

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

Rafael Roco de Araújo

Faculdade de Engenharia/PUCRS
Empresa Pública de Transportes e Circulação - EPTC

Fernando Dutra Michel

Luiz Afonso dos Santos Senna

Lastran –Laboratório de Sistemas de Transportes
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - Escola de Engenharia/UFRGS

RESUMO

O problema da roteirização de veículos vem sendo intensamente estudado nos últimos 50 anos. Dado o grande potencial de aplicação prática deste problema no setor de transporte de carga, em especial, vários desenvolvimentos são propostos na literatura com o objetivo de alinhá-lo com as operações reais. Recentemente, uma nova abordagem vem sendo explorada pela literatura, que combina o problema da roteirização de veículos com o problema do carregamento em duas ou três dimensões. Este trabalho apresenta um modelo aproximado para resolução do 3L-CVRP que combina o uso de heurística construtiva para configuração dos carregamentos com a Busca Tabu aplicada para melhoria dos roteiros. Além das restrições de carregamento, o modelo define soluções de mínima distância considerando restrições de distribuição de peso nos eixos do veículo e tempo máximo de jornada de trabalho. Nos testes computacionais, realizados com um conjunto proposto de 12 instâncias, são construídos cenários utilizando veículos leves e médios, de forma separada e combinada. Nestes cenários é avaliada também a possibilidade de um dado veículo ser alocado a mais de um roteiro e o custo operacional total da solução obtida. Testes adicionais foram realizados com um conjunto de 27 instâncias da literatura, mostrando resultados bastante satisfatórios.

ABSTRACT

The problem of vehicle routing has been studied in the last 50 years. As a consequence of the potential practical application of this problem in the freight transport sector, several developments were proposed in the literature, aiming at adjusting it with real operations. Recently, a new approach combines the problem of vehicle routing with the problem of loading in two or three dimensions. This work presents a model to solve 3L-CVRP that combines the use of constructive heuristic for configuration of loading with Tabu Search applied to improving routings. Besides loading constraints, the model defines solutions of minimum distance considering constraints of weight distribution over the vehicle axles and maximum journey work times. Computational tests were conducted considering a set of 12 instances; taking into account separated and combined scenarios using light and medium vehicles. In these scenarios is also assessed the possibility of a vehicle being allocated to more than one routing and the total operational cost of the solution obtained. Additional tests were conducted considering 27 instances from the literature, showing good results.

1. INTRODUÇÃO

Muitas empresas trabalham de forma intensa com o objetivo de tornar mais eficiente o processo de movimentação de seus produtos. Esta preocupação atinge não somente as empresas que atuam nos setores da indústria e do comércio, mas também aquelas que prestam os mais variados serviços. A entrega dos produtos demandados pelos clientes no local e tempo previamente estipulados e com a integridade preservada, é hoje um atributo básico para o estabelecimento da vantagem competitiva. Visando atender a esta necessidade, empresas de transporte de cargas e prestadores de serviços logísticos que operam frotas de caminhões deparam-se diariamente com o problema de definir a melhor sequência em que os pontos de entrega devem ser visitados e a forma como as respectivas cargas devem ser acomodadas nos veículos a fim de preservar sua integridade durante a transferência entre o depósito e o domicílio do cliente, bem como facilitar seu manuseio por parte da tripulação.

Para gerar sustentabilidade e lucratividade para uma empresa que tem o transporte como competência central, tal atividade necessita de um planejamento adequado, nos níveis estratégico, tático e operacional. O planejamento operacional, em especial, apresenta certas características que tornam sua execução um tanto desafiante para o transportador. Na distribuição física realizada a

partir de um depósito central, o curto intervalo de tempo disponível entre a chegada dos pedidos e o instante estipulado para as entregas faz com que as decisões sobre o embarque das cargas tenham que ser tomadas de forma rápida. Além disso, este processo decisório envolve muitas variáveis como o local das entregas, as características dos itens que serão transportados e a capacidade da frota disponível. Assim, o uso de modelos matemáticos adequados para apoio à decisão pode ser de grande utilidade para os planejadores das empresas.

