

ROTEAMENTO DE VEÍCULOS PARA COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS RECICLÁVEIS

Karim Yaneth Pérez Martínez

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção PPGE, UFSCar - *Campus* Sorocaba.
Rodovia João Leme dos Santos (SP-264), Km 110 Bairro do Itinga - Sorocaba - SP.
karim.1504@gmail.com

Eli Angela Vitor Toso

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção PPGE, UFSCar - *Campus* Sorocaba.
Rodovia João Leme dos Santos (SP-264), Km 110 Bairro do Itinga - Sorocaba - SP.
eli@ufscar.br

RESUMO

Programar rotas e veículos de forma eficiente é um importante problema logístico que tem sido estudado desde há varias décadas e que envolve um sem número de aplicações frequentemente relacionadas com centros de distribuição, operadores logísticos e aquelas empresas que além de produzir, distribuem seus produtos em forma direta ao cliente. Este estudo apresenta uma aplicação dos problemas de roteamento de veículos para a programação das rotas de coleta de resíduos sólidos domiciliares na cidade de Sorocaba-SP. Dois modelos de roteamento de veículos e um método metaheurístico foram implementados a fim de fornecer um plano de coleta eficiente ao longo do horizonte de planejamento. Os resultados das três abordagens evidenciam ser melhores que o plano adotado pela cooperativa e apresentam diferenças interessantes entre si em relação à duração do plano de coleta final e aproveitamento da capacidade dos veículos.

PALAVRAS CHAVES: Coleta de resíduos, roteamento de veículos.

ABSTRACT

Programming routes and vehicles is an important logistic task that has been studied for several years and commonly involves some applications related to the activities of distribution centers, and logistic operators. This paper presents a vehicle routing problem's application, in order to schedule routes for recyclable solid waste collecting in Sorocaba-São Paulo. Two vehicle routing problems and a metaheuristic method were implemented in order to study an approach to provide an efficient collection program over the planning horizon of one week of collection. All the results obtained by the three studied methods were able to provide a better schedule than the used by the institution responsible for collecting the recyclable solid waste in the city. Furthermore, the comparison between the studied methods involves some interesting differences related to the time of the collection program and the capacity utilizations of the vehicles.

KEYWORDS: Solid waste collection, vehicle routing problems.

1. Introdução

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/10) estabelece um conjunto de ações para facilitar o retorno dos resíduos aos seus geradores para que sejam tratados ou reaproveitados em novos produtos. Uma destas ações é o incentivo à reciclagem, priorizando o acesso aos recursos da União destinados ao gerenciamento de resíduos sólidos e limpeza urbana para os municípios que implantarem a coleta seletiva com a participação de cooperativas ou outras associações de catadores.

Segundo Simonetto e Borenstein (2006) um dos maiores desafios para a reciclagem de materiais no Brasil são os altos custos da logística reversa. Neste contexto, é fundamental o planejamento de rotas de coleta que sejam eficazes e auxiliem na redução destes custos. Em geral os problemas de roteamento de veículos envolvem o projeto de rotas de entrega e/ou coleta de custo mínimo, partindo de um ou mais depósitos para um número de clientes, sujeitos a restrições adicionais relacionadas com capacidade, distância máxima percorrida por rota, entre outros (ARENALES, *et al.* 2007). O objetivo dos problemas de roteamento geralmente visa à minimização dos custos de transporte, no entanto estes problemas podem ser expressos de modo a minimizar a distância total percorrida, ou a duração total das rotas, atendendo em sua totalidade à demanda de um conjunto de clientes (TOTH e VIGO, 2002).

Os problemas de roteamento de veículos (VRP – *Vehicle Routing Problem*) são problemas de otimização combinatória do tipo NP-hard (Bell e McMullen, 2004), que tem motivado vários esforços em pesquisa a fim de aprofundar seu estudo, aplicação e busca de métodos de solução. Uma ampla gama de problemas de roteamento tem sido gerada incorporando progressivamente elementos diferentes na sua formulação a fim de fazer que estes modelos se adaptem cada vez melhor às aplicações reais. Os métodos de solução para estes problemas e suas aplicações variam desde os métodos exatos (Azi e Gendreau Potvin, 2010; Kallehauge, 2008) até métodos heurísticos e metaheurísticos para abordar problemas de grande tamanho (OLIVERA, 2004; REPOUSSIS e TARANTILIS, 2010). Uma revisão dos modelos de roteamento de veículos e métodos de solução pode ser encontrada em Toth e Vigo (2002), Olivera (2004), Eksioglu *et al.* (2009), e Cordeau *et al.* (2007).

