

ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS COM MÚLTIPLOS DEPÓSITOS EM SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA LIVRE

Orivalde Soares da Silva Júnior

Luiz Antônio Silveira Lopes

Ulf Bergmann

Instituto Militar de Engenharia - Rio de Janeiro

RESUMO

Um elemento chave dos sistemas de distribuição física é a roteirização e programação de veículos para clientes que requerem o serviço de entrega. Para empresas que possuem mais de um depósito, o clássico Problema de Roteirização de Veículos (PRV) deve ser estendido para solucionar o PRV com múltiplos depósitos (PRVMD). Este problema envolve a geração de um conjunto de rotas com custo mínimo, iniciando e terminando no seu depósito de origem, para uma frota de veículos que atenda um conjunto de clientes com demandas conhecidas. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é desenvolver um procedimento para solucionar o PRVMD e implementá-lo em um Sistema de Informação Geográfica (SIG) livre.

ABSTRACT

An element key of the physical distribution systems is the routing and scheduling of vehicles for customers that require the delivery service. For companies who have more than one depot, the classic Vehicle Routing Problem (VRP) is extended to solve the multi-depot VRP (MDVRP). This problem consists in the generation of a set of routes with minimum cost, initiating and finishing in the depot of origin, for a fleet them vehicles that a set of customers with known demands takes care of. Therefore, the objective of this paper is to develop a procedure to solve the MDVRP and to implement it in a free Geographic Information System (GIS).

1. INTRODUÇÃO

O transporte é uma área chave de decisão dentro da logística de uma empresa e absorve, em média, a porcentagem mais elevada de custos do que as demais atividades logísticas (BALLOU, 2001). Visando a redução destes custos, as empresas procuram ser cada vez mais competitivas no mercado, através de soluções de apoio às atividades logísticas, como por exemplo, a roteirização de veículos.

O problema de roteirização de veículos (PRV) tem sido extensivamente estudado por causa da sua abrangente aplicabilidade em muitas situações reais. Neste problema, considera-se uma empresa que possui um único depósito e capacidade ilimitada, uma frota de veículos com capacidade homogênea (iguais) e um conjunto de clientes com as informações de demanda e localização. Geralmente a demanda total dos clientes excede a capacidade de um veículo, assim utiliza-se mais de um veículo para distribuir os produtos do depósito para todos os clientes. Cada veículo é designado para uma rota e um cliente é atendido por um veículo em uma única rota. Cada rota inicia e termina no depósito. Assim, os responsáveis pelas tomadas de decisões da empresa precisam determinar quais clientes serão atendidos por quais veículos ou rotas (problema de roteirização). Também é necessário considerar a seqüência de atendimento dos clientes em cada rota (problema de programação).

O objetivo do PRV é determinar a menor distância total ou o tempo gasto para atender todos os clientes. Um tempo de entrega menor resulta em um nível mais elevado da satisfação do cliente. Adicionalmente, o objetivo também pode ser a redução do número de veículos necessários. Poucos veículos implicam na redução da frota e conseqüentemente no custo total da operação. Assim, pode se concluir que o objetivo final do PRV é aumentar a eficiência da entrega e reduzir os custos da empresa (HO *et al.*, 2007).

Muitas aplicações do PRV têm sido utilizadas, entretanto todas são baseadas em um depósito. Embora este problema possua maior atração entre os pesquisadores da área, ele não é apropriado resolver o problema de roteirização de empresas que possuem mais de um depósito. Nestes casos, torna-se necessária a solução do problema de roteirização de veículos com múltiplos depósitos (PRVMD). Neste problema, os tomadores de decisão também precisam determinar quais clientes serão atendidos por quais depósitos. Para isto, faz-se necessária a atribuição dos clientes aos depósitos visando à otimização do custo global. Nota-se então que o PRVMD fornece apoio à tomada de três decisões, conforme ilustra a figura 1.

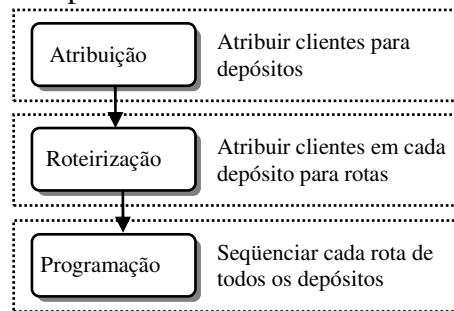


Figura 1: Sequência de tomadas de decisão no PRVMD

Sendo assim, o objetivo do PRVMD consiste em atribuir os clientes aos depósitos e formar subproblemas do PRV, os quais são solucionados individualmente. Para melhor compreensão deste problema, um exemplo prático com dois depósitos e 12 clientes é ilustrado na figura 2.