No contexto do transporte rodoviário de cargas, uma decisão operacional que vem já há algum tempo chamando a atenção dos pesquisadores da área de pesquisa operacional é o da roteirização de veículos. Laporte (2009) apresenta uma panorâmica dos métodos de resolução desenvolvidos nesta área nos últimos 50 anos.

O Problema da Roteirização de Veículos Capacitado (*Capacitated Vehicle Routing Problem – CVRP*) pode ser definido segundo Toth e Vigo (1998), como o caso em que: todos os clientes correspondem aos pontos de entrega; as demandas são conhecidas antecipadamente e não podem ser divididas; os veículos são idênticos e alocados a um único depósito (que pode ser um centro de triagem ou distribuição); as restrições de capacidade (em peso e/ou volume) são consideradas de forma simplificada; o problema tem como objetivo minimizar o custo total, isto é, o número de roteiros e/ou sua extensão ou tempo de viagem.

Vários desenvolvimentos apresentados na literatura buscam alinhar o CVRP às operações reais. Apesar da sofisticação de tais modelos, uma séria limitação encontrada para implantação prática é a forma simplificada pela qual são consideradas as características dimensionais dos itens a ser carregados nos veículos, o que pode conduzir a soluções infactíveis na prática.

O problema da acomodação das cargas nos veículos, ou problema de carregamento de veículos é descrito genericamente como um problema de corte e empacotamento (Dickhoff, 1990), e vem sendo tratado na literatura no contexto do carregamento de contêineres e de pallets. Desenvolvimentos para a resolução do problema de carregamento de contêineres são apresentados por Bortfeld e Gehring (2001), Eley (2002), Pisinger (2002), Bortfeld *et al.* (2003), Soak *et al.* (2008), Egeblad *et al.* (2010). Já o problema do carregamento de pallets é abordado por Pureza e Morabito (2006) e Martins e Dell (2008). Entretanto, quando este problema é aplicado ao carregamento de veículos, deve considerar certas particularidades como, por exemplo, a seqüência em que as entregas serão realizadas e a distribuição correta de peso nos eixos do veículo. Assim, levar em conta as restrições de carregamento dos itens a serem transportados em acordo com as dimensões e a capacidade de peso dos veículos, durante a resolução do problema de roteirização conduzirá a resultados coerentes com as operações reais.

O tratamento integrado do problema de roteirização e do problema de carregamento de veículos é recente na literatura, sendo apresentado através de duas classes: o 2L-CVRP (*Capacitated Vehicle Routing Problem with Two-dimensional Loading Constraints*), introduzido por Iori *et al.* (2007); e o 3L-CVRP (*Capacitated Vehicle Routing Problem with Three-dimensional Loading Constraints*), introduzido por Gendreau *et al.* (2006).

No que diz respeito às estratégias de resolução, para o 2L-CVRP dominam as abordagens aproximadas. Gendreau *et al.* (2008) empregam um algoritmo de Busca Tabu, Zachariadis *et al.* (2009) empregam um algoritmo de incorpora os princípios da Busca Tabu e da Busca Local Guiada, enquanto Fuellerer *et al.* (2009) empregam a Otimização por Colônia de Formigas. Mais recentemente Leung *et al.* (2011) propõem uma metodologia que incorpora as teorias da Busca Tabu e da Busca Local Guiada Estendida, enquanto Duhamel *et al.* (2011) propõem um algoritmo que combina o GRASP com uma Busca Local Evolutiva. Uma abordagem exata para o 2L-CVRP é proposta por Iori *et al.* (2007) aplicando um algoritmo de *branch-and-bound*.

As abordagens aproximadas também dominam as propostas de resolução do 3L-CVRP. Gendreau *et al.* (2006) apresentam um procedimento que combina heurísticas de carregamento com a Busca Tabu. Araújo (2006) propõe a resolução do problema combinando o uso de um procedimento baseado em cubóides inspirado na Busca em Vizinhança Variável para o *Bin Packing Problem* com a Busca Tabu. Portal *et al.* (2009) utilizam um procedimento de busca local para definição do carregamento associado a Busca Tabu para otimização das rotas. Uma versão do problema que incorpora janelas de tempo é resolvida por Moura e Oliveira (2009) através de uma abordagem sequencial e de uma abordagem hierárquica que utilizam um algoritmo de busca local, o GRASP e Simulação Monte Carlo. Fuellerer *et al.* (2010) propõem o uso da Otimização por Colônia de Formigas para resolução do problema.