Diversos trabalhos relacionados com os problemas de roteamento de veículos tem sido aplicados nas atividades de coleta seletiva e recuperação de bens fora de uso; Barão *et al.* (2008) por exemplo apresenta uma aplicação dos problemas de roteamento na coleta de resíduos sólidos urbanos em um município de Rio Grande do Sul; Kim *et al.* (2009) apresenta uma aplicação do problema de roteamento de veículos para a logística reversa de produtos eletrônicos em uma fábrica em Korea.

O presente trabalho apresenta uma aplicação dos problemas de roteamento de veículos para a programação das rotas de coleta de resíduos sólidos urbanos recicláveis na cidade de Sorocaba-SP. Com o objetivo de fornecer um plano de coleta mais eficiente em comparação com o utilizado pelas cooperativas, dois modelos de roteamento de veículos foram implementados. Os resultados da aplicação destes modelos foram bem interessantes e motivaram a aplicação de uma abordagem alternativa baseada em uma metaheurística.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: na próxima seção é apresentada uma descrição do problema específico de coleta de resíduos sólidos na cidade de Sorocaba-SP, a seção 3 apresenta a descrição de como é abordado o problema de coleta de resíduos sólidos recicláveis como um problema de roteamento de veículos. A seção 4 apresenta a descrição dos métodos de solução utilizados, e a seção 5 apresenta uma análise dos resultados obtidos e finalmente na seção 6 são apresentadas as conclusões decorrentes do desenvolvimento deste trabalho.

2. Descrição do problema

Em 2007, a Prefeitura de Sorocaba iniciou o “Programa de Coleta Seletiva – Reciclando Vidas”, dividindo o perímetro urbano do município em seis setores; norte, nordeste, noroeste, oeste, centro/sul e leste. Estes setores foram alocados a quatro cooperativas: CORESO, ECOESO, REVIVER, e CATARES, sendo esta última o objeto de estudo deste trabalho (SIMÕES *et al.* 2011).

A Cooperativa de Trabalho dos Catadores de Material Reaproveitável de Sorocaba CATARES é a responsável pela coleta seletiva da região centro/sul de Sorocaba. Igual que o resto das cooperativas, a CATARES conta com o apoio do município para os custos associados à infraestrutura e equipamentos das instalações, sendo responsável pelo seu próprio gerenciamento e seu programa de coleta.

Segundo levantamento feito pelo Programa Municipal de Coleta Seletiva e dados coletados, a CATARES é responsável pela coleta seletiva em 78 bairros da região centro/sul com um potencial de coleta de 25 toneladas/dia de resíduos sólidos. No entanto, esta cooperativa coleta em média apenas cerca de 60 toneladas/mês, ou seja, não consegue atender toda a região designada. Esta situação é atribuída, segundo o administrador da cooperativa, ao limitado número de veículos disponível para efetuar a coleta.

A cooperativa dispõe de um galpão para a triagem dos resíduos coletados (papel, papelão, vidros, metais, etc.) e um sistema de coleta equipado com dois veículos disponíveis de segunda a sexta-feira das 8h às 17h. Atualmente o programa de coleta semanal é criado intuitivamente pelo responsável, o qual inclui o grupo de casas previamente registradas que cada veículo tem que visitar diariamente ao longo da semana. Este plano se encaixa dentro de uma estimativa intuitiva do tempo disponível para efetuar a coleta, considerando a pausa diária na hora do almoço para os motoristas e o tempo de descarga dos veículos. O percorrido entre o grupo de casas definido diariamente é efetuado segundo o critério do motorista, quem geralmente atinge a área designada voltando ao depósito nas horas estabelecidas (intervalo para o almoço e hora final do dia de trabalho), ou quando a capacidade máxima do veículo é alcançada, no entanto as informações sobre o aproveitamento da capacidade dos veículos não são registradas.

Diante desta situação, onde a cooperativa só atinge aproximadamente 8% do total estimado de coleta e a aquisição de mais veículos de coleta não depende diretamente dela, a CATARES necessita melhorar o aproveitamento dos recursos disponíveis para ampliar a cobertura do seu serviço. Assim, o objetivo deste trabalho é a aplicação de métodos de pesquisa operacional para a reprogramação das rotas de coleta e propor uma alternativa que poderia contribuir ao melhor aproveitamento da frota disponível e conseqüentemente uma ampliação da cobertura do serviço de coleta.