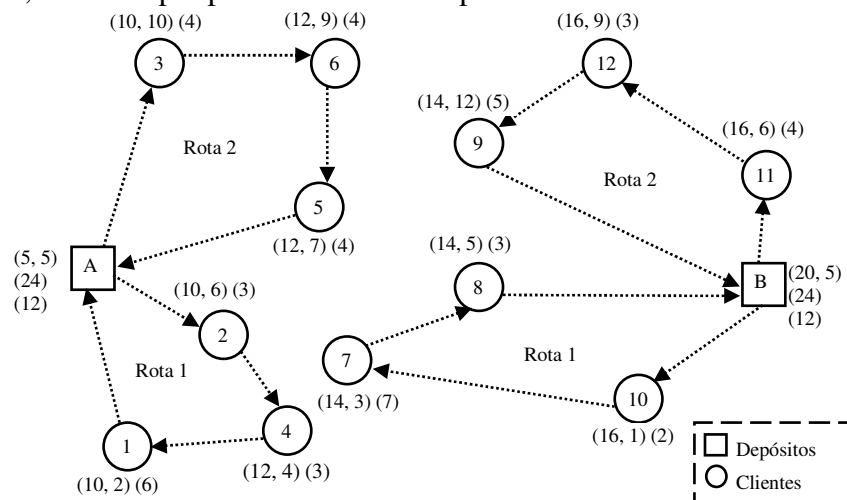


Figura 2: Um exemplo do PRVMD

Os valores entre parênteses ao lado dos depósitos, acima ou abaixo dos clientes representam as coordenadas. Os segundos valores entre parênteses acima ou abaixo dos clientes indicam a demanda dos clientes. Cada depósito possui uma capacidade limitada de armazenamento e vários veículos com capacidade homogênea (iguais) e limitada. Neste exemplo, cada depósito possui capacidade de 24 unidades e cada veículo pode transportar até 12 unidades por a rota, que é mostrada nos segundos valores entre parênteses ao lado dos depósitos.

Observa-se que o depósito A está utilizando 24 unidades para atender seus clientes através de duas rotas. Cada rota está associada a um veículo, o qual está atendendo a demanda total de 12 unidades. Nota-se que, apesar do cliente 7 estar mais próximo do depósito A, este teve que ser atendido pelo depósito B, pois o depósito A não possui capacidade para atendê-lo.

Sob a ótica computacional, tanto o PRV quanto o PRVMD são do tipo NP-Completo, ou seja, à medida que o problema aumenta o esforço computacional para resolvê-lo cresce de maneira exponencial. Isto significa que não é possível obter uma solução por meio de métodos exatos como, por exemplo, programação linear inteira, em tempo de processamento aceitável, para problemas reais que envolvem vários depósitos e muitos clientes.

Sendo assim, faz-se necessário o uso de técnicas inteligentes conhecidas como heurísticas e metaheurísticas. Devido à complexidade adicional que o PRVMD possui, uma aproximação razoável deve dividir o problema em vários subproblemas de roteirização e programação atribuindo inicialmente os clientes para cada depósito e resolvendo estes subproblemas individualmente (RENAUD *et al.*, 1996).

Quanto aos sistemas para solução de problemas de roteirização de veículos, um dos que mais se destacam na Tecnologia da Informação é o Sistema de Informações Geográficas (SIG), que fornece suporte à tomada de decisão nas diversas áreas de planejamento e operação. Sua principal vantagem é a possibilidade de incorporar a posição geográfica aos objetos do mundo real. O desenvolvimento de soluções neste tipo de sistema fornece, por exemplo, a distância real entre os depósitos e clientes, o sentido das vias a partir de uma malha viária e o itinerário de cada veículo.

A maioria dos SIGs disponíveis no mercado são proprietários, ou seja, são desenvolvidos e comercializados por empresas do setor privado. Por ser um sistema especialista, o custo para sua aquisição geralmente é bem elevado. Uma desvantagem dos SIGs proprietários é a sua baixa flexibilidade para inclusão de novas ferramentas, pois geralmente é imposto ao desenvolvedor o uso de uma linguagem de programação própria. Seus algoritmos funcionam apenas como caixas pretas, impossibilitando o melhoramento computacional.