Este trabalho propõe um modelo aproximado para resolução do 3L-CVRP que combina o uso de heurística construtiva para configuração dos carregamentos com a Busca Tabu aplicada para melhoria dos roteiros. Além das restrições de carregamento, o modelo define soluções de mínima distância considerando restrições de distribuição de peso nos eixos do veículo e tempo máximo de jornada de trabalho. Nos testes computacionais, realizados com um conjunto proposto de 12 instâncias, são construídos cenários utilizando veículos leves e médios, de forma separada e combinada. Nestes cenários é avaliada também a possibilidade de um dado veículo ser alocado a mais de um roteiro e o custo operacional total da solução obtida.

O trabalho está organizado da seguinte forma. Na seção 2 é feita a descrição do 3L-CVRP. A seção 3 apresenta o modelo proposto neste trabalho. A seção 4 descreve a aplicação do modelo, enquanto a seção 5 apresenta os resultados dos experimentos computacionais. Por último, a seção 6 apresenta as conclusões do trabalho.

2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O 3L-CVRP pode ser descrito da seguinte forma, tendo por 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, um grupo de clientes (vértices de 1, ..., n) destinatários das entregas e E um conjunto de arestas e_{ij} que representam 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 v 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 I_{ik} de m_i itens tri-dimensionais, sendo que cada item I_{ik} ($k = 1, \dots, m_i$) possui largura w_{ik} , altura h_{ik} e comprimento l_{ik} . 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 $s_i = \sum_{k=1}^{m_i} w_{ik} h_{ik} l_{ik}$.

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

- 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° no plano $w-l$;
- Cada item I_{ik} pode ser classificado como frágil ou não-frágil, sendo então atribuído um índice de fragilidade f_{ik} ($i = 1, \dots, n$; $k = 1, \dots, m_i$), igual a 1 se I_{ik} 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;

- Quando um item I_{ik} 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, $A' \geq aw_{ik}l_{ik}$, onde $0 \leq a \leq 1$ é um dado parâmetro que representa a fração mínima de área de I_{ik} que deve estar apoiada. Esta restrição é sempre satisfeita quando um item é colocado diretamente sobre o piso do compartimento de carga.
- No instante da descarga em um cliente i , todos os respectivos itens I_{ik} devem estar acessíveis, podendo ser movimentados livremente sem que seja necessário manusear itens de outros clientes. Esta restrição de sequência LIFO (*last in first out*) é também denominada de carregamento sequencial.

O 3L-CVRP consiste em determinar um conjunto de v 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 viável de todos os itens demandados por todos os clientes, satisfazendo orientação vertical fixa, fragilidade, área mínima de suporte e sequência LIFO e o custo de trajeto ao longo do roteiro é mínimo.

3. PROPOSTA DE UM MODELO PARA A RESOLUÇÃO DO 3L-CVRP

O modelo de resolução do problema de roteirização e carregamento de veículos proposto neste trabalho está diretamente relacionado com as 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. Maiores detalhes sobre este modelo são encontrados em Araújo (2010).

Aspectos que trazem complexidade adicional para este trabalho de planejamento advém do uso de veículos com diferentes capacidades, do tempo de ciclo que pode ser definido para cada tripulação conforme a jornada de trabalho estabelecida, do aproveitamento de veículos em mais de uma rota e de metas relacionadas ao custo operacional do transporte. O modelo proposto apresenta as seguintes características:

