

MODELAGEM HEURÍSTICA NO PROBLEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE CARGAS FRACIONADAS DE CIMENTO

Marcos Miura

Cláudio Barbieri da Cunha

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Logísticos

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

RESUMO

Este artigo trata do problema do agrupamento de cargas fracionadas na distribuição do cimento ensacado partindo de um depósito central. O problema consiste em definir quais entregas de cimento serão carregadas juntas em um determinado veículo, de modo a aproveitar ao máximo sua capacidade e ao mesmo tempo reduzir o custo logístico com as distâncias entre os pontos de destino. Em particular, o método de resolução será dividido em três fases, nas quais a primeira e a segunda fase referem-se a problemas de muitas entregas para um único ponto, onde a distância é irrelevante. Para esta etapa, é proposto um método heurístico de resolução, utilizando algoritmo genético, baseado em problemas de “*bin-packing*” (BPP). Para a etapa seguinte é considerado o agrupamento para pontos de entrega distantes, cuja resolução baseia-se no método de economias de Clarke & Wright para roteirização de veículos.

ABSTRACT

This paper deals with the problem of merging less-than-truckload deliveries in bagged cement distribution from a central depot. The problem consists in defining which cement deliveries shall be loaded in each given vehicle, in order to maximize the vehicle full capacity as well as reduce distance-based logistics costs. Particularly, the resolution method is divided in three phases; the first and the second phases are related to problems of combining several deliveries to a single destination point, in which distances among deliveries can be assumed irrelevant. For this step, a heuristic method is proposed, which relies on a genetic algorithm for the “*bin-packing*” problem (BPP). In the next step, the merging of different delivery points that are apart from each other is considered, which is based on Clarke & Wright’s savings algorithm for the vehicle routing problem.

1. INTRODUÇÃO

O mercado de cimento atual no Brasil é muito competitivo. A presença de vários competidores em busca de uma fatia do mercado faz com que os preços baixem, e com isso o lucro operacional das empresas deste segmento também. Desta forma, surge uma necessidade incessante de aumentar a margem comercial das vendas, seja através da redução dos custos, onde a logística possui grande representatividade, seja na busca de canais de distribuição mais rentáveis, além de outros fatores. Com isso, uma tendência de algumas dessas empresas passou a ser o foco em clientes menores, no varejo, que podem proporcionar uma margem de venda melhor. Por outro lado, o aumento da participação de clientes de pequeno porte dificulta a atividade logística de distribuição, devido à pulverização geográfica dos mesmos. Além disso, a diminuição do tamanho do pedido médio feito por cada cliente faz com que o trabalho de agrupamento das entregas nos veículos torne fundamental para a redução dos custos.

O cimento é um produto de valor agregado baixo. Isto reduz a necessidade por um tipo de transporte específico para sua distribuição. Desta forma, a grande proporção do transporte rodoviário de cimento ensacado no Brasil é realizada por transportadores autônomos ou pequenas empresas transportadoras.

Nesse contexto, o presente trabalho aborda o problema da distribuição de cimento, que compreende a otimização do agrupamento das entregas nos veículos de forma a reduzir a frota necessária e o custo com o frete pago aos transportadores.

A distribuição de cimento normalmente não se restringe a uma cidade ou região metropolitana. Geralmente são atendidos vários municípios a partir de uma base de origem, de

diferentes tamanhos, cada qual com diversos pontos de entrega. Normalmente, a distância de deslocamento desde o local de origem onde é carregado o veículo até um município onde são realizadas as entregas é de magnitude muito superior às distâncias de percurso entre entregas consecutivas. Tendo em vista o mercado abrangido, as características do produto a ser entregue, os tempos envolvidos (de entrega e de deslocamento do veículo), o número de entregas por veículo é normalmente baixo, inferior a 10 e na média em torno de 5 a 6; conseqüentemente, em geral, torna-se necessário despachar mais de um veículo para as entregas em um município ou em municípios vizinhos, próximos entre si. A forma de contratação do transporte, e de remuneração dos transportadores autônomos ou pequenas empresas transportadoras, favorece esse agrupamento por município, uma vez que um custo adicional é incorrido quando as entregas ocorrem em municípios distintos, levando à necessidade do veículo se deslocar uma distância maior para completar as entregas. Além da distância adicional a ser percorrida, entregas em municípios distintos, ou locais distantes entre si, leva a uma diminuição da produtividade dos veículos, tendo em vista o menor tempo disponível para as entregas, que devem ocorrer dentro das janelas de recebimento dos clientes, normalmente limitadas ao horário comercial de funcionamento desses estabelecimentos.

Tudo isso, associado à não existência de mapas digitais para a grande maioria dos municípios onde devem ser realizadas entregas, com exceção daqueles de maior porte, leva a uma programação da distribuição onde a localização dos destinos é considerada em nível de município. Este tipo de consideração é muito conveniente para a situação real, visto que, a cada dia, surgem novos clientes, de modo que, obter a localização geo-referenciada exata de cada um, ou as coordenadas geodésicas, é inviável. Desta forma, serão formados *clusters* de clientes em macro regiões, onde para cada cliente novo cadastrado na base de dados, define-se este ponto de localização chamado de “*zona de transporte*”, que pode representar sua cidade ou bairro (no caso de cidades grandes). Com isso, podemos ter muitas entregas para um mesmo ponto de destino.

