

**GERENCIAMENTO DAS ENTREGAS CENTRALIZADAS DE UMA REDE DE LOJAS
DE VAREJO À LUZ DO PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS
CAPACITADOS COM FROTA HETEROGÊNEA**

Cassius Tadeu Scarpin

Programa de Pós Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia
Universidade Federal do Paraná
cassiusts@yahoo.com.br

Thiago André Guimarães

Programa de Pós Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia
Universidade Federal do Paraná
thiandgui@gmail.com

Maria Teresinha Arns Steiner

Programa de Pós Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia
Universidade Federal do Paraná
tere@ufpr.br

Resumo

Este trabalho apresenta duas propostas para o gerenciamento de um centro de distribuição de uma rede supermercadista modeladas por conceitos do Problema de Roteamento de Veículos Capacitados com Frota Heterogênea (PRVCFH). A primeira abordagem agrupa os clientes conforme a capacidade de carregamento dos veículos e na seqüência cada agrupamento é roteirizado, utilizando heurísticas clássicas, além de uma nova heurística para ajuste do agrupamento de clientes. Já a segunda abordagem inicia com a roteirização e posteriormente agrupa os clientes em sub-rotas conforme a capacidade de carregamento dos veículos, empregando um novo procedimento heurístico para a composição a priori da configuração da frota. Os resultados computacionais apontam um melhor desempenho da segunda abordagem em relação à primeira para a maioria das instâncias testadas, sendo que o inverso ocorre em casos particulares.

Palavras-chave: Roteamento, Frota Heterogênea, Heurística

Abstract

This paper presents two proposals for managing a distribution center of a network supermarket modeled by concepts of Fleet Size and Mix Capacitated Vehicle Routing Problem (FSMCMVRP). The first approach combines the customers as the loading capacity of vehicles and each cluster in the sequence is scripted, using classical heuristics, together with a new heuristic for setting the group of customers. The second approach starts with the routing and then grouping customers into sub-routes as the loading capacity of vehicles employing a new heuristic procedure to the fleet composition a-priori. The computational results show a better performance of the second approach to first for most of the instances tested, whereas the reverse occurs in special cases.

Keywords: Routing, Heterogeneous Fleet, Heuristic.

1. Introdução

O gerenciamento de um centro de distribuição (CD) é uma função complexa que envolve: recebimento de produtos, controle de estoque, definição de *layout*, gestão e sequenciamento de tarefas dos equipamentos, ressuprimento de produtos, separação de *picking*, formação e designação de cargas, entre outras tarefas. No que tange as atividades referentes à expedição de produtos, tem-se como principal problema a falta de informações que auxiliem à tomada de decisão para a composição do carregamento e roteirização das entregas.

Neste sentido, a pesquisa operacional se apresenta como uma das mais eficientes ferramentas no auxílio à gestão do CD, particularmente no âmbito da expedição de produtos. De acordo com Goldbarg e Luna (2005), os tradicionais Problemas de Roteamento de Veículos (PRV) buscam atender à esfera de planejamento operacional do CD através da provisão de planos econômicos e flexíveis para o atendimento de rede de demanda.

Diante deste cenário, este trabalho busca soluções para o problema da entrega de produtos centralizados em um CD de uma rede de lojas de varejo. Uma alternativa para redução de custos de uma rede de lojas, que possua um CD, é a centralização de entregas para os clientes de uma ou mais linhas de produtos. Essa alternativa visa minimizar os custos de transporte, visto que, com a venda realizada nas lojas e a entrega centralizada, a frota disponível pode ser melhor utilizada para esta atividade. Dado que um CD possui, em geral, mais do que um tipo de veículo disponível para realizar suas diversas tarefas, dentre elas: coletar produtos nas fábricas de fornecedores, transportar frutas e verduras, realizar a reposição de produtos nas lojas, entregar produtos para os clientes, entre outras utilizações, cada atividade citada pode ser realizada por tipos diferentes de veículos, dependendo da necessidade de peso, volume e tipo da carga.

Com isso, as atividades diárias realizadas pelos veículos não precisam ser necessariamente fixas, salvo em casos especiais como frigorífico. As diferentes capacidades de carga dos veículos podem ser exploradas de modo que a utilização destes seja otimizada. Deve-se considerar também que, veículos com diferentes capacidades de carregamento possuem diferentes custos por quilômetro percorrido. Por exemplo: se um veículo com 15 toneladas de capacidade fosse fixado, para a entrega centralizada de produtos da linha branca (geladeira, fogão, entre outros) e, no dia anterior, a venda desses produtos tenha sido baixa, gerando apenas 4 toneladas de produtos a ser entregue, o veículo fixado estaria subutilizado, e realizaria as entregas com um alto custo de rodagem. Uma opção para a redução desse custo de rodagem seria adotar outro veículo, menor e mais ágil, com capacidade de 7 toneladas, por exemplo. Esse tipo de decisão, referente à designação e composição de frota, deve ser tomado pelo gestor do CD ou gerente de entregas e sempre que possível essa decisão deve considerar os custos relacionados à atividade específica.

Finalmente, considerando que uma rede de lojas do varejo tenha muitos clientes para a entrega de produtos e uma frota com diferentes capacidades de carregamento, o objetivo deste trabalho é propor um modelo que defina a melhor configuração de frota em relação à disponibilidade de veículos para a realização das entregas, bem como da criação de rotas otimizadas para esses veículos, de modo que a demanda de todos os clientes seja atendida. Para tanto, a seção 2 do trabalho descreve o problema, enquanto que a seção 3 apresenta uma discussão sobre o Problema de Roteamento de Veículos e suas extensões. A seção 4 apresenta formalmente o método proposto e a seção 5 os resultados. A seção 6 tece as conclusões do estudo.