3. Abordagem do problema de coleta seletiva como um problema de roteamento de veículos.

Em forma geral, um problema de roteamento de veículos clássico é representado por um grafo orientado completo $G = (N, A)$, onde $N = C \cup \{0, n + 1\}$, sendo $C = \{1, \dots, n\}$ o conjunto de nós que representa todos os clientes, e $\{0, n + 1\}$ os nós que representam o depósito na saída e o retorno, correspondentemente. O conjunto $A = \{(i, j) : i, j \in N, i \neq j, i \neq n + 1, j \neq 0\}$ corresponde aos arcos associados às conexões entre nós (ARENALES et al., 2007). Cada cliente $i (i = 1, \dots, n)$ tem associada uma demanda conhecida q_i e um tempo de serviço denotado como s_i . Um tempo de viagem t_{ij} é associado para cada arco $(i, j) \in A$. Existe um conjunto adicional $K = \{1, \dots, m\}$ de diferentes tipos de veículos com capacidade de carga $Q_k \forall k \in K$, os quais devem atender a demanda de todos os clientes de tal forma a minimizar o tempo total de percorrido de todas as rotas. Desta forma, as considerações básicas dos problemas de roteamento de veículos para o problema de roteamento da cooperativa em particular foram determinados como segue.

3.1.1 Determinação dos nós.

O processo de coleta de resíduos sólidos domiciliares pela CATARES envolve a visita em um total de 2.405 casas semanalmente. Dada a complexidade para a resolução do problema que seria gerado se cada casa fosse considerada um nó, estes foram definidos como um espaço delimitado geograficamente, que contém um conjunto de ruas sobre as quais está alocado um conjunto das casas registradas. Desta forma, o total de 2.405 casas foi agrupado em 41 pontos, os quais representam os nós do problema.

As estimativas da demanda para cada nó foram baseadas em estatísticas sobre a quantidade de resíduos sólidos urbanos gerados por habitante, assim como a percentagem de lixo potencialmente reciclável e o número médio de pessoas por família residente em domicílio particular no estado de São Paulo (*Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil*, 2010). Tais estimações foram comparadas e verificadas com as informações fornecidas pela cooperativa, obtendo assim estimativas de demanda coincidentes com a quantidade de resíduos coletados.

Para as estimativas do tempo de serviço para cada nó foram consideradas as informações fornecidas pela cooperativa no referente aos tempos de coleta e a velocidade do veículo durante essa atividade, ou seja, o tempo efetivo de coleta.

Os tempos de viagem entre os nós foram estimados com base na velocidade média em que estes tipos de veículos podem transitar na cidade e a distância percorrida entre cada par de nós, a qual leva em conta o sentido das ruas e avenidas da cidade (métrica *Manhattan*) (SALAZAR *et al.*, 2001).

3.1.2 Características dos veículos

Para seu processo de coleta a CATARES tem disponíveis dois veículos de diferentes capacidades de carga. Um deles tem capacidade para transportar 16 *bags* cada uma de um peso aproximado de 50 quilogramas, totalizando assim uma capacidade de 800 kg. O segundo veículo tem capacidade para transportar 20 *bags* o qual totaliza uma capacidade de 1000 kg. Vale ressaltar que a quantidade de resíduos recicláveis que pode ser transportada é limitada pelo volume da carga e não pelo seu peso (baixa densidade da carga). Os veículos devem efetuar a coleta de todas as casas registradas em um prazo de uma semana (de segunda à sexta-feira).

3.1.3 Considerações especiais

Além das características próprias dos problemas de roteamento de veículos, o problema de estabelecer rotas para a coleta de resíduos na cooperativa CATARES leva em consideração as seguintes especificações.

- i) A cooperativa funciona de segunda a sexta-feira, das 8h às 17h. Assim as rotas geradas deverão ser programadas de modo que não possam exceder este intervalo de tempo.
- ii) Tanto os motoristas como o pessoal responsável pela coleta devem retornar ao depósito na hora do almoço. Por política da cooperativa o pessoal dispõe de uma hora para esta atividade, a qual tem certa flexibilidade na hora de início, sendo das 11h30min às 12h o intervalo mais comum.
- iii) Uma vez que os veículos atingirem sua capacidade máxima, estes devem retornar ao depósito para descarregar o material coletado. A duração desta atividade é estimada em 30 minutos.

4. Abordagens de solução

Para obter um plano de roteamento de veículos para coleta de materiais recicláveis, o problema foi modelado inicialmente como um problema de roteamento de veículos simples com frota heterogênea, o qual denominamos VRP. Para testar um método alternativo sem o problema de eliminação de sub-rotas, e verificar se existem diferenças empiricamente significativas nos resultados, o problema também foi formulado incorporando janelas de tempo o qual denominamos VRPTW. Ambos os modelos são baseados em formulações existentes na literatura e tem como objetivo minimizar o tempo total de percorrido de todas as rotas geradas (ARENALES *et al.*, 2007; REPOUSSIS e TARANTILIS, 2010)

4.1 Problema de roteamento de veículos com frota heterogênea (VRP)

Além das definições dos conjuntos apresentados no item anterior, temos os seguintes conjuntos adicionais, índices, parâmetros e variáveis.