- Determina roteiros de percurso mínimo com início e fim no centro de triagem ou distribuição;
- É caracterizado como um CVRP com restrições de carregamento tridimensional (3L-CVRP) que considera restrições de distribuição de peso nos eixos do veículo e de tempo máximo para jornada de trabalho;
- Constrói roteiros e carregamentos de forma simultânea;
- Determina somente soluções iniciais factíveis em termos de carregamento tridimensional e tempo máximo de ciclo;
- As demandas são conhecidas antecipadamente (determinísticas);
- Não é estipulado um número máximo de veículos para solução inicial, uma vez que na prática veículos extras podem ser agregados quando necessário;
- Constrói rotas para veículos idênticos e também analisa a possibilidade de inserção de veículo de maior ou menor capacidade;
- Lida com itens tridimensionais que apresentam restrições de fragilidade, área mínima de suporte e carregamento sequencial;
- Os clientes podem receber mais de um tipo de item e vários itens de um mesmo tipo;
- Se houver possibilidade, um veículo é alocado a mais de uma rota por dia;
- Calcula o custo operacional relativo a cada roteiro após a determinar a solução inicial e após executar a fase de melhoria.

3.1. Apresentação e descrição do modelo

O modelo proposto é composto por 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 sequencial) 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 reavaliada a possibilidade de alocar mais de um roteiro a um veículo, sendo calculado novamente o custo operacional total da solução.

3.2. Representação do carregamento

Os problemas de carregamento que consideram o arranjo de itens tridimensionais requerem que seja adotada uma forma eficiente de representação em termos computacionais, pois existe a necessidade de um número significativo de iterações em que o procedimento de carregamento invoca a inserção e movimentação de itens. 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.

3.3. 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 adequadamente as características reais dos carregamentos. A heurística de carregamento foi desenvolvida de modo a lidar com situações onde os itens são de tamanho real e representam a diversidade de dimensões; existe repetição de itens destinados a um único cliente; a organização dos itens destinados a um cliente no compartimento de carga é feita de modo a facilitar o manuseio e a 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 que 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.

3.3.1 Procedimento para o 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.

Eley (2002) emprega a estratégia de agrupamento de itens idênticos na resolução de 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. No procedimento adotado, uma primeira análise é feita sobre a possibilidade dos itens formarem um cubo com largura que não ultrapasse a largura do compartimento de carga. Se não for possível a formação de cubos é avaliada a formação de pilhas. Em ambas as situações a altura resultante é comparada com a altura interna do compartimento de carga. À medida que os agrupamentos são formados, passam na sequência a serem organizados no compartimento de carga pelo procedimento de construção do carregamento.

3.3.2 Procedimento para 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 adaptá-la a situação em que são permitidos somente carregamentos factíveis (a exceção da distribuição de peso nos eixos).

Neste procedimento busca-se ocupar primeiramente o fundo do veículo e no sentido da esquerda para a direita e que tenha pelo menos dois apoios laterais disponíveis. Em caso de empate, considera-se o menor valor na largura e se ocorrer um segundo empate, o menor valor na altura. Quando um item é chamado da lista, a primeira posição a ser testada considera sua maior dimensão colocada paralela a dimensão do compartimento de carga. Se não for possível realizar esta inserção no espaço disponível é feita então a rotação de 90° em torno do eixo y . 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 existir 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.

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. As trocas são realizadas duas a duas gerando novas soluções até que todos os itens sejam trocados. Este procedimento é repetido até que nenhuma das novas soluções geradas seja melhor do que a melhor solução.

3.4. 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. A solução inicial define uma primeira sequência 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. 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. Em primeiro lugar é feita a inicialização da Busca Tabu tornando a solução inicial (e a possível pré-melhoria) como solução corrente. Neste estágio 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 infactíveis a fim de favorecer a diversificação. Já a vizinhança é explorada através de dois tipos de movimento: *inserção inter-rotas* e *trocas intra-rota* respectivamente.

Na inserção inter-rotas 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 e 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. O movimento *intra-rota* 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 calculado através da Equação 1, derivada de Valente *et al.* (1997):

$$C_{at} = (D_{di} \times P_i) / D_{ee} \quad (1)$$

onde:

C_{at} é o peso de cada item incidente 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.

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-se qual foi a melhor e se houve melhoria em relação à solução inicial. Caso contrário retorna a solução inicialmente enviada. 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 melhor solução. 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:

$$f(R) = D_T + \alpha \cdot E_{pt} + \beta \cdot E_c + \delta_1 \cdot E_{ed} + \delta_2 \cdot E_{et} + \pi \cdot E_{tc} + \gamma f(i, j) \quad (2)$$

onde:

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

α : 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;

β : 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;

δ_1 : representa uma penalidade aplicada sobre a infactibilidade 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;

δ_2 : representa uma penalidade aplicada sobre a infactibilidade 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;

π : representa uma penalidade aplicada sobre a infactibilidade 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;

γ : 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.