Uma alternativa para resolver estes problemas é o uso de software livre, pois não possui custos de aquisição, possui alta flexibilidade para o desenvolvimento de novas ferramentas devido à utilização de linguagens de programação reconhecidas mundialmente como Java e seus algoritmos podem ser modificados e melhorados a partir do próprio código fonte. É considerada como a opção mais recomendada para produção de pesquisas acadêmicas, pois possibilita a continuidade e aprimoramento das funcionalidades que são desenvolvidas.

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um procedimento para solucionar o Problema de Roteirização de Veículos com Múltiplos Depósitos (PRVMD) e implementar em um Sistema de Informação Geográfica (SIG) livre.

2. MÉTODOS DE SOLUÇÃO DO PRVMD

Os métodos para solução do PRVMD são classificados de acordo com o número de estágios necessários para sua solução. Cada estágio consiste na solução independente de um problema complexo. No primeiro estágio a decisão de atribuir os clientes aos depósitos é solucionada pelo problema de atribuição (PA). No segundo estágio, as decisões de atribuir os clientes de as diversas rotas e de seqüenciá-los para entrega são solucionadas pelo problema de roteirização de veículos (PRV). O primeiro método para solução do PRVMD possui um estágio e consiste na solução do PA e do PRV simultaneamente. O segundo método possui dois estágios e consiste na solução do PA e do PRV separadamente, ou seja, inicialmente faz-se a atribuição dos clientes aos depósitos e soluciona os subproblemas um a um pelo PRV.

Tabela 1: Métodos de solução do PRVMD

Autor (ano)	Método de solução do PA	Método de solução do PRV	Tamanho
TILLMAN (1969)	Heurística – Paralela	heurística construtiva - economias (Clarke and Wright)	d = # c = #
WREN e HOLLIDAY (1972)	Heurística – Paralela	heurística construtiva - agrupa-roteiriza	d = 2 c = 176
GILLET e MILLER (1974)	Heurística – Paralela	heurística construtiva - agrupa-roteiriza	d = 2 a 5 c = 249
GOLDEN <i>et al.</i> (1977)	Heurística – Varredura	heurística construtiva - economias (Clarke and Wright modific.)	d = 4 c = 100
LAPORTE (1984)	método exato (problema simétrico) <i>branch and bound</i>		d = 2, c=50
LAPORTE (1988)	método exato (problema assimétrico) <i>branch and bound</i>		d = 3, c=80
CHAO <i>et al.</i> (1993)	Heurística – Varredura	heurística construtiva - economias (Clarke and Wright modific.)	d = 9 c = 360
RENAUD <i>et al.</i> (1996)	Heurística Improved Petal	Metaheurística - busca tabu	d=9, c=360
NAGY e SALHI (2004)	Heurística <i>borderline customers</i> (SALHI e SARI, 1997)	heurística construtiva - múltiplas rotas gigantes (SALHI <i>et al.</i>)	d = 5, c=50 a 249
LIM e WANG (2005)	Heurística <i>borderline customers</i> (SALHI e SARI, 1997)	Metaheurística - busca tabu	d = # c = 200
BONASSER (2005)	Heurística – Paralela	metaheurística híbrida - busca tabu e colônia de formigas (AnTS)	d = 7 c = 182
CHAN e BAKER (2005)	Heurística - floresta geradora mínima	heurística construtiva - economias (Clarke and Wright)	d = 12 c = 181
CREVIER <i>et al.</i> (2007)	Método exato - <i>branch and bound</i>	Metaheurística - busca tabu	d=7, c=288
HO <i>et al.</i> (2007)	Heurística Paralela	metaheurística híbrida - algoritmo genético	d = 2, c=50 a 100

Foram encontradas na literatura diversas soluções para resolver o PRVMD, dentre as quais, duas utilizam o método de um estágio e 12 utilizam o método de dois estágios. Entre as soluções pelo método de um estágio, aquela que solucionou os maiores problemas foi proposta por LAPORTE *et al.* (1988), que utilizando o método exato de *branch and bound*, reportou resultados para o problema assimétrico com até 3 depósitos e 80 clientes.