2. Descrição do Problema

O centro de distribuição, utilizado como base para este estudo, possui 2 (dois) tipos diferentes de veículos considerando suas capacidades de entrega, sendo: 7 e 12, clientes. Os veículos foram avaliados e classificados pela quantidade máxima de clientes que podem atender em uma rota em virtude da homogeneidade dos produtos transportados. O controle da capacidade de carregamento baseia-se, por simplificação do modelo, na quantidade de clientes, sendo que

essa classificação foi proposta pela própria empresa estudada. A rede varejista é composta de 28 lojas que realizam vendas de produtos da linha branca, além de um Centro de Distribuição, o qual é responsável pelas entregas dos produtos para os clientes. Em relação às restrições do problema tem-se:

- Cada cliente é atendido uma única vez por um único veículo (não são permitidas entregas fracionadas);
- A demanda total coberta por um veículo não pode exceder a sua capacidade de entrega;
- Cada um dos percursos inicia-se e termina no depósito;
- A distância total percorrida em um percurso não pode exceder a autonomia do veículo.

Em decorrência da heterogeneidade dos veículos, a solução do problema enseja encontrar a melhor configuração de frota, dado que a demanda dos clientes excede a capacidade total de carregamento da frota (soma das capacidades individuais dos veículos), necessitando, dessa forma, de mais de uma rota por veículo. Ao mesmo tempo busca-se determinar o conjunto de rotas de custo mínimo que atenda à demanda de todos os clientes.

3. O Problema do Roteamento de Veículos

O Problema do Roteamento de Veículos (PRV) vem sendo um dos temas mais estudados em otimização combinatória nas últimas décadas. Conforme descrito em Caric e Gold (2008), o PRV pode ser definido como: dado um conjunto de n ($i=1, \dots, n$) clientes, cada um demandando uma quantidade q_i de determinado produto, e um depósito com m veículos de capacidade Q , o objetivo é encontrar um conjunto de rotas, começando e terminando no depósito, de forma que todos os clientes tenham suas demandas satisfeitas, sejam servidos por apenas um único veículo e os custos de transporte sejam minimizados. Pelo fato do PRV ser uma generalização do Problema do Caixeiro Viajante (PCV), ele pertence à classe de problemas NP-difícil, e um algoritmo capaz de encontrar uma solução ótima em tempo polinomial não é conhecido para uma grande quantidade de clientes, conforme Martins *et al.* (2004).

A figura 1 representa um exemplo de instância do problema com um depósito e dez clientes. Neste exemplo, para suprir a demanda, são necessários três percursos (linhas tracejadas) que partem do depósito e retornam a ele fazendo o menor percurso possível entre as cidades visitadas.

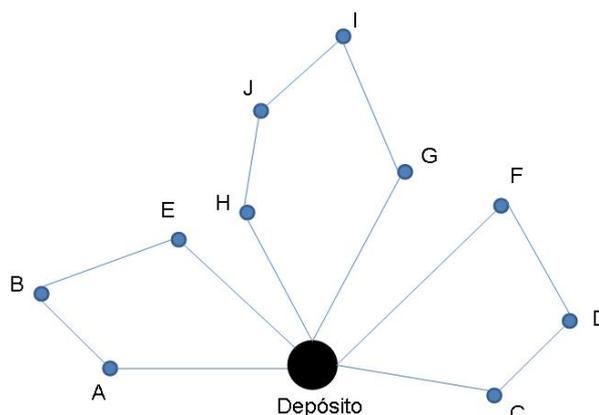


Figura 1 – Exemplo de um grafo com dez pontos para múltiplos caixeiros viajantes.

O PRV possui inúmeras variações, sendo que, atualmente a maioria dos trabalhos vem concentrando-se no caso capacitado. Nele, a demanda total coberta por um veículo não pode exceder a sua capacidade, além de que a distância total percorrida em um percurso não pode exceder a autonomia do veículo.

O problema de roteamento de veículos capacitado *PRVC*, pode ser agrupado em duas classes em função das características da frota de veículos. Dessa forma tem-se o *PRVC* propriamente dito, em que a capacidade de carregamento não difere entre os veículos que

compõe a frota além do Problema de Roteamento de Veículos com Frota Heterogênea (PRVFH), onde a capacidade de carregamento difere entre os veículos que compõe a frota.

Pesquisas recentes para o PRVC vêm considerando restrições espaciais de carregamento, acoplado o PRV ao *Bin-Packing Problem (BPP)*. Problemas com restrições bidimensionais de carregamento foram tratados em Iori *et al.* (2007) através de uma abordagem exata, baseado em um algoritmo *branch-and-cut* para a minimização da rota que evoca iterativamente um algoritmo *branch-and-bound* para garantir a factibilidade do carregamento. Já Gendreu *et al.* (2008) propuseram um método híbrido baseado em busca tabu e pelo algoritmo *branch-and-bound*. Abordagens com restrições tridimensionais de carregamento foram inicialmente consideradas em Gendrau *et al.* (2006), onde os autores propuseram um método de busca tabu para a resolução do problema do carregamento que invoca iterativamente outro procedimento tabu para garantir a factibilidade do carregamento. Já Fuellerer *et al.* (2010) utilizaram colônia de formigas na otimização do roteamento, associado à procedimentos heurísticos para a obtenção de um carregamento factível para cada rota, obtendo resultados superiores sobre as mesmas instâncias testadas em Gendrau *et al.* (2006).