Na Equação 2 foram adotados valores dinâmicos para α e β . Já os coeficientes δ_1 , δ_2 e π 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_{ij}) 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 melhor solução. Foi adotado também um critério de intensificação duplicando o valor de p nas 3 iterações seguintes quando a solução corrente melhora a melhor solução.

4. APLICAÇÃO DO MODELO

4.1 Construção de instâncias para simulação de um caso real

Para a aplicação do modelo proposto foram criadas instâncias que procuram simular as operações de entrega de produtos a partir de centros de triagem ou distribuição. A definição dos dados e parâmetros necessários para construção das instâncias concentrou-se em quatro aspectos principais: a configuração da rede de atendimento que representa 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.

A rede de atendimento foi construída considerando o local para o centro de triagem (porto seco) e 300 pontos de entrega que correspondem aproximadamente ao número de clientes de uma empresa transportadora ou de um prestador de serviços logísticos de médio-grande porte. Foram coletadas as medidas reais de comprimento, largura e altura, além do peso, de uma série de caixas reais e as distâncias dos pontos ao centro de triagem e entre os pontos.

Foram considerados dois tipos de veículos: leve com Peso Bruto Total – PBT de 7850kg (custo fixo diário por veículo de R\$339,10 e variável de R\$ 0,58/km) e médio com PBT de 13000kg (custo fixo diário por veículo de R\$361,47 e variável de R\$ 0,76/km). 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.

Para definição do tempo de deslocamento (t_d) entre dois pontos é considerada a distância e a velocidade média de percurso (v_m), estipulada em 40km/h. O tempo de parada leva em consideração a soma do tempo de espera, estipulado em 0,25 horas e, o tempo de descarga que depende da quantidade de itens manuseados e de sua respectiva classificação conforme o volume unitário: (a) tipo 1 (volume $\leq 0,2m^3$), 30 segundos; (b) tipo 2 (volume $> 0,2m^3$), 40 segundos. Já o tempo de jornada de trabalho foi estimado em 8,5 horas. Como o modelo avalia também a possibilidade de um veículo realizar mais de um roteiro em uma jornada de trabalho, um tempo adicional foi estipulado em uma hora, resultando então em uma jornada de trabalho de 9,5 horas.

4.2. 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. A Figura 1 apresenta as características das instâncias em termos de número de clientes, número total de itens, volume total dos itens e peso total dos itens.

5. EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

Os testes computacionais foram realizados em um Intel Core 2 Duo 6300, com 1,86 GHz e 2 Gb de RAM.

5.1. Validação do modelo proposto

A validação do modelo proposto foi feita com as 27 instâncias propostas por Gendreau *et al.* (2006), disponíveis em <http://www.or.deis.unibo.it/research.html>. Estas instâncias consideram somente itens de grande tamanho, não havendo repetição de um mesmo tipo para um mesmo cliente (itens iguais). Além disso, o peso de cada item não é conhecido, mas somente o peso total da carga de cada certo cliente e 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).

Instância	Nº de clientes	Nº de itens	Volume total (m ³)	Peso total (kg)
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

Figura 1: Características das instâncias

Na aplicação do modelo proposto a avaliação de uma dada solução foi feita através da Equação 2 sem considerar as parcelas de distribuição de peso nos eixos dianteiro e traseiro, bem como de tempo de ciclo. Os resultados do teste 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 o 3L-CVRP.

5.2 Aplicação do modelo em instâncias que simulam um caso real

O tempo de processamento adotado foi de 2 horas para as instâncias (Figura 1) 1, 2 e 3 e de 3 horas para as demais. Adotaram-se estes valores por serem aceitáveis na prática e possibilitarem um adequado número de iterações. Para as 12 instâncias propostas foram construídos 4 cenários. O primeiro que emprega somente veículos leves; o segundo que emprega veículos leves, mas com possibilidade de inserção de veículos médios; o terceiro que emprega somente veículos médios e finalmente o quarto que emprega veículos médios, mas com possibilidade de inserção de veículos leves.