Com base no exposto acima, é proposta uma estratégia de solução buscando otimizar a programação da distribuição diária de cimento aos pontos de entrega, que compreende a definição, para cada município ou zona de transporte, quantos veículos de cada tipo serão necessários, e quais pontos de entrega serão alocados a cada veículo, buscando minimizar a despesa total de frete. Como são normalmente reduzidas as distâncias entre pontos de entrega alocados a um mesmo veículo, não há necessidade de definição do roteiro ou sequência de entregas alocadas ao veículo, o que simplifica o problema e permite considerar uma abordagem de solução heurística, inspirada em uma generalização do chamado problema de *bin-packing* (BPP). Para os pontos de entrega remanescentes, isto é, todos aqueles que não permitiram completar a carga de algum dos veículos alocados a cada um dos municípios ou zonas de transporte, é então resolvido um problema de roteirização, que consiste em agrupar e roteirizar esses conjuntos de pontos, de forma a minimizar o custo de transporte. Para tanto é proposta uma heurística baseada no método de economias para o caso mais geral de frota heterogênea.

A estratégia de solução é aplicada a um problema real de uma grande empresa do setor de cimentos, comparando-se os resultados obtidos com a solução praticada pela empresa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O problema de roteirização de veículos (*Vehicle Routing Problem - VRP*) consiste em determinar rotas para uma frota de veículos com restrições de capacidade, seguindo percursos fechados a partir de um depósito central e entregando quantidades definidas de carga em

pontos específicos (Bodin *et al.*, 1983). O critério de otimização mais frequentemente utilizado é a minimização da distância total percorrida.

Problemas de *VRP* foram exaustivamente estudados por diversos autores na literatura. Uma estratégia de solução para o *VRP* é a *clusterização* ou agrupamento dos nós. Consiste em agrupar os nós ou arcos de demanda primeiro, e depois construir rotas econômicas para cada agrupamento. Gillet e Miller (1974) e Fisher e Jaikumar (1981) aplicaram esta estratégia para roteirização de veículos com um único depósito.

Uma variação do *VRP* é o problema de roteirização de veículos com entregas fracionadas (*Vehicle Routing Problem with Split Deliveries - VRPSD*), onde um mesmo ponto de destino pode receber mais de um veículo e a demanda deste ponto é muito maior que a capacidade de um veículo. Poucos trabalhos foram desenvolvidos até hoje sobre o *VRPSD*, principalmente envolvendo frota heterogênea. Laporte e Trudeau (1994) apresentaram um modelo exato utilizando *branch-and-bound* para o problema com frota homogênea. Dror e Trudeau (1990) apresentaram um modelo heurístico mostrando vantagens em entregar fracionadamente em um cliente.

A maioria dos problemas de *VRP* são tratados como *NP-Árduos* (do inglês *NP-Hard*), o que significa que possui ordem de complexidade exponencial. Em outras palavras, o esforço computacional para a sua resolução cresce exponencialmente com o tamanho do problema (dado pelo número de pontos a serem atendidos). Por isso, muitos trabalhos neste campo foram desenvolvidos na busca de métodos heurísticos que apresentassem bom desempenho computacional e ao mesmo tempo soluções iguais ou muito próximas aos métodos exatos.

O algoritmo de Clarke e Wright (1964) ou algoritmo das economias é um dos métodos heurísticos mais conhecidos e utilizados para resolução do *VRP*. Apesar de manter seu conceito principal, muitas modificações foram sugeridas por outros autores, de modo a melhorar os resultados do algoritmo. Golden *et al.* (1984) propuseram algumas mudanças, acrescentando custos fixos e custos de oportunidade no cálculo das economias, de modo a melhor representar problemas com frota heterogênea. Desrochers e Verhoog (1991) apresentaram uma nova metodologia para selecionar as rotas mais econômicas, o *Matching Based Savings Algorithm (MBSA)*. Outros trabalhos importantes baseados no critério de economias podem ser encontrados em Mole e Jameson (1976), Paessens (1988) e Landeghem (1988).

No problema original conhecido na literatura como *bin-packing problem (BPP)* o objetivo é encontrar o número mínimo de mochilas ou *bins* de tamanhos idênticos que são necessários para armazenar um dado número de objetos de tamanhos/dimensões variadas de forma que a capacidade de cada *bin* não seja violada (Garey e Johnson, 1979).

Diversas heurísticas são apresentadas por Martello e Toth (1990) para resolver este tipo de problema e um método exato é apresentado para casos pequenos utilizando *branch-and-bound*. Um caso particular do *BPP* é o *variable-sized bin packing (VSBPP)*, onde os *bins* não têm tamanhos idênticos. Zhang (1997) prova que as heurísticas clássicas não fornecem bons resultados para este tipo de problema. Kang e Park (2003) apresentam variações nas heurísticas clássicas, de modo a oferecer bons resultados.