Já o PRVFH enseja, além do roteamento, a determinação da composição da frota, podendo ou não estar acoplado a restrições de carregamento. O PRVFH foi inicialmente tratado em Golden *et al.* (1984) que adaptou a heurística das economias de Clarke e Right (1964) para a composição de frota e roteamento de veículos. Gendreau *et al.* (1999) resolveram o problema sob o mesmo enfoque através de busca tabu. Problemas mais complexos, considerando restrições de carregamento, foram tratados em Campos (2008), que além da composição da frota e roteamento de veículos, considerou restrições tridimensionais de carregamento e janelas de tempo.

Este trabalho considera dois veículos com capacidades distintas de carregamento. Em decorrência da homogeneidade do carregamento, as restrições de capacidade são unicamente condicionadas às quantidades de entregas que os veículos podem realizar. Portanto, conforme a taxonomia exposta, o problema estudado nesse artigo pode ser classificado como PRVFH com restrições de carregamento unidimensionais.

3.1. O Problema de Agrupamento (Clusterização)

O problema das p -medianas será introduzido com o objetivo de determinar no grafo formado pelos clientes, p -pontos principais, que representam sementes ou depósitos fictícios. A cada uma destas medianas, os demais pontos serão designados, de modo a formar p -conjuntos iniciais, cada um com cardinalidade igual a capacidade dos veículos. O problema é tratado pela teoria dos grafos que tem por objetivo localizar facilidades ao longo de uma rede viária. Estas facilidades (p -medianas) devem ser localizadas de forma a minimizar a soma da distância de cada um dos pontos à facilidade mais próxima, ponderada por um fator de demanda. O problema pode ser resolvido de forma exata, conforme demonstrado por Hakimi (1965), usando enumeração exaustiva ou por programação inteira. Porém, quando se trata de problemas muito grandes, torna-se necessário recorrer a métodos aproximados (heurísticos) tendo em vista o esforço computacional que seria exigido pelos mesmos. Um algoritmo heurístico foi descrito por Teitz e Bart (1968), e pode ser usado em problemas de maior porte.

Algumas definições sobre as p -medianas são apresentadas para dar sustento na descrição do algoritmo. Para um grafo $G(V, E)$, define-se número de *out*-transmissão e *in*-transmissão, para cada ponto $v_i \in V$, como sendo, respectivamente:

$$\sigma_0(v_i) = \sum_{v_j \in V} \theta_j \cdot w(v_i, v_j)$$

$$\sigma_i(v_i) = \sum_{v_j \in V} \theta_j \cdot w(v_j, v_i)$$

Onde $w(v_i, v_j)$ é a distância entre o vértice v_i e v_j , e θ_j é o peso associado ao ponto v_j . Conforme Christofides (1975), são chamadas de *out*-mediana e *in*-mediana de um grafo, respectivamente, aos pontos \bar{v}_i e \bar{v}_j que satisfazem as seguintes condições:

$$\sigma_0(\bar{v}_0) = \min_{v_i \in V} [\sigma_0(v_i)]$$

$$\sigma_t(\bar{v}_t) = \min_{v_i \in V} [\sigma_t(v_i)]$$

Para generalizar estes conceitos de *out*-transmissão e *in*-transmissão para p -medianas, considera-se V_p um subconjunto do conjunto de pontos V do Grafo $G(V, E)$, que possui p elementos, isto é, $|V_p| = p$. Define-se ainda,

$$w(V_p, v_j) = \min_{v_i \in V} [w(v_i, v_j)] \text{ e } w(v_j, V_p) = \min_{v_i \in V} [w(v_j, v_i)]$$

Onde $w(V_p, v_j)$ representa a distância do subconjunto de pontos V_p até o ponto v_j e $w(v_j, V_p)$ indica a distância do vértice v_j até o subconjunto V_p . Analogamente ao que foi feito pra um só vértice, define-se os números de *out*-transmissão e *in*-transmissão, respectivamente, para o conjunto V_p , da seguinte forma:

$$\sigma_0(V_p) = \sum_{v_j \in V} \theta_j \cdot w(V_p, v_j)$$

$$\sigma_t(V_p) = \sum_{v_j \in V} \theta_j \cdot w(v_j, V_p)$$

Finalmente, chama-se de p -*out*-mediana e p -*in*-mediana aos conjuntos \bar{V}_{po} e \bar{V}_{pt} , respectivamente, para os quais:

$$\sigma_0(\bar{V}_{po}) = \min_{V_p \subset V} [\sigma_0(V_p)]$$

$$\sigma_t(\bar{V}_{pt}) = \min_{V_p \subset V} [\sigma_t(V_p)]$$

Neste trabalho, considera-se um grafo não orientado, tornando indiferente o conceito de p -*in*-mediana ou p -*out*-mediana, que doravante será denominado apenas de p -mediana, o que simplifica consideravelmente a notação utilizada.

No algoritmo de Teitz e Bart (1968), inicialmente escolhem-se um conjunto S formado por p pontos, considerado como uma aproximação do conjunto \bar{V}_p das medianas. Verifica-se se algum ponto $v_i \in V - S$ pode substituir, de acordo com o algoritmo abaixo, algum ponto $v_j \in V$, produzindo um novo conjunto S' tal que: $S' = S \cup \{v_i\} - \{v_j\}$ e $\sigma(S') < \sigma(S)$. Se isto for possível, substituímos v_j por v_i e S' é considerado uma nova aproximação para o conjunto \bar{S} , onde nenhuma substituição de pontos produza um número de transmissão menor.

