "apoio Minimo = " << config->getApoioMinimo() << endl;

    cout << "lifo = " << config->getRestricaoLifo() << endl;
    cout << "fragilidade = " << config->getRestricaoFragilidade() << endl;

    cout << "tempo = " << config->getRestricaoTempo() << endl;
    cout << "distribuicao carga = " << config->getRestricaoDistribuicaoPeso() << endl;

    //DEBUG
    // Controle::getInstancia()->setCiclosARodar(10);
    // Controle::getInstancia()->setTempoCicloEmSegundos(20);

    if(argc>1)
    {
        Controle::getInstancia()->setNomeArquivoSaida( argv[1] );
    }

    if(argc>2)
    {
        int ciclos = atoi(argv[2]);
        //if(ciclos>0)
        config->setCiclosARodar(ciclos);
    }
}

```

```
        // cout << argc << " argumentos " << endl;

    }
    cout << "Ciclos a serem rodados (ciclos de " << config->getTempoCicloEmSegundos()/60 <<
" minutos) = " << config->getCiclosARodar() << endl << endl;

    config->zeraTimer();

    if(!config->leInstancia())
    {
        cout << "erro ao ler instancia" << endl;
        return 0;
    }

    config->completaGrafo();

    config->executaProcessamento();

    return 0;
}
```