No primeiro cenário houve redução do número de roteiros em relação à solução inicial somente em 3 instâncias (1, 4 e 10). Este fato pode 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. À 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.

Já para o segundo cenário observou-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 neste cenário o aumento no tempo de processamento requerido para obtenção da melhor solução quando comparado ao primeiro cenário. 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. Em nove instâncias houve inserção do veículo médio.

No caso do terceiro cenário 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. Neste caso, o aumento da capacidade de carga, apesar de possibilitar uma melhor ocupação do espaço, torna muito grande o número de opções a serem 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.

No quarto cenário não ocorreu redução do número de roteiros após a Busca Tabu. Houve melhora no valor da função-objetivo e inserção de veículo leve em 8 instâncias com a aplicação da Busca Tabu.

A análise das variações percentuais dos valores do custo inicial e final mostra que somente no caso de duas instâncias (instâncias 1 e 6 quando são comparados o primeiro e o terceiro cenário) é que ocorre uma efetiva redução de custo. Nos demais casos da comparação feita entre o primeiro cenário e o segundo (a exceção das instâncias 2, 8, 9 e 12 onde o custo ficou inalterado) e entre o primeiro e o terceiro cenário notou-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 do terceiro e quarto cenário 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.

6. CONCLUSÕES

Este artigo propôs a resolução do 3L-CVRP através de abordagem aproximativa que combina uma heurística construtiva para acomodação dos itens no compartimento de carga de veículos e a Busca Tabu para melhoria dos roteiros. Além das restrições de carregamento tridimensionais foram consideradas restrições de distribuição de peso nos eixos do veículo e tempo máximo para jornada de trabalho da tripulação. O modelo considera ainda o uso de veículos de diferentes capacidades de forma separada ou combinada em uma mesma rota, a alocação de mais de uma rota a um mesmo veículo e o cálculo do custo operacional total da solução.

A validação do modelo foi realizada com um conjunto de 27 instâncias da literatura, que mostrou o potencial do modelo em atingir ótimos resultados quando comparados com aqueles encontrados na literatura. O modelo foi testado num conjunto de 12 instâncias com dados que buscam simular da forma mais fiel as operações reais. Os testes computacionais realizados com este conjunto de instâncias demonstram a efetividade do modelo em atingir boas soluções em tempos de processamento aceitáveis em problemas nos quais o número de variáveis que devem ser analisadas é grande.

Para futuros desenvolvimentos podem ser agregados outros elementos à estratégia de resolução, especialmente no processo de busca no espaço de soluções que gerem uma maior diversificação das opções. Sugere-se para isso as estratégias híbridas da Busca Tabu. Além disso, o uso de metaheurísticas baseadas em busca global poderia ser testado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Araújo, O.C.B. (2006) *Problemas de corte e empacotamento tridimensional e integração com roteamento de veículos*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.
- Araújo, R. R. (2010) Uma abordagem de resolução integrada para os problemas de roteirização e carregamento de veículos. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção.
- Belfiore, P.; Yoshizaki, H.T.Y. (2009) Scatter search for a real-life heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows and split deliveries in Brazil. *European Journal of Operational Research*, v. 199, p. 750-758.
- Blum, C.; Roli, A. (2003) Metaheuristics in combinatorial optimization: overview and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys*, v. 35 (3), p. 268-308.
- Bortfeld, A.; Gehring, H.A. (2001) A hybrid genetic algorithm for the container loading problem. *European Journal of Operational Research*, v. 131, p. 143-161.
- Bortfeld, A.; Gehring, H.A.; Mack, D. (2003) A parallel tabu search algorithm for solving the container loading problem. *Parallel Computing*, v. 29, p. 641-662.
- Clarke, G.; Wright, J. (1964) Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations*

Research, v. 12, p. 568-581.