Os passos para este algoritmo são:

Passo 1. Construa um conjunto inicial S , com p elementos de V ;

Passo 2. Rotule todos os pontos $v_i \notin S$ como “não-analisados”;

Passo 3. Enquanto existirem pontos “não-analisados” no conjunto $V-S$, faça:

a) Selecione um vértice “não-analisado” $v_i \in V - S$, e calcule a redução Δ_{ij} do número de transmissão, $\forall v_j \in S : \Delta_{ij} = \sigma(S) - \sigma(S \cup \{v_i\} - \{v_j\})$;

b) Faça $\Delta_{ijo} = \max_{v_j \in S} [\Delta_{ij}]$;

- c) Se $\Delta_{ijo} > 0$ faça $S \leftarrow S \cup \{v_i\} - \{v_j\}$ rotulando v_{jo} como “analisado”;
- d) Se $\Delta_{ijo} \leq 0$ rotule v_i como “analisado”.

Passo 4. Se durante a execução do passo anterior ocorrer modificações no conjunto S , volte para o passo 2. Caso contrário PARE. O conjunto S será uma aproximação para o problema das p -medianas.

3.2. O Problema da Roteirização de Veículos

Um dos possíveis procedimentos heurísticos para a construção de rotas para PCV é o algoritmo da inserção mais econômica. Este procedimento gerará uma rota inicial e factível para o problema.

Algoritmo da inserção mais econômica (STEINER, *et al.*, 2000):

Passo 1. Comece com um sub-grafo consistindo somente do nó p ;

Passo 2. Encontre o nó m tal que $distância(p, m)$ seja mínima e forme a sub-rotas $p-m-p$;

Passo 3. Encontre $i-j$ na sub-rotas e k que não esteja na rota, tal que $distância(i, k) + distância(k, j) - distância(i, j)$ seja mínima e, então, insira k entre i e j ;

Passo 4. Se todos os pontos do grupo já estiverem na rota, pare. Se não, volte ao passo 3.

3.3. Algoritmos de melhorias de rotas

Os algoritmos de melhorias de rotas buscam diminuir a distancia total percorrida pelo caixeiro viajante. A melhor classe conhecida de algoritmos de melhoria de rotas é a heurística de troca $k-opt$ de Lin e Kernighan (1973), sendo as heurísticas de troca de arcos $2-opt$ e $3-opt$ as mais utilizadas, destacando-se que boas soluções iniciais são fundamentais para que se obtenha boas soluções finais (CAMPOS, 2008).

Os métodos $k-opt$ buscam a melhora pela substituição de k arcos no roteiro estabelecido anteriormente, isto é, k arcos são removidos do roteiro e substituídos por outros k arcos. Caso alguma melhoria seja detectada, a troca é aceita e este passa a ser o novo roteiro.

Neste presente trabalho este processo se repete até que nenhuma troca resulte em melhoria. Segundo Laporte *et al.* (1999) este processo termina em um mínimo local e possui ordem de complexidade $O(n^k)$. Quanto maior for o valor de k , melhor será a solução, entretanto o esforço computacional requerido também será maior. Isto leva a um *trade-off* entre qualidade e tempo computacional.

A figura 2 mostra o caso particular da troca $2-opt$ e a figura 3 da troca $3-opt$. Para a troca de arcos $3-opt$ existirão sete diferentes possibilidades de novas rotas, mas três delas recaem em melhoria $2-opt$.

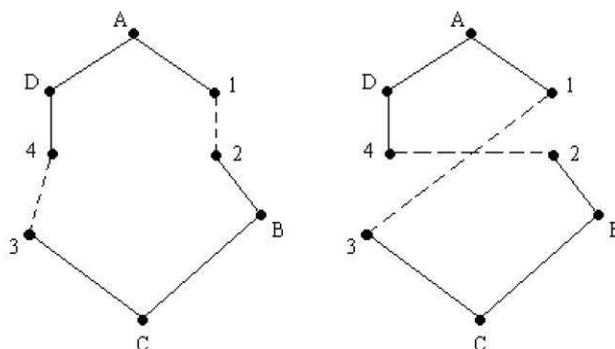


Figura 2 – Melhoria $2-opt$. Fonte: Adaptado de Costa (1997).

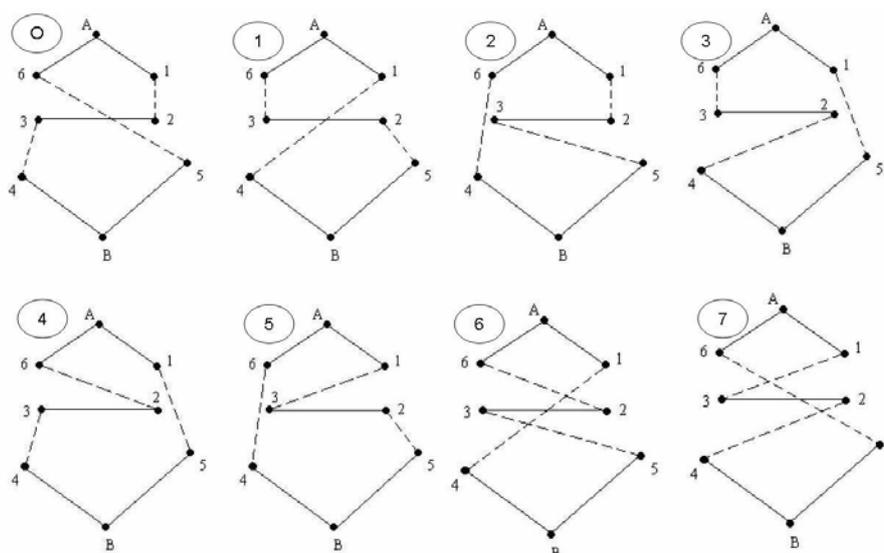


Figura 3 – Melhoria 3-opt . Fonte: Adaptado de Costa (1997).

As trocas 2, 4 e 7 são casos de melhoria 2-opt, pois não houve substituição dos arcos 1-2, 3-4 e 4-6, respectivamente. Logo, na melhoria 3-opt quatro novas alternativas de rotas são avaliadas a cada iteração.