Galvão (2004) estudou o problema de otimização de um sistema de coleta de resíduos de biomassa de madeira para fins energéticos no contexto de sua aplicação a uma situação real de abastecimento de uma central produtora de energia. O problema de dimensionamento e

programação da frota para um período de planejamento semanal foi modelado como uma generalização do problema de *bin-packing*. Os veículos fazem viagens redondas, ida e volta, para coletar os resíduos nos fornecedores, que possuem periodicidades de coleta diferentes (por exemplo, todos os dias ou a cada dois dias). Busca-se determinar os dias de coleta para cada fornecedor, e as viagens alocadas a cada veículo, de forma a minimizar a frota total necessária no período, respeitando as restrições de periodicidades de coleta e as jornadas de trabalho dos veículos. Dada a complexidade do problema, foi proposta uma estratégia híbrida, em que é utilizado algoritmo genético para a definição dos dias de coleta e o dimensionamento de mínima frota necessária, enquanto que para a programação dos veículos em cada um dos dias do período de planejamento é resolvido através de um algoritmo exato baseado na formulação matemática do problema de *bin-packing*.

Apesar do problema clássico de *bin-packing* ser bem conhecido e muito explorado na literatura; poucos trabalhos são encontrados relacionando sua aplicação com a de problemas de roteirização de veículos (VRP). Apenas nos últimos anos, este tema foi levantado por alguns autores. Poh *et al.* (2005) fizeram uma analogia entre o problema de *bin-packing* com o problema de programação de veículos no transporte de multi-comodities com frota heterogênea. Altinel e Oncan (2005) utilizaram a idéia da heurística *First-Fit-Decreasing* em uma modificação do cálculo de economias do algoritmo de Clarke e Wright (1964).

Em resumo, poucos trabalhos foram realizados abordando a resolução de problemas de roteirização de veículos com entregas fracionadas em conjunto com a resolução de problemas de *bin-packing* com *bins* de tamanhos variáveis (VSBPP).

3. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

É dado um conjunto de pontos de entrega de cimento a serem atendidos em um dado dia. Para cada ponto, são conhecidos a quantidade a ser entregue (em peso), o tamanho do veículo máximo que pode atendê-lo e a sua localização em termos do município onde se situa.

Embora os clientes demandem diferentes tipos de produtos, a carga pode ser considerada homogênea em termos do seu transporte e acondicionamento no veículo, já que os produtos, na sua maioria, são acondicionados em sacos de 50kg, sem qualquer restrição para carregamento no veículo, exceto a capacidade máxima do veículo, normalmente em peso para esse tipo de produto. Pode-se assumir que todos os clientes recebem a mercadoria em horário comercial, sem restrição de janela de tempo. O número de entregas normalmente alocadas a cada veículo, e o tempo por entrega, permitem o cumprimento das mesmas durante o horário comercial, sem que isso constitua uma restrição da programação.

Os clientes também apresentam limitação quanto ao tamanho máximo dos veículos que podem receber. Muitos clientes são de pequeno porte e não possuem estrutura para receber veículos grandes, como carretas ou veículos longos como bi-trens. A mesma situação pode ocorrer com clientes localizados dentro de cidades onde a circulação de veículos de grandes dimensões é proibida.

As entregas devem ser realizadas utilizando uma frota de veículos de terceiros, composta de veículos de diferentes tipos/tamanhos e considerada ilimitada em termos do número de veículos disponíveis de cada tipo. Para cada tipo de veículo é conhecida a sua capacidade de carga (em peso). Todos os veículos partem de um único ponto de origem, onde é feito o carregamento.

Para cada município de destino, é conhecido o valor do frete de entrega, que é proporcional à distância desde a origem, e depende do tipo/tamanho do veículo. Adicionalmente, o frete é pago por viagem, independente se o veículo foi totalmente ocupado ou não. Quando mais de uma entrega de diferentes municípios são agrupadas em um mesmo veículo, é considerado o valor de frete correspondente ao município mais distante da origem.

O objetivo do problema é designar/alocar todas as entregas nos veículos, de modo a minimizar o custo total com o pagamento de fretes para esses transportadores.

4. ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO

O problema de programação de entregas de cimento pode ser visto como uma combinação entre um problema que apresenta características de *bin-packing* com um problema de roteirização. A determinação de como vão ser feitas as entregas para o subconjunto de clientes correspondente a cada município, em termos de quantos e quais veículos utilizar e quais entregas alocar a cada veículo pode ser vista como uma generalização do problema de *bin-packing*. Os veículos representam as mochilas (ou *bins*), neste caso de diferentes tipos e tamanhos, nos quais as entregas devem ser alocadas de modo a minimizar a despesa total de frete. Para aquelas entregas que não permitiram completar um veículo deve ser então resolvido um problema de roteirização, para definir quais grupos de entrega devem ser alocadas a cada veículo, de modo que o frete seja minimizado.

Tanto o problema de *bin-packing* quanto o de roteirização de veículos são, do ponto de vista matemático, problemas de natureza combinatória, em que o esforço computacional cresce exponencialmente com o tamanho do problema, o que impede a sua resolução através de algoritmos exatos (Garey e Johnson, 1979). Assim, propõe-se uma estratégia de solução heurística para a sua resolução.