Já entre as soluções pelo método de dois estágios, aquela que solucionou o maior problema encontrado na literatura foi proposta por CHAN e BAKER (2005), que aplicaram a heurística de floresta geradora mínima para solução do primeiro estágio e o método das economias de Clarke and Wright no segundo estágio. Os autores reportaram resultados para o problema com até 12 depósitos e 181 clientes.

3 METODOLOGIA PROPOSTA

3.1 Formulação Matemática

O PRVMD é classificado como NP-Completo, limitando com isso o uso de métodos exatos para a solução do problema de maneira viável. Entretanto, mesmo com estas limitações, é reconhecida a importância de desenvolver uma formulação matemática destes problemas, tanto para avaliar os resultados de métodos aproximados em instâncias pequenas, como para se obter limites inferiores de qualidade para o valor ótimo (valor ou função objetivo associado à solução ótima). Desta forma, propõe-se nesta seção uma formulação matemática do PRVMD, modelando-o como um problema de programação inteira com restrições lineares e não lineares. Assim, temos as seguintes constantes e variáveis empregadas neste modelo:

$$\begin{aligned}
V &= \{1, K, n\} && \text{nós} \\
A &= \left\{ \begin{array}{c} (1,2), (1,3), K, (1,n) \\ (2,1), (2,3), K, (2,n) \\ M \\ (n,1), (n,2), K, (n,n-1) \end{array} \right\} && \text{todos arcos para cada par de nós} \\
I &= \{1, K, v\} && \text{veículos} \\
J &= \{1, K, d\} && \text{depósitos} \\
U &\subset V && \text{sub - conjunto próprio de nós } \ni 2 \leq |U| \leq |V| - 2
\end{aligned}$$

Parâmetros:

$$\begin{aligned}
RL_i &= \text{tamanho máximo da rota para o veículo } i \\
CAP_i &= \text{capacidade máxima do veículo } i \\
MAX_j &= \text{demanda máxima que pode ser atendida pelo depósito } j \\
dist_{k,l} &= \text{distância do arco } (k,l) \\
dem_k &= \text{demanda do cliente localizado no nó } k
\end{aligned}$$

Variáveis de Decisão

$$\begin{aligned}
x_{ij} &= \begin{cases} 1 & \text{se o veículo } i \text{ é atribuído ao depósito } j \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \\
x_{ijkl} &= \begin{cases} 1 & \text{se o veículo } i \text{ é atribuído ao depósito } j \text{ passando pelo arco } (k,l) \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}
\end{aligned}$$

$$PRVMD) \text{ Minimizar } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{(k,l) \in A} c_{ijkl} x_{ijkl} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i \in I} \sum_{k:(k,l) \in A} dem_k x_{ijkl} \leq MAX_j \quad \forall j \in J \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} \leq 1 \quad \forall i \in I \quad (3)$$

$$x_{ijkl} \leq x_{ij} \quad \forall i \in I, j \in J, (k,l) \in A \quad (4)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k:(k,l) \in A} x_{ijkl} = 1 \quad \forall l \in V \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l:(k,l) \in A} x_{ijkl} = 1 \quad \forall k \in V \quad (6)$$

$$\sum_{(k,l) \in A} x_{ijkl} - \sum_{(l,m) \in A} x_{ijlm} = 0 \quad \forall i \in I, j \in J, l \in V \quad (7)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{\substack{(k,l) \in A: \\ k \in U, l \in V \setminus U}} x_{ijkl} \geq 1 \quad (8)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{(k,l) \in A} dist_{kl} x_{ijkl} \leq RL_i \quad \forall i \in I \quad (9)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k:(k,l) \in A} dem_k x_{ijkl} \leq CAP_i \quad \forall i \in I \quad (10)$$

Onde (2) representa a restrição de capacidade do depósito e (3) representa a posição do veículos. Já as restrições para viagem ao longo dos arcos, (4) indica que deve usar um veículo encontrado, (5) e (6) restringem, respectivamente, que apenas um veículo chega e sai de um cliente, (7) obriga que o veículo que chega deve ser igual ao veículo que sai e (8) restringe o limite da sub-rotas. Já a restrição (9) limita o tamanho da rota e finalmente a restrição (10) restringe que a demanda total atendida numa rota não pode exceder a capacidade do veículo.

3.2 Métodos Heurísticos Utilizados

O procedimento proposto para solução do PRVMD baseia-se no método de dois estágios. Apesar deste método não fornecer uma solução ótima, ao não considerar os dois estágios simultaneamente, optou-se pela sua vantagem no que se refere à capacidade de solucionar problemas de grande porte com tempo computacional reduzido.