Conjuntos

S : $S \subset C$ Conjunto que representa todas as possíveis sub-rotas

Índices

$i, j, h \in N$ representam os nós

$k \in K$ representa os tipos de veículos

Parâmetros

n número total de clientes

m número total de tipos de veículos

T duração máxima que poderia ter qualquer rota.

q_i demanda do nó i

s_i tempo de serviço do nó i

t_{ij} tempo de viagem associado ao caminho desde o nó i até o nó j

Q_k capacidade máxima de carga do veículo tipo k

Variáveis

x_{ijk} Indica se o veículo k percorre diretamente o arco (i,j) ($x_{ijk} = 1$) ou não ($x_{ijk} = 0$)

$$\text{Minimizar} \quad \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} t_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{k \in K} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in C \quad (2)$$

$$\sum_{j \in N} x_{0jk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N} x_{i,n+1,k} = 1 \quad \forall k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ihk} - \sum_{j \in N} x_{hjk} = 0 \quad \forall h \in C; \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{i \in C} q_i * \sum_{j \in N} x_{ijk} \leq Q_k \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} (s_i + t_{ij}) * x_{ijk} \leq T \quad \forall k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subset C, 2 \leq |S| \leq \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor, \forall k \in K \quad (8)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in A; \forall k \in K \quad (9)$$

A função objetivo (1) minimiza o tempo total de percorrido. As restrições (2) garantem que todos os clientes sejam visitados uma única vez por algum dos veículos. As equações (3) e (4) especificam que cada veículo deve partir do depósito e retornar ao mesmo ao final de cada rota, correspondentemente. As equações (5) são as restrições características de fluxo em redes, onde se cada veículo deixa um determinado nó se previamente entrou nele. As restrições (6) garantem que o limite da capacidade de carga dos veículos não seja excedido. As restrições (7) estabelecem que a duração de cada rota não ultrapasse um limite de tempo T . Estas restrições foram incorporadas por causa do intervalo que os motoristas tem para o almoço, assim, a duração de uma rota, a qual é expressa como a somatória dos tempos de viagem e os tempos de serviço $\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} (s_i + t_{ij}) * x_{ijk}$, necessariamente não pode exceder um limite de cinco horas a fim de que esta atividade seja realizada oportunamente. As equações (8) evitam a formação de sub-rotas e finalmente as equações (9) especificam o domínio das variáveis.

4.2 Problema de roteamento de veículos com frota heterogênea e janelas de tempo (VRPTW)

Além dos elementos levados em conta no modelo anterior, consideremos os seguintes parâmetros e variáveis adicionais.

Parâmetros

E representa o limite inferior da janela de tempo dos nós (hora de início do dia de trabalho)
 L representa o limite superior da janela de tempo dos nós (finalização do dia de trabalho)

Variáveis

y_{ik} Representa o instante de tempo em que o veículo k chega à locação do nó i .

O modelo considerando janelas de tempo diferencia do apresentado anteriormente no sentido que as restrições (7) e (8) não são mais necessárias, no entanto as seguintes devem ser acrescentadas.

$$y_{ik} + s_i + t_{ij} \leq y_{jk} + M(1 - x_{ijk}) \quad \forall (i, j) \in A; \forall k \in K \quad (10)$$

$$E \leq y_{ik} \leq L \quad \forall i \in N; \forall k \in K \quad (11)$$

$$y_{ik} \geq 0 \quad \forall i \in N; \forall k \in K \quad (12)$$

Desta forma, as restrições (10) estão relacionadas com as janelas de tempo dos nós e garante a factibilidade no roteamento de cada veículo, uma vez que elimina possíveis sub-rotas. As equações (11) garantem que cada cliente seja visitado dentro da janela de tempo especificada, e que os veículos partam e retornem dentro do horário comercial. As equações (12) especificam o domínio da nova variável.

Para este modelo, os instantes de início e fim do dia de trabalho na cooperativa foram considerados como janelas de tempo. Assim, sendo minutos a unidade de medida no tempo, as janelas tempo tanto para o depósito como para os clientes são definidas entre 8h e 17h $480 \leq y_{ik} \leq 1020, \forall i \in N; \forall k \in K$.

5. Resultados

Os modelos apresentados anteriormente foram implementados na linguagem de modelagem algébrica GAMS versão 22.5, resolvidos através do *solver* CPLEX versão 12.2.0, em um computador com processador *Intel Core i52.40* GHz com 6.0 GB de memória RAM instalada.