O método de resolução é dividido em três fases, conforme mostrado na Figura 1: a primeira agrupa cargas de um mesmo cliente, a segunda agrupa cargas de clientes de uma mesma zona de transporte (cidade ou bairro), e por último, a terceira consolida cargas de clientes de regiões diferentes. Considera-se que a cada fase, as cargas já agrupadas na etapa anterior não poderão ser reagrupadas separadamente. O método descrito acima é similar à estratégia de solução “*cluster first-route second*” utilizada para a resolução de problemas de roteirização de veículos.

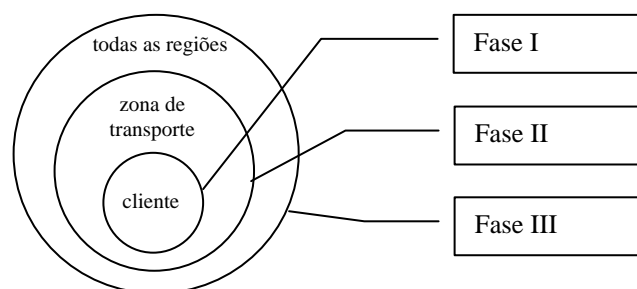


Figura 1: As 3 fases do método de resolução

Esta estratégia de divisão por fases foi utilizada de modo a reduzir a base de dados a cada fase, e proporcionando um tratamento diferenciado a cada etapa do algoritmo.

Para as cargas do mesmo cliente e da mesma cidade (primeira e segunda fase), será utilizado um método heurístico para resolução de problema com características de *bin-packing*, como explicado anteriormente.

Como já foi mencionado no item anterior, o menor ponto de localização dos clientes são as zonas de transporte, representadas dentro de uma cidade. Desta forma, a roteirização dos pontos dentro de uma zona de transporte não se faz necessária, dada a ausência de informações mais detalhadas. O problema passa a ser o agrupamento das cargas de uma mesma cidade de modo a minimizar a despesa total de frete.

Para a Fase III, onde as distâncias devem ser levadas em consideração, aplicaremos a versão paralela do algoritmo de Clarke & Wright ou algoritmo das economias. Nesta etapa, as cargas que não foram agrupadas ou apenas sub-agrupadas nas etapas anteriores serão consideradas.

Dessa forma, podemos definir o fluxograma geral do método heurístico proposto como mostrado na Figura 2:

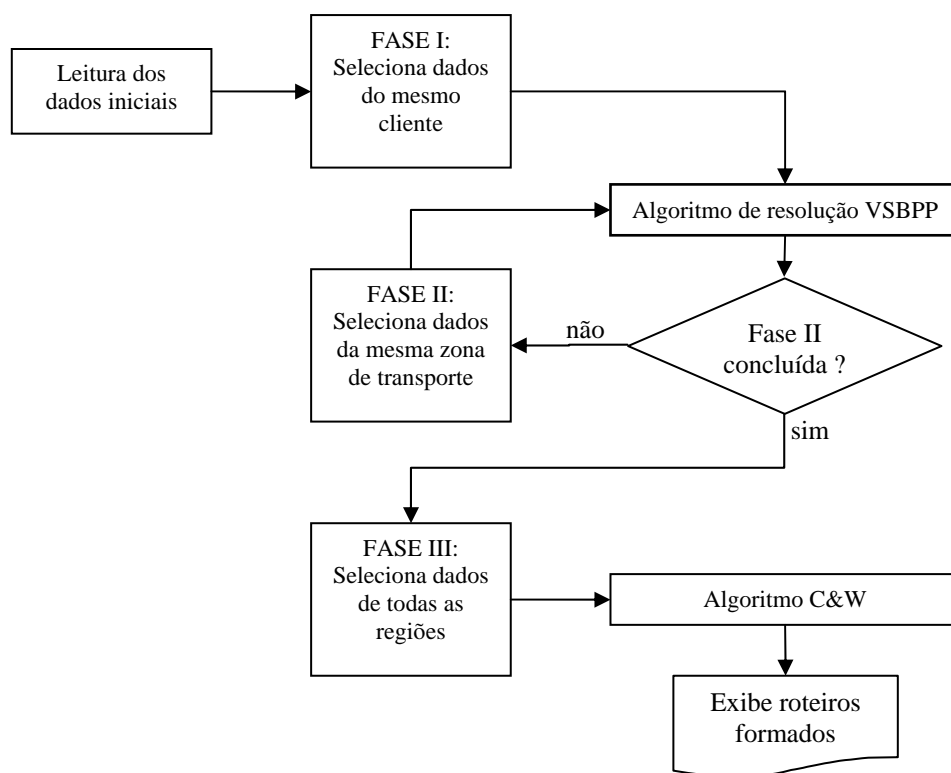


Figura 2: Fluxograma geral do método heurístico proposto

4.1. Fases I e II: Algoritmo para resolução do VSBPP

Conforme visto anteriormente, problema de alocação das entregas de cada município aos veículos pode ser visto como problema de *bin-packing* com *bins* de tamanhos variados (*Variable Sized Bin Packing Problem* – *VSBPP*). Dada a dificuldade de resolução desse problema, foi proposta uma estratégia de solução heurística baseada na metaheurística algoritmo genético.