Escolheu-se para o primeiro estágio, a heurística de Atribuição Paralela (GIOSA, 2002) para a atribuição dos clientes aos depósitos. Optou-se por este algoritmo devido ao seu bom desempenho computacional e à sua simplicidade de implementação.

Para o segundo estágio, escolheu-se a heurística construtiva das economias de CLARKE AND WRIGHT (1964) para a roteirização e a programação dos veículos de cada conjunto de clientes atribuídos ao seu depósito. Escolheu-se esta heurística, pois ela fornece bons resultados em tempo computacional reduzido. Segundo BALLOU (1993), a utilização desse algoritmo pode resultar em soluções próximas a 2% em relação à solução ótima. Este método também pode ser considerado como o mais flexível dentre os existentes, pois permite incorporar diversos tipos de restrições que se adaptem às características de uma empresa.

3.2.1 Heurística de Atribuição Paralela

A heurística de atribuição paralela é assim chamada por calcular a prioridade para cada cliente considerando todos os depósitos ao mesmo tempo. Esta heurística compara o custo de atribuir um cliente a seu depósito mais próximo com o custo de atribuir o cliente a outro depósito, conforme ilustra a figura 3.

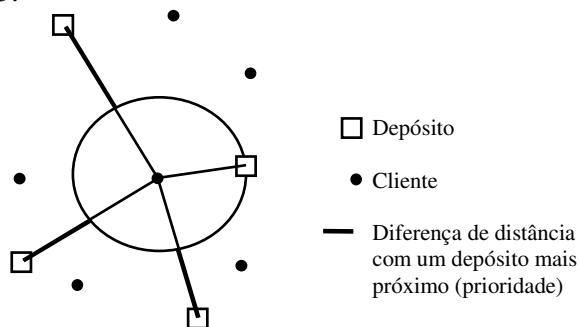


Figura 3: Atribuição de um cliente ao depósito pelas atribuições: paralela e simplificada

Esta heurística possui o seguinte funcionamento: cada usuário pertence a somente um dos seguintes conjuntos: *A*, Se um cliente foi atribuído para um depósito, *NA*, se o cliente ainda não foi atribuído para um depósito. Cada depósito pertence apenas a um dos seguintes conjuntos: *DS*, se a demanda do depósito já foi satisfeita e *DNS*, se a demanda do depósito ainda não foi satisfeita. Uma atribuição de um cliente para um depósito é possível apenas se: a) o depósito pertence ao conjunto *DNS*, b) o cliente pertence ao conjunto *NA*. Os passos são: 1. Calcula-se então a urgência u de cada cliente pela expressão (11).

$$u_c = \sum_{c \in D} (d(c, D) - (d^*(c, D^*))) \quad (11)$$

2. Cria-se uma lista de clientes NA ordenada em ordem decrescente pelo valor da urgência u .
3. A atribuição inicia a partir do cliente c com a maior urgência u .
4. Atribui o cliente c ao depósito d mais próximo e que esteja contido no conjunto DNS .
- 4.1 Remove o cliente c de NA e adiciona em A .
- 4.2 Atualiza a demanda atendida pelo depósito d . Se a demanda for igual à sua capacidade, então remove o depósito d de DNS e o adiciona em DS .
5. A heurística termina quando todos os clientes forem atendidos.

3.2.2 Heurística de Clarke and Wright

A heurística de Clarke and Wright se baseia na noção de economias, que pode ser definida como o custo da combinação, ou união, de duas sub-rotas existentes. Inicialmente, cada cliente é servido por um veículo, constituindo rotas entre o depósito e cada cliente.

Seja c_{ij} o custo de viagem partindo de um cliente i a um cliente j , podendo ser dado em distância ou tempo do caminho. Duas rotas que contêm os clientes i e j podem ser combinadas, desde que i e j estejam ou na primeira ou na última posição de suas respectivas rotas e que a demanda total das rotas combinadas não ultrapasse a capacidade do veículo e/ou o tempo total da jornada de trabalho. Em cada iteração, analisam-se todas as combinações de rotas através da fórmula $s_{ij} = c_{i0} + c_{0j} - c_{ij}$, onde 0 representa o depósito. As duas rotas que renderem a maior economia de combinação são unidas, conforme ilustra a figura 4.