Considerando a instância gerada no problema de roteamento da cooperativa, a qual envolve dois tipos de veículos e 41 nós, os modelos foram executados com limites de tempo de 1 hora. Dentro deste limite observou-se um grande consumo de memória, principalmente na execução do modelo VRP, o qual poderia ser atribuído às restrições de eliminação de sub-rotas. Para tratar estas restrições no modelo VRP de forma que o consumo de memória fosse mínimo, os resultados do modelo sem consideração de eliminação de sub-rotas evidenciaram uma tendência na formação destas a partir das combinações entre dois, três e eventualmente algumas com quatro nós; assim, em vez de proibir todas as possíveis sub-rotas com elementos $2 \leq |S| \leq \lfloor \frac{n}{2} \rfloor$ unicamente foram proibidas as sub-rotas geradas a partir da combinação entre dois e três elementos, e as sub-rotas que surgiram progressivamente entre quatro elementos.

Os resultados obtidos pelos dois modelos em relação às rotas geradas e utilização da capacidade dos veículos são apresentadas na *Tabela 1*.

- n número de rotas a serem executadas
- a_j quantidade de recurso necessária para executar a tarefa j (duração da rota)
- b quantidade de recurso disponível de cada agente (duração do dia de trabalho)
- $n+1$ tarefa fictícia que representa o intervalo para o almoço dentro do dia de trabalho

Variáveis

x_{ij} 1 se a rota j é designada ao dia i , 0 em caso contrário.

y_i 1 se o dia i é utilizado para executar as rotas, 0 em caso contrário.

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^m y_i \quad (20)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1 \quad \forall j = 1, \dots, n \quad (21)$$

$$x_{i,n+1} = y_i \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (22)$$

$$\sum_{j=1}^{n+1} a_j x_{ij} \leq b y_i \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (23)$$

$$x_{ij}, y_i \in \{0,1\} \quad \forall i = 1, \dots, m; \forall j = 1, \dots, n \quad (24)$$

A função objetivo (20) minimiza o total de dias necessários para executar as rotas. As restrições (21) garantem que cada uma das rotas seja executada em um único dia durante a semana. As restrições (22) estabelecem que para cada dia efetivo de coleta seja reservado o intervalo para o almoço dos motoristas. As equações (23) garantem que a duração de todas as rotas designadas para um dia específico, incluindo o intervalo para o almoço, não exceda a duração do dia de trabalho. Finalmente as equações (24) estabelecem o domínio das variáveis.

Como resultado da implementação dos modelos de designação para cada tipo de veículos, os planos de coleta decorrente de cada abordagem são apresentados na *Figura 1*. Observando os planos gerados, notamos que o modelo com janelas de tempo fornece um plano final de coleta mais eficiente em relação à utilização dos veículos em comparação com os resultados do outro modelo. Em comparação com a situação da cooperativa, onde o mesmo volume de resíduos era coletado utilizando os dois veículos durante todo o dia útil de trabalho desde segunda até sexta-feira, o plano de coleta obtido através do modelo VRPTW sugere que o mesmo resultado pode ser atingido fazendo uso do veículo de maior capacidade de segunda até quinta-feira, e o veículo de menor capacidade na Segunda. Um plano equivalente a este resultaria ao colocar em funcionamento o veículo 2 até a sexta-feira, deixando a disposição o veículo 1 para ampliar a cobertura do serviço vinculando mais casas à coleta.

O modelo VRP sem considerações de janela de tempo fornece também um plano de coleta melhor que o praticado pela cooperativa, visto que sugere utilizar os dois veículos somente de segunda até quarta-feira, deixando-os à disposição as quintas e sextas-feiras, situação que permitiria ampliar a cobertura do serviço. No entanto, o plano resultante deste modelo não foi melhor que o fornecido pelo modelo VRPTW em termos de tempo necessários para efetuar a coleta do mesmo volume de resíduos.