Os algoritmos genéticos são algoritmos de buscas baseados nos mecanismos de seleção natural e na genética. Idealizados e estabelecidos por Holland (1975), esses algoritmos implementam estratégias de buscas paralelas e aleatórias para solucionar problemas de otimização. Algoritmos genéticos inspiram-se na teoria de evolução darwiniana, que

considera que quanto melhor um indivíduo se adapta ao seu meio ambiente, maior será sua chance de sobreviver e gerar descendentes.

Os algoritmos genéticos fazem parte da classe de algoritmos denominados algoritmos populacionais. Em linhas gerais, os algoritmos genéticos trabalham com um grupo (ou população) de soluções. Cada indivíduo é representado por um cromossomo, que armazena as informações genéticas. Os cromossomos são compostos por genes, os quais são responsáveis pelas características dos seres e são trocados ou transmitidos durante o processo de reprodução. A cada iteração, indivíduos da população são selecionados para reprodução, sendo os mais aptos com maiores chances de serem transmitidos para a geração seguinte e os demais menos aptos simplesmente eliminados de acordo com o princípio darwiniano de seleção natural e sobrevivência do mais forte.

Uma forma de contornar a complexidade adicional proporcionada pela possibilidade de usar veículos de tamanhos diferentes é aplicar heurística proposta, baseada em algoritmos genéticos, para o problema do *bin-packing* tradicional (*BPP*), considerando os diferentes tipos/tamanhos de veículo separadamente, a partir do menor para o maior. Assim, resolve-se inicialmente, para cada município de entrega, o sub-problema correspondente aos clientes que requerem entregas com veículos menores. Caso sobre algum veículo não totalmente utilizado, busca-se então alocar outras cargas de modo a completar a sua capacidade, considerando-se clientes que podem ser atendidos por veículos maiores; para tanto é usada a heurística *Next-Fit-Decreasing*, descrita em Martello e Toth (1990), onde são consideradas as entregas remanescentes em ordem decrescente de peso. Uma vez atendidos todos os clientes que requerem atendimento pelo menor tamanho de veículo, e completados os veículos que realizam esse atendimento, passa-se então à resolução do problema de *bin-packing* correspondente aos clientes que só podem ser atendidos pelo tipo/modelo de veículo imediatamente superior, e assim sucessivamente, até os clientes que não apresentem restrição quanto ao tipo/tamanho do veículo que possa atendê-lo, como ilustrado pela Figura 3.

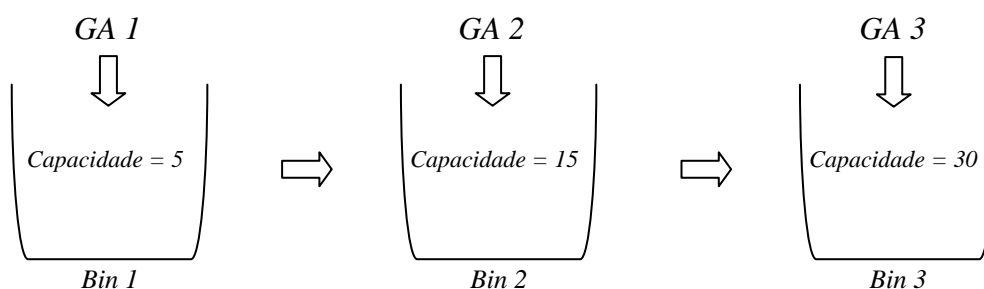


Figura 3: Estratégia de tratamento para caminhões de diferentes capacidades

A representação cromossômica adotada para a resolução de cada problema de *bin-packing* será dada pela indicação do veículo (*bin*) em que cada entrega é alocada. A Figura 4 exemplifica esse conceito, indicando, a alocação, em termos do veículo, para cada uma das oito entregas a serem programadas, que requereram quatro veículos.

1	2	3	4	5	6	7	8
4	1	1	3	2	2	3	4

Figura 4: Representação do cromossomo no problema estudado

Para a geração da população inicial, são criados três cromossomos com as heurísticas: *Next-Fit-Decreasing*, *First-Fit-Decreasing* e *Best-Fit-Decreasing* (Martello e Toth, 1990). O restante da população inicial é completada com indivíduos gerados com base em seqüências de entregas ordenadas aleatoriamente que são alocadas aos veículos usando o algoritmo *Next-Fit*.

A função aptidão é definida através da seguinte expressão:

$$f(S) = \frac{\sum_{i=1}^N (C_i / C_{MAX})^2}{N} \quad (6)$$

onde N é o número de veículos necessários para a solução S ; C_i é o peso total alocado ao veículo i , e C_{max} é a capacidade máxima do veículo.

O método utilizado para a seleção dos pais é o método da roleta. Neste método, cada indivíduo da população é representado na roleta conforme seu valor de aptidão. Desta forma, os indivíduos com elevada aptidão receberão um intervalo maior na roleta, enquanto aqueles que tem mais baixa aptidão receberão menor intervalo na roleta. Após a distribuição na roleta, são gerados aleatoriamente números no intervalo entre 0 e o total do somatório da aptidão de todos os indivíduos da população. É gerado um determinado número de vezes, dependendo do tamanho da população. O indivíduo que possuir em seu intervalo o número gerado será selecionado para o cruzamento.