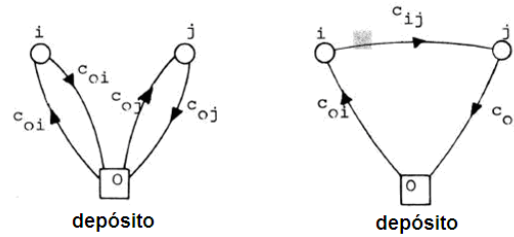


Figura 4: União de rotas pelo algoritmo de Clarke and Wright

O algoritmo de Clarke and Wright é detalhado a seguir:

1. Calcular os ganhos S_{ij} para todos os pares ij ($i, j, i \neq 0, j \neq 0$).
2. Ordenar os pares ij na ordem decrescente dos valores do ganho S_{ij} .
3. Começar pelo par ij com maior ganho S_{ij} e proceder na sequência obtida em 2.
4. Para um par de nós ij , correspondente ao k -ésimo elemento da sequência 2 verificar se i e j estão ou não incluídos num roteiro já existente:
 - 4.1. Se i e j não estão incluídos em nenhum dos roteiros já abertos, então criar um novo roteiro com os nós i e j .
 - 4.2. Se exatamente um dos pontos i ou j já pertence a um roteiro pré-estabelecido, verificar se esse ponto é o primeiro ou o último do roteiro (adjacente ao nó 0 , depósito). Se isso ocorrer, acrescentar o arco ij a esse roteiro. Caso contrário, passar à etapa seguinte, saltando o par ij .
 - 4.3. Se ambos os nós já pertencem a dois roteiros pré-estabelecidos (roteiros diferentes), verificar se ambos são extremos dos respectivos roteiros (adjacentes ao nó 0). Nesse caso fundir os dois roteiros num só. Caso contrário, passar para a etapa seguinte, pulando o par ij .
 - 4.4. Se ambos os nós i e j pertencem a um mesmo roteiro, pular para a etapa seguinte.
5. Continuar o processo até que o total de clientes da lista de ganhos tenha sido exaurido. Se sobrar algum ponto não incluído em nenhum roteiro, deverão ser formados roteiros individualizados, ligando o depósito a cada ponto e retornando à base.

3.3 Metodologia Proposta

A metodologia divide a elaboração do problema em cinco etapas básicas, logicamente interligadas, com as atividades e dados necessários para execução de cada uma delas. Estas etapas correspondem ao primeiro nível de informações. Cada uma destas etapas é detalhada utilizando um segundo nível de aplicação, conforme a tabela 2.

Tabela 2: Etapas da Metodologia

	1º NÍVEL	2º NÍVEL
1ª ETAPA	Entrada de dados	<ol style="list-style-type: none">1. Criação ou importação da malha viária2. Cadastro dos clientes3. Cadastro dos depósitos4. Cadastro de informações veículos
2ª ETAPA	Criação da matriz de distâncias	<ol style="list-style-type: none">1. Leitura da malha viária2. Criação de um grafo com a malha viária3. Criação da matriz de distâncias utilizando o algoritmo de caminho mínimo de Dijkstra
3ª ETAPA	Atribuição dos clientes aos depósitos	<ol style="list-style-type: none">1. Verificação da capacidade dos depósitos e da demanda dos clientes2. Atribuição dos clientes aos depósitos utilizando o algoritmo de atribuição com urgências paralela
4ª ETAPA	Roteirização e programação	<ol style="list-style-type: none">1. Roteirização e programação dos veículos de cada depósito utilizando o algoritmo de Clarke and Wright2. Aplicação da pós-otimização utilizando o algoritmo 2-OPT
5ª ETAPA	Emissão de relatórios	<ol style="list-style-type: none">1. Geração das rotas graficamente no SIG2. Geração dos itinerários para cada veículo

A primeira etapa trata a obtenção dos dados da malha viária, dos depósitos, dos clientes e dos veículos. Estes dados podem ser informados a partir da criação ou importação de camadas (layers) no SIG. A camada da malha viária é representada por linhas e as camadas de clientes e depósitos por pontos. As informações dos veículos com a capacidade de carga, velocidade média, custo médio por quilômetro percorrido, tempo de descarga médio e tempo máximo da jornada de trabalho são informadas a partir da digitação manual.