4. Abordagens Propostas e Dados de Análise

Inicialmente, para as entregas centralizadas, os clientes são definidos pelos seus endereços e identificados pelas coordenadas de latitude e longitude como pontos em um mapa. A quantidade de clientes, em geral, é superior a capacidade de um ou mais veículos, então, deve-se escolher quais veículos, dentre os designados para esta tarefa, para fazer rotas adicionais de entrega, como já mencionado.

Neste trabalho são propostas duas abordagens para solucionar o problema. A primeira delas agrupa os clientes pelo algoritmo de Teitz e Bart (1968), ajustado *a priori*, para definição da quantidade de medianas conforme a capacidade dos veículos, e *a posteriori*, para os agrupamentos formados, através de uma heurística proposta, denominada *k-fit*. Na seqüência cada agrupamento é roteirizado, sendo que a rota inicial é gerada pela heurística construtiva de inserção mais econômica e refinada pelas heurísticas de melhoria 2-opt e 3-opt. Esta primeira abordagem, juntamente com a heurística *k-fit*, é apresentada a seguir:

Início da Abordagem 1:

Passo 1 – Definição da quantidade de medianas: Seja n o número de clientes a serem atendidos, e c_i ($i = 1, \dots, k$) a capacidade de cada veículo.

1.1 – Ordena-se, em ordem crescente, as capacidades dos veículos (lista de capacidades).

1.2 – Soma-se as capacidades até que se atenda a demanda n , conforme a lista ordenada de capacidades.

1.2.1 – Se a demanda for atendida pela soma até a capacidade do k -ésimo veículo, tem-se k medianas. Fim do Passo 1.

1.2.2 – Senão, continue a soma das capacidades, reiniciando pelo início da lista ordenada de capacidades até suprir a demanda. Fim do Passo 1.

Passo 2 – Agrupamento dos pontos pela heurística de Teitz e Bart (1968), com a quantidade p de medianas obtidas no passo 1 ($p = k$). Fim do Passo 2.

Passo 3 – Designação dos veículos para cada agrupamento:

3.1 – Ordena-se os agrupamentos encontrados no Passo 2 em ordem crescente (lista de agrupamentos).

3.2 – Alinham-se a lista de capacidades à lista de agrupamentos, designando cada veículo a um agrupamento (vinculada a uma mediana), gerando-se uma lista com p pares de conexão (agrupamento-veículo). Fim do Passo 3.

Passo 4 – Ajuste dos agrupamentos:

4.1 – Aplica-se a heurística de inserção mais econômica na criação de um roteiro entre as medianas, iniciando e terminando a rota no CD. Criando uma ordem de pares agrupamento-veículo.

4.2 – Para cada p -agrupamento-veículo, decrescendo de $j = p$ até 2, verifica-se se há excesso de demanda.

4.2.1 – Se sim, escolhe-se como pontos excedentes aqueles que estão mais próximos do agrupamento subsequente (agrupamento $p = j-1$) e os insere neste agrupamento.

4.2.2 – Senão, avalie o próximo agrupamento ($p = j-1$).

4.3 – Para cada p -agrupamento-veículo, crescendo de $j = 1$ até $p-1$, verifica-se se há excesso de demanda.

4.3.1 – Se sim, escolhe-se como pontos excedentes aqueles que estão mais próximos do agrupamento subsequente (agrupamento $p = j+1$) e os insere neste agrupamento.

4.3.2 – Senão, avalia-se o próximo agrupamento ($p = j+1$).

Fim do Passo 4.

Passo 5 – Construção das rotas para cada agrupamento:

5.1 – Aplica-se a heurística construtiva de inserção mais econômica em cada agrupamento para obtenção de uma rota inicial.

5.2 – Aplica-se a heurística de melhoria *2-opt*.

5.3 – Aplica-se a heurística de melhoria *3-opt*. Fim do Passo 5.

Fim da Abordagem 1:

As rotinas 4.2 e 4.3 garantem que não haja excesso de demanda em cada veículo, viabilizando o carregamento. Da mesma forma, ao se definir a quantidade necessária de veículos para o atendimento do conjunto de rotas, também é garantido que a demanda é atendida totalmente. A heurística *k-fit* proposta é composta pelos passos 1, 3 e 4.

A segunda abordagem para solucionar o problema, consiste em criar uma rota única para todos os pontos através do método heurístico da inserção mais econômica. Obtida a solução inicial, esta é refinada através das melhorias *2opt* e *3opt*, nesta ordem. Em seguida, define-se a composição da frota disponível combinando os diferentes veículos, em relação a quantidade e capacidade dos mesmos, de forma a minimizar a capacidade ociosa de carregamento da combinação. Encontrado a combinação com a menor ociosidade, a designação de um veículo para uma sub-rotas é feita visando minimizar a distancia total percorrida. Uma vez definidas as sub-rotas, refina-se cada uma destas, com a aplicação das melhorias *2opt* e *3opt*.

O mecanismo que regula esta designação consiste em ordenar os veículos em ordem decrescente de capacidade de carregamento. Toda a ociosidade, desta forma, é absorvida pelo último veículo da lista ordenada, isto é, os veículos com maiores capacidades terão sempre a máxima ocupação. Ao mesmo tempo, tem-se que o veículo que está designado para a última sub-rotas, e que absorveu a ociosidade, atenda uma quantidade menor de clientes. Esta segunda abordagem é apresentada a seguir:

Início da Abordagem 2:

Passo 1 – Aplica-se a heurística de inserção mais econômica na criação de um roteiro único entre todos os pontos, iniciando e terminando a rota no CD.

- 1.1 – Aplica-se a heurística de melhoria *2-opt*.
- 1.2 – Aplica-se a heurística de melhoria *3-opt*. Fim do Passo 1.