Para o problema estudado foi considerado o cruzamento (*crossover*) de um único ponto. Para isso, uma posição dentro do gene é selecionada aleatoriamente. A partir daí, o restante dos genes são trocados entre os pais. A mutação ocorre com o sorteio de dois genes dentro de um cromossomo que trocarão suas posições.

Após as etapas de cruzamento e mutação, o cromossomo resultante pode ter violado a restrição de capacidade dos veículos (*bins*). Para reparar esse problema, foi adotado um procedimento de reparo do cromossomo que consistiu em varrer todos os veículos e guardar num vetor todos os itens que superaram a capacidade dos veículos em que estavam alocados. Em seguida, os itens eram re-allocados nos veículos que estivessem mais próximos de sua capacidade máxima, num movimento similar à heurística de *Best-Fit*. Para os itens que não coubessem em nenhum dos veículos ativos, torna-se necessária a alocação de veículos adicionais.

As etapas do algoritmo genético que é utilizado para a resolução de cada um dos problemas de *bin-packing*, um para cada município e clientes com restrição quando tipo/tamanho de veículo que pode atendê-los podem ser resumidas como mostrado na Figura 7.

Como resultado, têm-se todas as entregas alocadas aos veículos, respeitando restrições de capacidade. Alguns veículos que atendem a municípios distintos podem estar parcialmente ocupados, o que leva a terceira fase, descrita a seguir, que consiste em agrupar (ou roteirizar) clientes de municípios distintos.


```

Procedimento Bin-Packing AG
Início
Geração da população inicial;
Para (t=1 até t = Max_iter), faça:
    Seleção;
    Reprodução;
    Mutação;
    Reparo;
Fim Para
Fim

```

Figura 5: Esquema Geral do Algoritmo Genético para o problemas de *bin-packing*

4.2. Fases III: Algoritmo de Clarke & Wright

Na Fase III, as distâncias serão levadas em consideração para o agrupamento das entregas remanescentes, para os veículos que não tiveram a sua carga completada. Para tanto, será utilizada uma adaptação para frota heterogênea do tradicional método de economias (Clarke e Wright, 1964), utilizado para a roteirização de veículos. Conforme apontam Teixeira e Cunha (2002), a tradicional heurística de economias proposta por Clarke e Wright (1964), tanto na sua versão paralela (em que os todos os roteiros são formados ao mesmo tempo) quanto na sequencial (em que apenas um roteiro é montado de cada vez), não é adequada para problemas que envolvem frota heterogênea, uma vez que leva em conta só as distâncias para o cálculo das economias. Em ambas as versões pontos vão sendo agrupados, formando roteiros parciais, seguindo uma ordem decrescente de economias (S_{ij}) decorrentes da sua união, calculadas a partir da seguinte expressão:

$$S_{ij} = d_{0i} + d_{0j} - d_{ij} \quad (7)$$

onde d_{0i} e d_{0j} representam a distância da base (0) aos pontos i e j , respectivamente, e d_{ij} a distância entre eles.

A fim de buscar superar esse problema, Golden *et al.* (1984) propuseram heurísticas para o problema de dimensionamento e roteirização de uma frota heterogênea, e que se baseiam em generalizações da heurística de economias. Para o problema proposto, utilizaremos a fórmula *Realistic Opportunity Savings (ROS)* apresentada por Golden *et al.* (1984), que leva em consideração os custos variáveis e fixos do veículo, além dos custos de oportunidade. Para tanto, a expressão de cálculo de economias apresentada acima é alterada de forma a considerar custos variáveis no lugar de distâncias: $S_{ij}^1 = c_{0i} + c_{0j} - c_{ij}$

Partindo do princípio que os custos totais envolvem também os custos fixos dos veículos, estes devem ser incorporados à equação. Considerando que $F(Z)$ é o custo fixo do menor veículo capaz de atender à demanda Z , tem-se (Golden *et al.*, 1984):

$$S_{ij}^2 = S_{ij}^1 + F(Z_i) + F(Z_j) - F(Z_i + Z_j) \quad (8)$$

Os custos de oportunidades devem ser incorporados em função da capacidade não utilizada de um veículo maior. Considerando $P(Z)$ como a capacidade do menor veículo que pode é capaz de servir uma rota de demanda Z , tem-se a expressão (9), proposta por Golden *et al.* (1984), conhecida como *Optimistic Opportunity Savings (OOS)*:

$$S_{ij}^3 = S_{ij}^2 + F(P(Z_i + Z_j) - (Z_i + Z_j)) \quad (9)$$

Uma variação desta equação é a *Realistic Opportunity Savings (ROS)*, que assume que os custos de oportunidade devem apenas ser incluído quando a combinação de duas rotas requer um veículo maior do que está sendo utilizado.

$$S_{ij}^4 = \begin{cases} S_{ij}^2 + F(P(Z_i + Z_j) - (Z_i + Z_j)) & \text{se } P(Z_i + Z_j) > \max(P(Z_i) + P(Z_j)) \\ S_{ij}^2 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (10)$$

Com base na expressão (10) serão calculadas as economias geradas com o agrupamento das entregas, pertencentes a municípios diferentes, que não formaram uma carga completa para um veículo nas fases anteriores. Com isso, serão formadas as rotas mais econômicas, finalizando o agrupamento de todas as cargas.

5. EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

A estratégia de solução proposta foi implantada em linguagem C++, utilizando o compilador DEV-C++. Os testes foram realizados em um computador com processador *Pentium Centrino 1.8 GHz*, *512 MB RAM*.

Primeiramente, tendo em vista a sua aplicação nas Fases I e II, foi avaliada a eficiência do algoritmo genético proposto para a resolução de nove instâncias de problemas encontrados na literatura. Os dados de entrada de cada problema foram formados por 120 itens de tamanhos variados, uniformemente distribuídos entre 20 e 100, para serem alocados em *bins* de capacidade igual a 150. Em seguida, foram utilizados dados de *benchmark* para a avaliação de algoritmos de *bin-packing*. O número de *bins* e o tempo computacional obtidos através do algoritmo proposto baseado em AG foram comparados com três resultados: (i) o limite inferior do número de *bins* necessários, dado pelo quociente entre a soma dos tamanhos dos itens e a capacidade total dos *bins*; (ii) resultados do procedimento *MTP*, proposto por Martello e Toth (1990), que utiliza um método enumerativo (*branch-and-bound*) e é considerado como um dos melhores métodos para a resolução do problema de *bin-packing*; (iii) resultados do método *GGA* (*Grouping Genetic Algorithm*) apresentado por Falkenauer (1996). Os resultados podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1: Resultados do algoritmo para resolução do *BPP*

Problema	No min teórico	Método proposto(AG)		HGGA		MTP	
		Bins	Tempo (s)	Bins	Tempo (s)	Bins	Tempo (s)
1	48	48	2,7	48	15,2	48	0,1
2	49	49	0,0	49	0,0	49	0,1
3	46	46	1,0	46	5,8	46	29,0
4	49	49	7,7	49	50,4	49	0,0
5	50	50	0,0	50	0,0	50	0,0
6	48	48	3,0	48	19,4	48	0,1
7	48	48	3,9	48	19,0	48	0,0
8	49	49	0,8	49	21,7	49	0,0
9	46	46	3,8	46	39,5	46	0,1
Totais			2,5		19,0		3,3

A partir dos resultados mostrados na Tabela 1, observa-se que o algoritmo baseado no AG atingiu o mesmo número ótimo de *bins* que os outros três resultados de *benchmark*. Além disso, os tempos obtidos com o método proposto foram baixos e mais estáveis para todos os

problemas se comparados aos outros dois procedimentos. Com isso, conclui-se que o algoritmo baseado em AG fornece bons resultados em um tempo satisfatório. Vale lembrar que no modelo completo, este procedimento é repetido inúmeras vezes, uma para cada cidade ou agrupamento e também para o subconjunto de clientes com restrição de tamanho de veículo. Contudo, os dados de entrada testados aqui são formados por 120 itens, número muito superior a qualquer etapa acima mencionada.

Numa segunda etapa, o modelo completo proposto no presente trabalho foi testado com dados reais de uma empresa de cimento, que não utiliza nenhum modelo matemático para realizar o agrupamento das entregas, pois este procedimento é realizado manualmente.

Para os dados de entrada, foram consideradas seis instâncias de problemas, cada qual representada por entregas pertencentes a um dia normal partindo de um único depósito. Essas cargas estão espalhadas em diversos municípios num raio de até 200 km do centro. Os resultados foram comparados em relação ao número mínimo de veículos designados para realizar as entregas, a taxa de ocupação média dos veículos e o custo total provindo do pagamento do frete aos transportadores, conforme o cálculo descrito no item 3 deste trabalho. Os resultados obtidos estão demonstrados na Tabela 2, abaixo:

Tabela 2: Resultados do algoritmo comparados ao modelo atual

<i>Problema</i>	<i>Número de Entregas</i>	<i>Método proposto</i>			<i>Método manual</i>			<i>Economias</i>	
		<i>Veículos utilizados</i>	<i>Taxa de ocupação</i>	<i>Custo total</i>	<i>Veículos utilizados</i>	<i>Taxa de ocupação</i>	<i>Custo total</i>	<i>Veículos utilizados</i>	<i>Custo %</i>
1	54	13	91.87%	3398	14	85.30%	3600	1	5.9%
2	58	15	93.33%	4697	16	87.50%	4975	1	5.9%
3	52	12	92.62%	3190	13	86.80%	3412	1	7.0%
4	34	16	94.04%	5835	16	94.04%	5921	0	1.5%
5	39	19	91.33%	6406	20	88.77%	6775	1	5.8%
6	47	20	89.27%	6890	21	85.01%	7275	1	5.6%
Média		16	92.08%	5069	17	87.90%	5326	1	5.3%

A partir dos resultados desta simulação, percebe-se que o modelo proposto apresenta economias significativas em relação ao método manual. Além de obter o menor número de veículos alocados na maioria dos seis problemas, apresentou custos bem inferiores. Isso prova a eficiência do algoritmo proposto e sua oportunidade de aplicação na prática.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho propôs a solução do problema de agrupamento de entregas de cimento através da construção de um modelo heurístico, baseado em métodos para resolução de problemas de *bin-packing* e roteirização de veículos. Trata-se de um tema relevante, pois se levou em conta um modelo de tarifação muito utilizado no Brasil para pagamento de transportadores terceiros. Além disso, ofereceu uma abordagem interessante para o problema da falta de informações quanto ao detalhamento na localização exata dos pontos de entrega.