A segunda etapa trata a geração da matriz de distâncias. Para isto, podem ser utilizadas a distância euclidiana corrigida por um coeficiente de ajuste para vias ou a distância real obtida por um caminho mínimo sob a malha viária. Para obtenção do caminho mínimo cria-se um grafo do tipo misto, ponderado e conexo a partir da malha viária. A partir da localização dos depósitos e dos clientes, cria-se uma matriz de distâncias mínimas para cada origem e destino utilizando o algoritmo de caminho mínimo de DIJKSTRA (1959).

A terceira etapa trata a atribuição dos clientes aos depósitos. Verifica-se primeiro se a capacidade dos depósitos é suficiente para atender a demanda dos clientes. Caso não seja suficiente, faz-se necessária a alteração da capacidade de algum depósito ou a remoção de algum cliente até que a capacidade seja maior ou igual à demanda. Logo após, atribui-se os clientes aos depósitos utilizando o algoritmo de atribuição paralela.

A quarta etapa trata a roteirização e programação dos veículos. Para cada subproblema gerado pelo algoritmo de atribuição, faz-se a roteirização e programação dos veículos de cada

depósito utilizando o algoritmo de Clarke and Wright. Em seguida, na fase de pós-otimização, aplica-se o algoritmo de melhora iterativa 2-OPT (CROES, 1958).

A quinta etapa trata a emissão de relatórios. Gera-se uma nova camada para visualização gráfica no SIG de todas as rotas. Em cada rota são inseridas as informações sobre o itinerário do veículo, a distância total percorrida, o tempo total, o custo total da rota e a demanda total atendida pelo veículo.

4 PROTÓTIPO DESENVOLVIDO

Para solução do problema tratado, desenvolveu-se uma ferramenta computacional baseada na metodologia proposta e utilizando a linguagem de programação Java dentro do paradigma de orientação a objetos. Esta ferramenta foi concebida como um plugin do SIG livre OpenJUMP. Modelou-se o sistema a partir dos diagramas da UML de caso de uso, atividades e de classes. O sistema também foi internacionalizado e traduzido para os idiomas: inglês, espanhol, francês, italiano, japonês, além do próprio português, com objetivo de ampliar sua divulgação em toda comunidade de software livre.

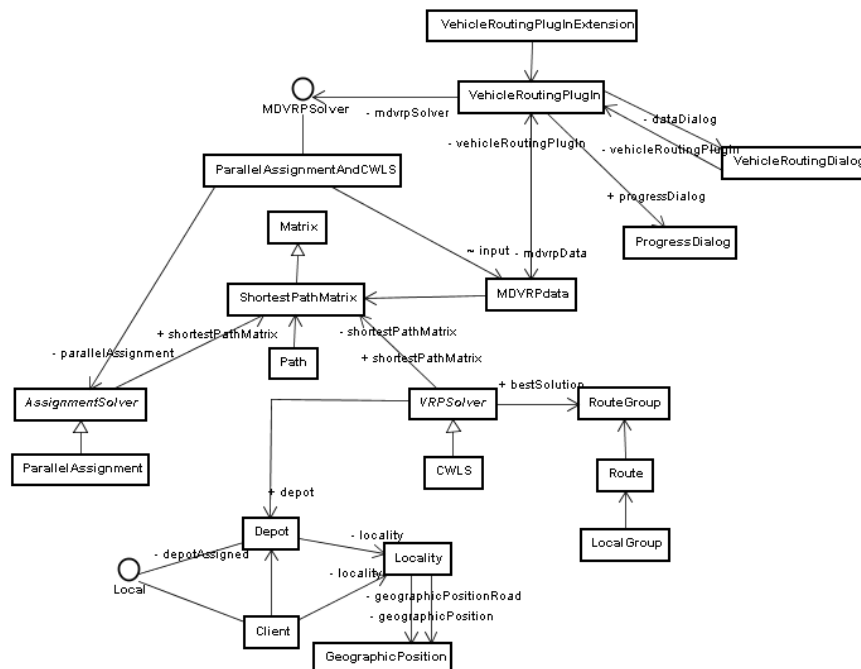


Figura 5: Diagrama de classes simplificado

5 ESTUDO DE CASO

Realizou-se o presente estudo de caso com uma conceituada empresa italiana de produtos alimentícios, a Parmalat. Este estudo contemplou as unidades da empresa na subsidiária brasileira, a qual possui as seguintes características físicas e operacionais:

- **Múltiplos depósitos:** possui 13 fábricas, 12 centros de distribuição próprios e 1 cross docking (centro de distribuição sem armazenagem), totalizando 26 depósitos de acordo com a denominação utilizada neste trabalho;
- **Frota homogênea e com restrição de capacidade:** sua frota própria é constituída por veículos de grande porte (carretas com capacidade de 26 mil quilos cada);
- **Grande quantidade de clientes:** são 400 os clientes a serem atendidos.