Passo 2 – Calcula-se entre todas as combinações possíveis, em relação a capacidade de cada veículo disponível, qual é a combinação que gera a menor ociosidade de carregamento (i é a quantidade de veículos diferentes disponíveis).

- 2.1 – Listam-se todas as capacidades dos veículos disponíveis: c_i .
- 2.2 – Para cada capacidade encontra-se um múltiplo desta que seja maior que a demanda total de clientes. Acha-se o limitante de utilização do veículo: l_i .
- 2.3 – Crie a lista de combinações úteis, isto é, combinações entre todos os diferentes veículos que, quando somadas as suas capacidades, atenda a demanda total.
- 2.4 - Da lista de combinações úteis escolha aquela que minimize a diferença entre somatório das capacidades desta combinação e a demanda total. Esta será a ociosidade. Fim do Passo 2.

Passo 3 – Criação das sub-rotas.

- 3.1 – Ordena-se, em ordem decrescente, a capacidade dos veículos da combinação útil escolhida.
- 3.2 – Designa-se os veículos conforme a lista ordenada no passo 3.1, até a demanda total ser atendida. Testa-se esta designação iniciando em ambos os lados da rota total, escolhendo a direção que minimiza a distância total percorrida. Fim do Passo 3

Passo 4– Refinamento das sub-rotas. Para cada sub-rota:

- 4.1 – Aplica-se a heurística de melhoria *2-opt*.
- 4.2 – Aplica-se a heurística de melhoria *3-opt*. Fim do Passo 4.

Fim da Abordagem 2:

Nesta segunda abordagem, a decisão de atribuir a ociosidade para o veículo de menor capacidade tem por objetivo minimizar os custos totais de utilização da frota. Esta redução é possível pelo fato de um veículo com maior capacidade poder atender mais clientes. Conseqüentemente, o custo de rodagem para esses veículos de maior capacidade é maior quando estes rodam vazios, e isso ocorre no trajeto de retorno do último cliente atendido pela rota para o depósito.

Os dados utilizados para a realização dos testes computacionais para as duas abordagens propostas são instâncias reais de uma rede supermercadista com um centro de distribuição. Cada ponto é o endereço de um cliente que adquiriu algum produto da linha branca em uma das lojas da rede e cuja entrega é de responsabilidade do CD. A fim de testar as abordagens escolheu-se 10 instâncias, que representam 10 dias de entregas. Cada instância possui uma quantidade de clientes, a localização destes é representada por um ponto formado pela latitude e longitude de seus endereços. Por exemplo: A instância A-45-CD é formada por 45 clientes, sendo que cada cliente adquiriu apenas um único produto, e dessa forma, será atendido uma única vez. Já a instância B-45-CD possui as mesmas características da instância anterior, exceto a localização dos clientes. Não foi encontrado nas instâncias testadas casos em que um cliente pede mais de um produto, não sendo este caso, portanto, o objetivo principal deste trabalho.

5. Resultados e Discussões

A tabela a seguir apresenta os resultados obtidos para as instâncias testadas. Os valores referentes à distância total da rota representam distâncias euclidianas normalizadas. Como o propósito é comparar as duas abordagens, não se faz necessária a conversão geodésica dos dados. A primeira coluna se refere à instância, a segunda à quantidade de clientes dessa instância, a

terceira e a quarta se referem à distância e ao número de veículos definidos, respectivamente, pela abordagem 1; a quinta e a sexta se referem à distância e ao número de veículos definidos, respectivamente, pela abordagem 2; enquanto que a sétima coluna apresenta a diferença percentual da segunda abordagem em relação à primeira. Valores menores que 100% representam um melhor desempenho da segunda abordagem em relação à primeira.

Instância	Nº Clientes	Abordagem 1	Número de rotas	Abordagem 2	Número de rotas	Diferença (A2/A1)
A-19-CD	19	2,049533402	2	1,989644308	2	97,08%
A-23-CD	23	1,749334223	3	1,398319254	2	79,93%
A-24-CD	24	2,485358859	3	2,076882675	2	83,56%
A-34-CD	34	2,077019315	4	2,544719221	5	122,52%
A-45-CD	45	3,252414477	5	3,205337527	5	98,55%
B-45-CD	45	2,769558529	5	2,731980657	5	98,64%
A-50-CD	50	2,633170726	6	2,569282003	5	97,57%
A-67-CD	67	4,605329861	8	3,683109094	6	79,97%
A-68-CD	68	4,004000922	8	4,495826215	9	112,28%
A-72-CD	72	4,061877836	8	3,4623354	6	85,24%

Tabela 1 – Resultados Obtidos

Os resultados mostram que o desempenho da segunda abordagem foi superior para 8 das 10 instâncias. Pelo fato da segunda abordagem realizar o agrupamento das sub-rotas a partir da rota total objetivando alocar inicialmente os veículos com maior capacidade, era esperado que seu desempenho fosse superior à primeira abordagem. Entretanto, para o caso onde há certo grau de dispersão homogênea de clientes em relação à localização do depósito, a estratégia adotada na segunda abordagem acabou produzindo resultados inferiores à da primeira abordagem, visto que foi necessário uma quantidade maior de sub-rotas para a realização de entregas. Isso se verifica na figura 4 que apresenta a roteirização para a instância A-34-CD nas duas abordagens. Já para as instâncias com dispersão heterogênea dos clientes em relação ao depósito, ou seja, alguns clientes estão concentrados em determinadas regiões, enquanto que outros estão dispersos, os resultados da segunda abordagem foram sempre superiores ao da primeira abordagem, já que a quantidade de rotas sub-rotas foi menor. As figuras 5 e 6 exemplificam esses casos para as instâncias A-23-CD e B-45-CD respectivamente.