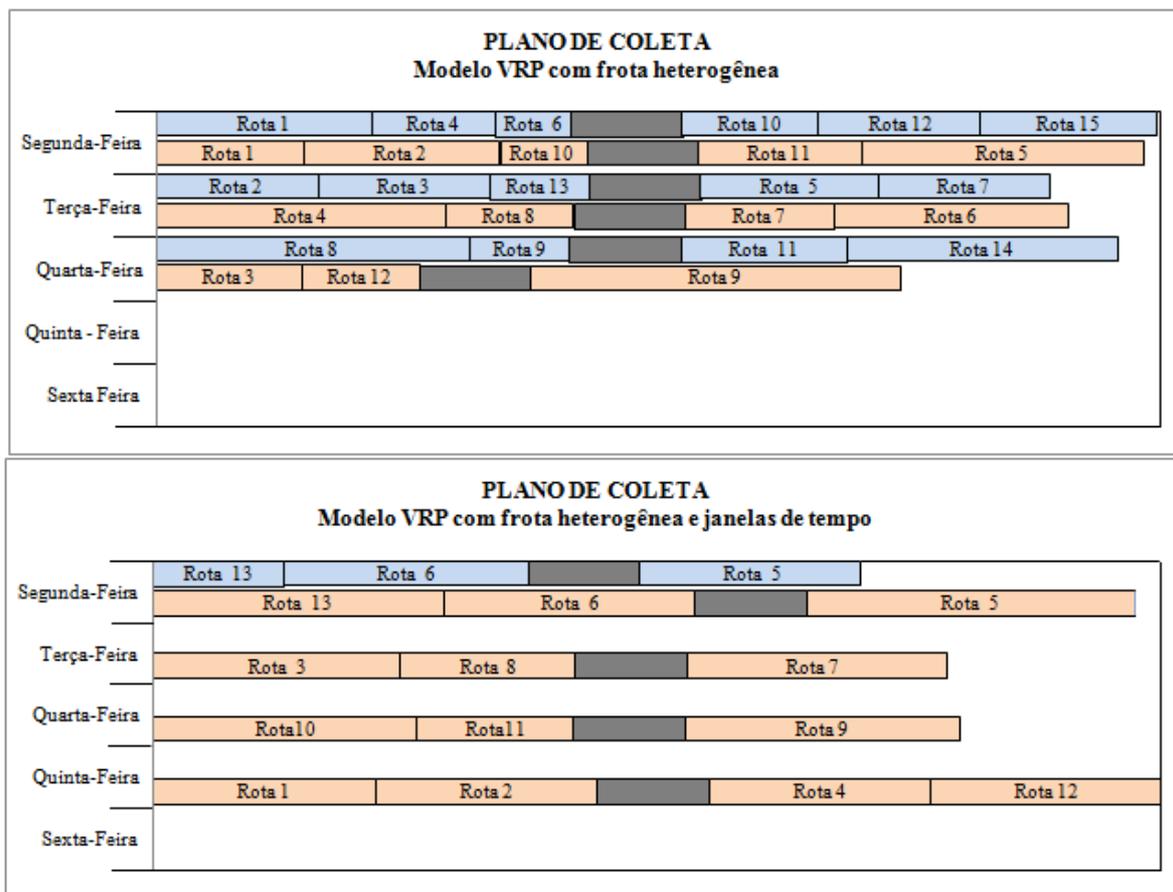


Figura 1: Planos de coleta resultante para cada um dos modelos

Além da análise dos planos finais de coleta, os resultados dos modelos também instigam algumas observações importantes. O valor da função objetivo no modelo VRP é de 724,50 minutos com um *gap* relativo de 87,41%, enquanto o valor da função objetivo para o modelo VRPTW foi de 499,62 minutos com um *gap* de 83,18%. Como os resultados não são ótimos, essas soluções não podem ser comparadas, provavelmente os limitantes do modelo VRP são melhores, pois o *gap* é semelhante apesar do valor da solução atual ser bem diferente. Vale ressaltar que os valores minimizados na função objetivo, consideram apenas os tempos de viagem entre os nós, pois o total dos tempos de atendimento é o mesmo para todas as soluções possíveis, uma vez que todos os clientes devem ser atendidos. Podemos notar na *tabela 1*, diferenças empiricamente significativas na percentagem de aproveitamento da capacidade dos veículos, onde o modelo VRP aproveita em média 62,28% da capacidade total dos veículos e o modelo VRPTW apresenta um melhor aproveitamento deste recurso (91,14%).

Em vista de que os dois modelos apresentam um *gap* relativo consideravelmente grande e o consumo de memória computacional foi bastante alto, resulta interessante o teste de uma abordagem aproximada para a resolução do problema relacionado. Por estas razões, e aproveitando trabalhos prévios de um dos autores sobre metaheurísticas para resolver problemas de roteamento (Pérez, López e Maury, 2010), uma alternativa metaheurística denominada *Viral System* para o problema da coleta de resíduos da cooperativa.

Viral System é um método aproximado inspirado na analogia biológica do comportamento dos vírus, seu mecanismo de replicação e processo de infecção em um organismo, a qual faz uso de operadores de vizinhança e mutação na sua execução, para mais detalhes do funcionamento da metaheurística veja Cortés *et al.* (2008). A fim de verificar se a

capacidade de carga dos veículos poderia ser aproveitada de uma melhor forma, a metaheurística foi adaptada de tal forma que permitisse *split pickup*. A metaheurística *Viral System* foi implementada na linguagem de programação MATLAB 7.12.0 (R2011a) em um computador com as mesmas características nas quais foram executados os modelos matemáticos apresentados anteriormente e sob a mesma parametrização correspondente ao delineamento experimental de trabalhos anteriores (PÉREZ, LÓPEZ e MAURY, 2010).

Os resultados obtidos através da implementação da metaheurística em relação às rotas geradas são apresentados na *Tabela 2* e a *Figura 2*. Através destes resultados podemos perceber que o plano final fornecido através deste método é muito similar ao obtido através do modelo VRPTW. É evidente que a coleta total poderia ser executada utilizando unicamente o veículo 2 de segunda até sexta-feira, no entanto, a percentagem média de aproveitamento da capacidade dos veículos, embora seja maior que o resultante do modelo VRP com frota heterogênea, ainda o modelo VRPTW fornece uma solução mais vantajosa para o plano de coleta em geral.