O modelo proposto foi testado separadamente para o algoritmo das duas primeiras fases, onde obteve bons resultados quando comparado a outros métodos eficientes para este procedimento. Numa segunda etapa, o modelo completo foi testado com dados reais de uma empresa cimenteira e comparado com o método manual de agrupamento. Os resultados

mostraram que sua aplicação na prática pode produzir economias significativas neste processo.

A abordagem apresentada no presente trabalho com a aplicação de heurísticas de *bin-packing* para problemas de transporte mostrou ter grande utilidade e serve de base para novos estudos. Uma possível extensão seria a consideração desta heurística também na terceira fase do modelo, em substituição ao algoritmo de Clarke e Wright (1964) ou a criação de um modelo híbrido onde levasse em conta as duas heurísticas simultaneamente. A consideração de janelas de tempo também serviria como uma possível extensão para o problema proposto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Altinel, I.K. e Oncan, T. (2005) A New Enhancement of the Clarke and Wright Savings Heuristic for the Capacitated Vehicle Routing Problem. *Journal of Operation Research Society*, v. 56, p. 954-961.
- Bodin, L.; Golden, B.; Assad, A. e Ball, M. (1983) Routing and Scheduling of Vehicles and Crews – The State of the Art. *Computers and Operations Research*, v. 10, p. 63-211.
- Clarke, G e Wright, J.W. (1964) Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. *Operations Research*, v. 12, p. 568-581.
- Desrochers, M. e Verhoog; T.W. (1991) A New Heuristic for the Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem. *Computers & Operations Research*, v. 18, n. 3, p. 263-274.
- Dror, M. e Trudeau, P. (1990). Split Delivery Routing. *Naval Research Logistics*, v. 37, n.3, p. 383-402.
- Dror, M.; Laporte, G. e Trudeau (1994) Vehicle Routing with Split Deliveries. *Discrete Applied Mathematics*, v. 50, n. 3, p. 229-254.
- Falkenauer, F. (1996) A Hybrid Grouping Genetic Algorithm for Bin Packing. *Journal of Heuristics*, v. 2, p. 5-30.
- Fisher, M. e Jaikumar, R. (1981) A Generalized Assignment Heuristics for Vehicle Routing. *Networks*, v. 11, n. 2, p. 109-124.
- Galvão, F. A. (2004). *Otimização do sistema de coleta de resíduos de biomassa de madeira para fins energéticos*. 81p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Garey, M.R. e Johnson, D.S. (1979). *Computers and Intractability: A guide to the Theory of NP-Completeness*. W.H. Freeman, San Francisco.
- Gillet, B.L. e Miller, L. (1974) A Heuristic Algorithm for the Vehicle Dispatch Problem. *Operations Research*, v. 22, n. 4, p. 340-349.
- Golden, B.L.; Assad, A.; Levy, L e Gheysens, F. (1984) The Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem. *Computers & Operations Research*, v. 11, n. 1, p. 49-65.
- Holland, J. (1975) *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, Michigan, USA.
- Kang, J. e Park, S. (2003) Algorithms for the Variable Sized Bin Packing Problem. *European Journal of Operation Research*, v. 147, p. 365-372.
- Landeghem, H.R.G. (1988) A Bi-criteria Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. *European Journal of Operational Research*, v. 36, n. 2, p. 217-226.
- Martello, S. e Toth, P. (1990) *Knapsack Problems: Algorithms and Computer Implementations*. Wiley.
- Mole, R.H. e Jameson, S.R. (1976) A Sequential Route-building Algorithm Employing a Generalized Savings Criterion. *Operational Research*, v. 27, n. 2, p. 503-511.
- Paessens, H. (1988) Savings Algorithms for the Vehicle Routing. *European Journal of Operational Research*, v. 34, n. 3, p. 336-344.
- Poh, K.L.; Choo K.W. e Wong, C.G. (2005) A Heuristic Approach to the Multi-period Multi-commodity Transportation Problem. *Journal of Operation Research Society*, v. 56, p. 708-718.
- Teixeira, R. G. e Cunha, C. B. (2002) Heurísticas para o Problema de Dimensionamento e Roteirização de uma Frota Heterogênea Utilizando o Algoritmo Out-of-kilter. *Transportes*, v.10, n.2.
- Zhang, G. (1997) A New Version of On-line Variable-sized Bin Packing. *Discrete Applied Mathematics*, v. 72, p. 193-197.

Endereço dos Autores:

Marcos Miura
Departamento de Engenharia de Transportes
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Email: marcos.miura@poli.usp.br

Cláudio Barbieri da Cunha
Departamento de Engenharia de Transportes
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Email: cbcunha@usp.br