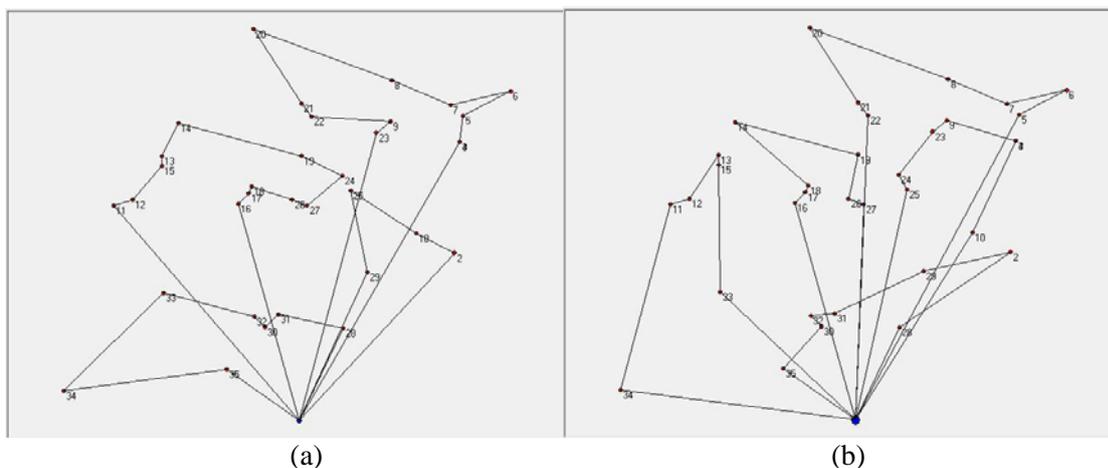


Figura 4 – Comparações visuais entre as abordagens 1(a) e 2(b) – instância A-34-CD.

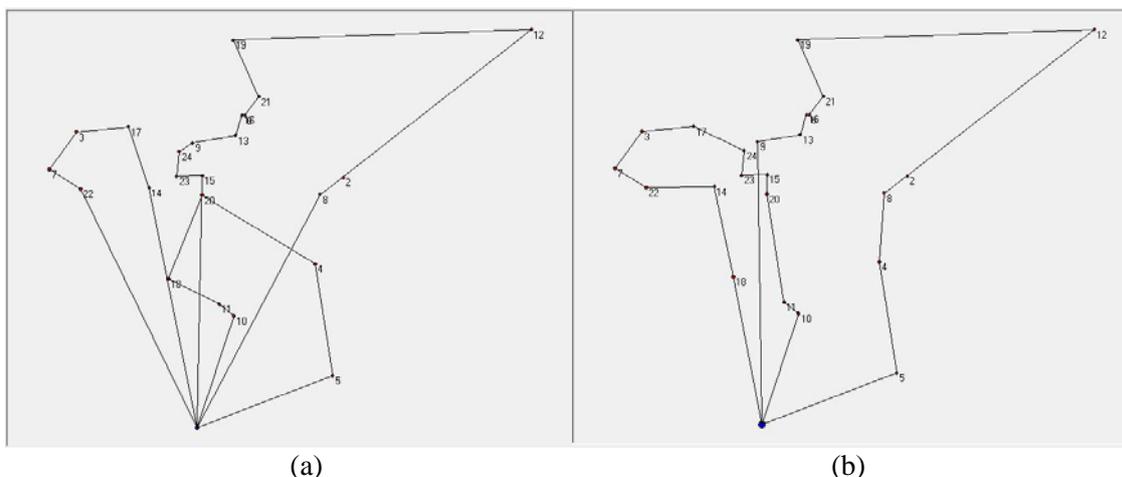


Figura 5 – Comparações visuais entre as abordagens 1(a) e 2(b) – instância A-23-CD.

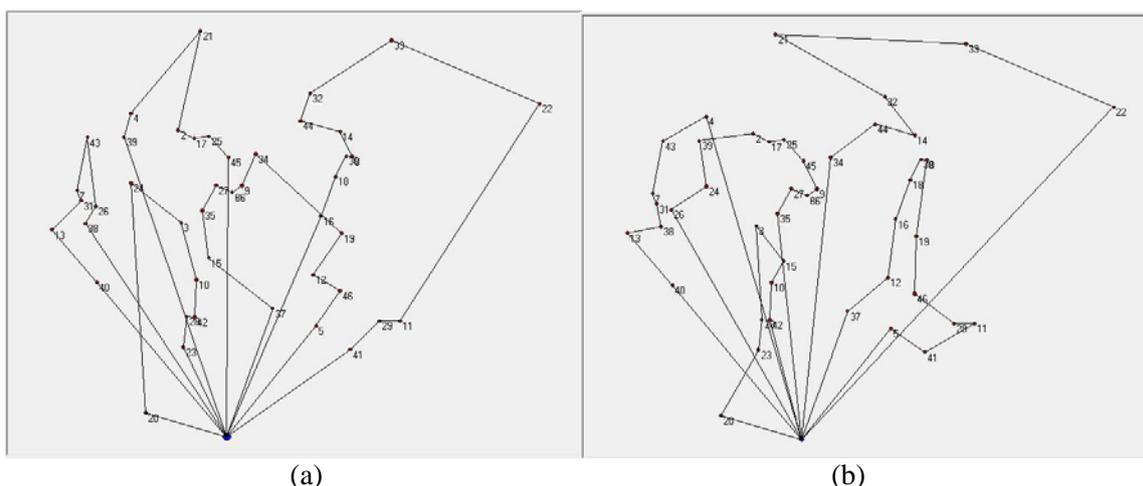


Figura 6 – Comparações visuais entre as abordagens 1(a) e 2(b) – instância B-45-CD.