- Crainic, T.G.; Gendreau, M.; Potvin, J.Y. (2009) Intelligent freight-transportation systems: assessment and the contribution of operations research. *Transportation Research – Part C*, v. 17, p. 541-557.
- Duhamel, C.; Lacomme, P.; Quilliot, A.; Toussaint, H. (2011) A multi-start evolutionary local search for the two-dimensional capacitated vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, v. 38, p. 617-640.
- Dyckhoff, H.A. (1990) Typology of cutting and packing problems. *European Journal of Operational Research*, v. 44, p. 145-159.
- Egeblad, J.; Garavelli, C.; Lisi, S.; Pisinger, D. (2010) Heuristics for container loading of furniture. *European Journal of Operational Research*, v. 200, p. 881-892.
- Eley, M. (2002) Solving container loading problems by block arrangement. *European Journal of Operational Research*, v. 141, p. 393-409.
- Fuellerer, G.; Doerner, K.F.; Hartl, R.F.; Iori, M. (2009) Ant colony optimization for the two-dimensional loading vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, v. 36, p. 655-673.
- Fuellerer, G.; Doerner, K.F.; Hartl, R.F.; Iori, M. (2010) Metaheuristics for vehicle routing problems with three-dimensional loading constraints. *European Journal of Operational Research*, v. 201, p. 751-759.
- Gendreau, M.; Iori, M.; Laporte, G.; Martello, S. (2006) A tabu search algorithm for a routing and container loading problem. *Transportation Science*, v. 40 (3), p. 342-350.
- Gendreau, M.; Iori, M.; Laporte, G.; Martello, S. (2008) A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints. *Networks*, v. 51 (1), p. 4-18.
- Glover, F. (1986) Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & Operations Research*, v. 13, p. 533-549.
- Iori, M.; Salazar-González, J.J.; Vigo, D. (2007) An exact approach for the vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints. *Transportation Science*, v. 41 (2), p. 253-264.
- Laporte, G. (2009) Fifty years of vehicle routing. *Transportation Science*, v. 43 (4), p. 408-416.
- Leung, S.C.H.; Zhou, X.; Zhang, D.; Zheng, J. (2011) Extended guided tabu search and a new packing algorithm for the two-dimensional loading vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, v. 38, p. 205-215.
- Martins, G.H.A.; Dell, R.F. (2008) Solving the pallet loading problem. *European Journal of Operational Research*, v. 184, p. 429-440.
- Moura, A.; Oliveira, J.F. (2009) An integrated approach to the vehicle routing and container loading problems. *OR Spectrum*, v. 31 (4), p. 775-800.
- Ngoi, B.K.A.; Tay, M.; Chua, E. (1994) Applying spatial representation techniques to the container packing problem. *International Journal of Production Research*, v. 32, p. 111-123.
- Pisinger, D. (2002) Heuristics for the container loading problem. *European Journal of Operational Research*, v. 141, p. 382-392.
- Portal, G.M.; Rocco, R.; Ritt, M.; Buriol, L. (2009) Uma busca tabu aplicada ao problema de roteamento com restrições de empacotamento tridimensionais. In: *Anais do XLI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*.
- Pureza, V.; Morabito, R. (2006) Some experiments with a simple tabu search algorithm for the manufacturer's pallet loading problem. *Computers & Operations Research*, v. 33, p. 804-819.
- Soak, S.M.; Lee, S.W.; Yeo, G.T.; Jeon, M.G. (2008) An effective evolutionary algorithm for the multiple container packing problem. *Progress in Natural Science*, v. 18, p. 337-344.
- Toth, P.; Vigo, D. (1998) Exact solution of the vehicle routing problem. In: Crainic TG, Laporte G, editors. *Fleet Management and Logistics*. Norwell: Kluwer, p. 1-31.
- Valente, A.M.; Passaglia, E.; Novaes, A.G. (1997) *Gerenciamento de Transporte e Frotas*. São Paulo: Pioneira.
- Zachariadis, E.E.; Tarantilis, C.D.; Kiranoudis, C.T. (2009) A guided tabu search for the vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints. *European Journal of Operational Research*, v. 195, p. 729-743.

Endereço dos autores

Rafael Roco de Araújo (rafael.araujo@puccs.br)

Faculdade de Engenharia – FENG

Pontifícia Universidade Católica do RS

Av. Ipiranga, 6681, Prédio 30

Bairro Partenon – Porto Alegre, RS

CEP 90619-900