O valor da função objetivo da solução obtida através da metaheurística é de 640,83 minutos. Em relação às soluções obtidas pelos modelos VRP e VRPTW, podemos notar que este valor resulta melhor que o obtido pelo VRP, porém maior que o obtido pelo VRPTW. A solução final fornecida pela metaheurística foi obtida após de 18,38 minutos de execução, o qual representa um tempo consideravelmente menor que o executado pelos modelos, pois a diferença deles a metaheurística além do tempo de execução possui dois critérios adicionais de parada (número de iterações consecutivas sem melhora, e número de iterações máxima). O anterior implica que, se colocarmos como único critério de parada um tempo de execução de 60 minutos, não necessariamente obteríamos uma resposta melhor.

IMPLEMENTAÇÃO DA METAHEURÍSTICA <i>VIRAL SYSTEM</i>					
ROTAS	PERCORRIDO	CAPACIDADE OCUPADA (%)	ROTAS	PERCORRIDO	CAPACIDADE OCUPADA (%)
Rota 1	0-38-9-15-40-4-0	100.00	Rota 7	0-14-7-27-0	100
Rota 2	0-4-6-5-0	66.05	Rota 8	0-27-0	23.221
Rota 3	0-29-31-39-28-0	100.00	Rota 9	0-37-10-24-0	100
Rota 4	0-28-18-0	35.53	Rota 10	0-24-3-0	62.322
Rota 1	0-17-22-23-0	100	Rota 11	0-13-34-0	100
Rota 2	0-23-19-0	86.734	Rota 12	0-34-41-16-0	65.281
Rota 3	0-20-8-21-0	100	Rota 13	0-33-11-36-0	100
Rota 4	0-21-1-35-0	98.781	Rota 14	0-36-2-0	56.616
Rota 5	0-25-12-30-0	100	Rota 15	0-32-0	67.846
Rota 6	0-30-0	41.503	Rota 16	0-26-0	56.432
				Valor Médio	82.86

Tabela 2: Resultados da metaheurística *Viral System* considerando *Split Pickup*

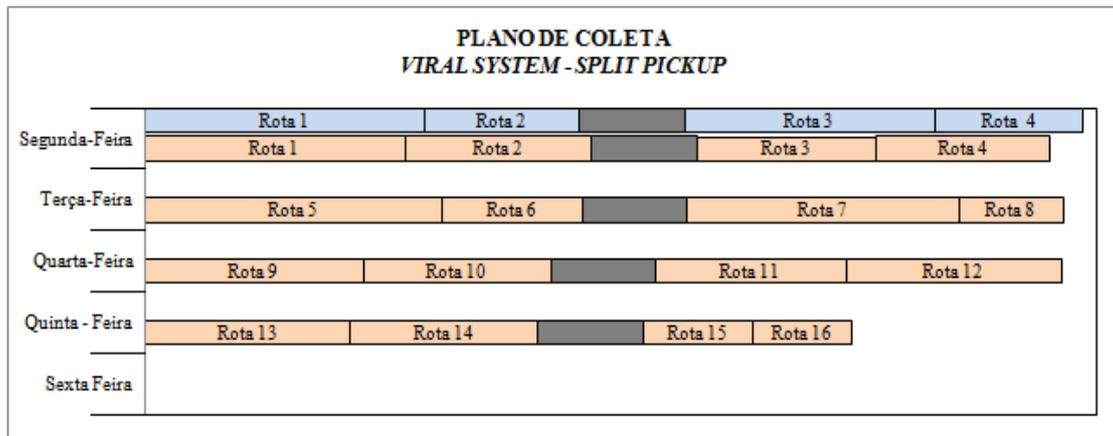


Figura 2: Plano de coleta obtido a través da metaheurística *Viral System*

6. Conclusões e perspectivas

Os modelos de roteamento de veículos se caracterizam por ter uma ampla aplicação em diferentes situações reais (Toth e Vigo, 2002). Neste trabalho foi estudada uma proposta de aplicação dos VRPs para o problema de coleta de resíduos sólidos recicláveis na cidade de Sorocaba-SP, o que evidencia possibilidades de utilização das técnicas de pesquisa operacional para tratar problemas atuais relacionados à busca pela sustentabilidade.

Conforme os resultados obtidos, os planos gerados através dos métodos utilizados, embora apresentem diferenças entre si, parecem ser mais eficientes que o utilizado pela cooperativa. Em relação às duas abordagens de modelagem matemática, apesar da formulação do modelo VRPTW envolve a utilização de um maior número de variáveis, seus resultados foram melhores que a formulação do VRP simples com frota heterogênea para o problema de roteamento de veículos para coleta de materiais recicláveis da CATARES.