Pode-se observar que, pelo critério de distância total percorrida, os resultados da segunda abordagem foram melhores que os resultados da primeira, entretanto a primeira abordagem garantiu uma regionalização melhor de clientes do que na segunda. Contudo, percebe-se que a quantidade de sub-rotas é um fator determinante para a obtenção de resultado, o que sugere uma investigação maior para este critério, podendo até surgir uma solução híbrida dessas duas abordagens.

6. Conclusões

Este trabalho apresentou duas propostas para configuração de frota e roteirização de entregas de produtos de linha branca de uma rede supermercadista, objetivando minimizar a distância percorrida pela frota de veículos e conseqüentemente os custos de transporte. Observou-se que a primeira abordagem que consiste em primeiramente agrupar os clientes e depois roteirizar produziu resultados inferiores para 8 das 10 instâncias testadas. De forma equivalente, a segunda abordagem, que consiste em primeiramente roteirizar todos os clientes e posteriormente quebrar esta rota única em sub-rotas de forma a atender a capacidade de carregamento do veículo, obteve um desempenho aquém da primeira abordagem para as instâncias em que a localização

dos clientes é mais heterogênea. Entretanto as comparações visuais ensejam que a primeira abordagem atende a demanda de forma mais regionalizada, produzindo dessa forma uma quantidade maior de sub-rotas para a maioria das instâncias testadas.

As duas abordagens desenvolvidas neste trabalho procuram utilizar métodos heurísticos consagrados na literatura, agregados com heurísticas operacionais importantes. Na primeira abordagem, a heurística *k-fit* procura promover a regionalização das sub-rotas, o que consegue satisfatoriamente na análise qualitativa dos resultados. Por sua vez, na segunda abordagem, o objetivo principal é o desenvolvimento da heurística que minimiza a ociosidade dos veículos utilizados, garantindo assim que veículos com maior capacidade possam realizar mais entregas em uma mesma sub-rota, minimizando os custos do transporte. Esse objetivo também é alcançado nessa abordagem. A continuidade dos estudos nessas heurísticas e a comparação do desempenho de ambas em instâncias dadas na literatura serão os objetos futuros de estudo, no sentido de unificar as heurísticas *k-fit* e de ociosidade da frota, dado o potencial promissor que decorre dessas heurísticas.

Referências

- Campos, D. S.**, Integração de problemas de carregamento e roteamento de veículos, com janela de tempo e frota heterogênea, *Tese de Doutorado em Engenharia de Produção*, EPUSP, 2008.
- Carić, T. e Gold, H.**, *Vehicle Routing Problem*, In-Teh, Zagreb, 2008.
- Christofides, N.**, *Graph Theory: An algorithmic approach*. New York: Academic Press Inc, London, 1975.
- Clarke, G. e Wright, J. W.**, (1964), Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points, *Operations Research*, 12, 568-581.
- Costa, D. M. B.**, Aplicação de Algumas técnicas da Pesquisa Operacional na Otimização de Serviços Postais, *Dissertação de Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia*, UFPR, 1997.
- Fuellerer, G., Doerner, K. F., Hartl, R. F. e Iori, M.**, (2010), Metaheuristics for vehicle routing problems with three-dimensional loading constraints, *European Journal of Operational Research*, 201, 751-759.
- Gendreau, M., Laporte, G., Musaraganyi, C. e Taillard, E. D.**, (1999), A tabu search heuristic for the heterogeneous fleet vehicle routing problem, *Transportation Science*, 26, 1153-1173.
- Gendreau, M., Iori, M., Laporte, G. e Martello, S.**, (2006), A Tabu Search Algorithm for a Routing and Container Loading Problem, *Transportation Science*, 40, 342-350.
- Gendreau, M., Iori, M., Laporte, G. e Martello, S.**, (2008), A Tabu Search heuristic for the vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints, *Networks*, 51, 4-18.
- Goldberg, M. C. e Luna, H. P. L.**, *Otimização Combinatória e Programação Linear*, Elsevier, Rio de Janeiro, 2005.
- Golden, B. L., Assad, A. A., Levy, L. e Gheysens, F. G.**, (1984) The fleet size and mix vehicle routing problem, *Computers & Operations Research*, 11, 49-66.
- Hakimi, S. L.**, (1965), Optimum Distribution of Switching Centers in a Communication Network and Some Related Graph Theoretic Problems, *Operations Research*, 13, 462-475.
- Iori, M., González, J. J. S. e Vigo, D.**, (2007), An Exact Approach for the Vehicle Routing Problem with Two-Dimensional Loading Constraints, *Transportation Science*, 41, 253-264.
- Laporte, G., Gendreau, M., Potvin, J. e Semet, F.**, (1999), Classical and Modern Heuristics for the Vehicle Routing Problem, *International Transactions in Operational Research*, 7, 285-300.
- Lin, S. e Kernighan, B. W.**, (1973) An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling Salesman Problem, *Operations Research*, 21, 498-516.
- Martins, A. X., Souza, M. J. F. e Castro, O. M.**, (2004), Um método híbrido para resolução do problema de roteamento de veículos, *Anais do XXIV ENEGEP*, 3167-3174.
- Steiner, M. T. A., Zamboni, L. V. S., Costa, D. M. B., Carnieri, C. e Silva, A. C. L.**, (2000), O problema de roteamento no transporte escolar, *Pesquisa Operacional*, 20, 83-99.
- Teitz, M. B. e Bart, P.**, (1968), Heuristic Methods for Estimating the Generalized Vertex Median of a Weighted, *Operations Research*, 16, 955-961.