Como um aspecto adicional, além de considerar a duração total do plano de coleta, a utilização dos veículos também foi analisada, observando-se diferenças significativas entre os dois modelos. Tais diferenças, junto ao consumo de memória por parte dos modelos e seus grandes *gap* motivaram a utilização da metaheurística *Viral System* adaptada ao problema da cooperativa. O que resultou em um plano de coleta bastante similar ao obtido pelo modelo VRPTW, embora com uma percentagem de aproveitamento da capacidade menor. Vale ressaltar que este resultado não pode ser generalizado para outras implementações em VRP devido às características da aplicação, as quais influenciam neste resultado.

Finalmente, devido ao tamanho do problema e às características observadas na execução dos modelos, considerar abordagens aproximadas mostra-se viável e justificável. Além disso, seria interessante analisar formas alternativas de abordar este tipo de problema em relação à definição dos nós e pontos de coleta, a fim de evidenciar quais abordagens poderiam ser mais vantajosas para obter melhores resultados e menor tempo de execução computacional.

Referências

- Arenales, M. N., Armentano, V., Morabito, R., e Yanasse, H.** (2007). Pesquisa Operacional.
- Azi, N., Gendreau, M., e Potvin, J.-yves.** (2010). An exact algorithm for a vehicle routing problem with time windows and multiple use of vehicles. *European Journal of Operational Research*, 202(3), 756-763.
- Barão, F. R., Maria, R., e Kripka, L.** (2008). Determinação da rota ótima para a coleta de resíduos sólidos urbanos no município de Passo Fundo - RS. Congresso nacional de matemática aplicada e computacional, 637-643.
- Bell, J. E., e McMullen, P. R.** (2004). Ant colony optimization techniques for the vehicle routing problem. *Advanced Engineering Informatics*, 18, 41-48.
- Cordeau, J.-françois, Laporte, G., Savelsbergh, M. W. P., e Vigo, D.** (2007). Vehicle Routing. *Handbook in Or &MS*, Vol 14 (Vol. 14, pp. 367-428).
- Cortés, P., García, J. M., Muñuzuri, J., e Onieva, L.** (2008). Viral System: A new bio-inspired optimisation approach. *Computers & Operations Research*, 35(9), 2840-2860.
- Eksioglu, B., Volkan, A., e Reisman, A.** (2009). Computers & Industrial Engineering The vehicle routing problem : A taxonomic review. *Russell The Journal Of The Bertrand Russell Archives*, 57, 1472-1483.
- Kallehauge, B.** (2008). Formulations and exact algorithms for the vehicle routing problem with time windows. *Computers & Operations Research*, 35, 2307-2330.
- Kim, H., Yang, J., e Lee, K.-D.** (2009). Vehicle routing in reverse logistic for recycling end-of-life consumer electronic goods in South Korea. *Transportation Research Part D*, 14, 291-299.
- Olivera, A.** (2004). Heurísticas para Problemas de Ruteo de Vehículos. Montevideo, Uruguay: Instituto de Computación, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República.
- Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil.** (2010).
- Pérez, K. Y, López, J. M., Maury, S.** Metaheurística Viral System para el Problema de Ruteo de Vehículos con Flota Heterogénea y Ventanas de Tiempo - FSMVRPTW (2010). Trabalho de conclusão de curso para obter o título de Engenheiro(a) Industrial - Universidad de Córdoba. Montería-Córdoba (Colombia), Dezembro 2010.
- Repoussis, P. P., e Tarantilis, C. D.** (2010). Solving the Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time Windows via Adaptive Memory Programming. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 18(5), 695-712.
- Rodriguez Salazar, M. E., Álvarez Hernández, S., e Bravo Núñez, E.** (2001). Coeficientes de distancia. *Coeficientes de Asociación* (pp. 43-54). Plaza y Valdez Editores.
- Simonetto, E. O., e Borenstein, D.** (2006). Gestão Operacional da Coleta Seletiva de Resíduos Sólidos Urbanos – Abordagem Utilizando um Sistema de Apoio à Decisão. *Gestão & Produção*, 13(3), 449-461.
- Simões, G.V.B.; Ferraz, J.L.; Mancini, S.D.; Bonilla, S.H.; Bizzo, W.A.** (2011) Coleta Seletiva como Instrumento de Políticas Públicas: A Experiência do Município de Sorocaba-SP. *Internacional Workshop Advances in Cleaner Production "Cleaner Production Initiatives And Challenges For A Sustainable World"*, São Paulo – Brazil.
- Toth, P., e Vigo, D.** (2002). *The vehicle routing problem*. SIAM.