A área de estudo foi o território brasileiro. A base geográfica da malha viária foi obtida junto ao Instituto Militar de Engenharia, esta, porém encontra-se em fase final de atualização e existem trechos não conectados. Ela é constituída por rodovias federais, estaduais e municipais, totalizando 6.756 trechos.

As bases de clientes e depósitos foram importadas através do SIG. As informações contidas na base de clientes são: descrição, endereço e demanda. Já na base de depósitos são: descrição, endereço e capacidade. A partir do atributo endereço, georreferenciou-se cada cliente em sua localização real. Assim, cada cliente é representado por um ponto. Para obter as rotas de cada veículo o usuário deve clicar no botão gerar rotas (figura 6).



Figura 6: Tela do protótipo de desenvolvido e detalhamento de duas rotas

Ao término da execução é apresentado o custo total da solução encontrada, ou seja, a soma do custo de todas as rotas encontradas (figura 7).

Atributos: Rota (2)									
Rota (2) (147 Feições)									
FID	Rota	Deposito	Veiculo	Distancia	Tempo	Demanda	Custo	Caminho	
7761	Rota 1	BEBIDAS JUNDIAÍ	Veiculo 1	2349.82	32.37	0.0	7049.45	BEBIDAS JUNDIAÍ -> VINHEDO -> INDAIATUBA -> ...	
7762	Rota 2	BEBIDAS JUNDIAÍ	Veiculo 2	362.66	8.53	0.0	1087.98	BEBIDAS JUNDIAÍ -> CABREUVA -> ITU -> SORO...	
7763	Rota 3	MALIBU	Veiculo 1	2455.7	34.7	0.0	7367.1	MALIBU -> ITATIBA -> BRAGANCA PAULISTA -> J...	
7764	Rota 4	MALIBU	Veiculo 2	325.45	7.57	0.0	976.36	MALIBU -> VALINHOS -> PAULINIA -> COSMOPO...	
7765	Rota 5	MALIBU	Veiculo 3	439.51	10.99	0.0	1318.54	MALIBU -> CAMPINAS -> HORTOLANDIA -> SUM...	
7766	Rota 6	MALIBU	Veiculo 4	485.29	10.07	0.0	1455.88	MALIBU -> ATIBAIA -> JACAREI -> SAO JOSE DO...	
7767	Rota 7	ITAPERUNA	Veiculo 1	2366.64	31.58	0.0	7099.92	ITAPERUNA -> ITAPERUNA -> CAMPOS DOS GOY...	
7768	Rota 8	BARRA MANSA	Veiculo 1	2275.45	31.94	0.0	6826.34	BARRA MANSA -> BARRA MANSA -> RIO CLARO -> ...	
7769	Rota 9	BARRA MANSA	Veiculo 2	350.58	5.88	0.0	1051.73	BARRA MANSA -> VOLTA REDONDA -> VALENCA ...	
7770	Rota 10	BARRA MANSA	Veiculo 3	447.0	8.59	0.0	1340.99	BARRA MANSA -> RESENDE -> ITAMONTE -> SA...	
7771	Rota 11	FRUTAL	Veiculo 1	1961.69	27.02	0.0	5885.06	FRUTAL -> FRUTAL -> OLIMPIA -> ITAPOLIS -> I...	
7772	Rota 12	FRUTAL	Veiculo 2	400.99	7.51	0.0	1202.98	FRUTAL -> PLANURA -> BARRETOS -> PITANGUE...	
7773	Rota 13	FRUTAL	Veiculo 3	505.27	7.32	0.0	1515.8	FRUTAL -> ARAGUARI -> CATALAO -> FRUTAL	

Figura 7: Atributos da camada de rotas

Para facilitar a visualização das rotas, foram atribuídas diferentes cores para cada uma, conforme ilustra a figura 8. Observa-se na figura 8 (a) que nem todos os caminhos utilizaram a malha viária. Isto ocorre, pois a malha viária utilizada não é conexa, ou seja, existem alguns trechos de rodovia que não estão interligados aos outros. Nestes casos em que não é possível obter um caminho entre a origem e o destino, o protótipo utilizou a distância euclidiana.

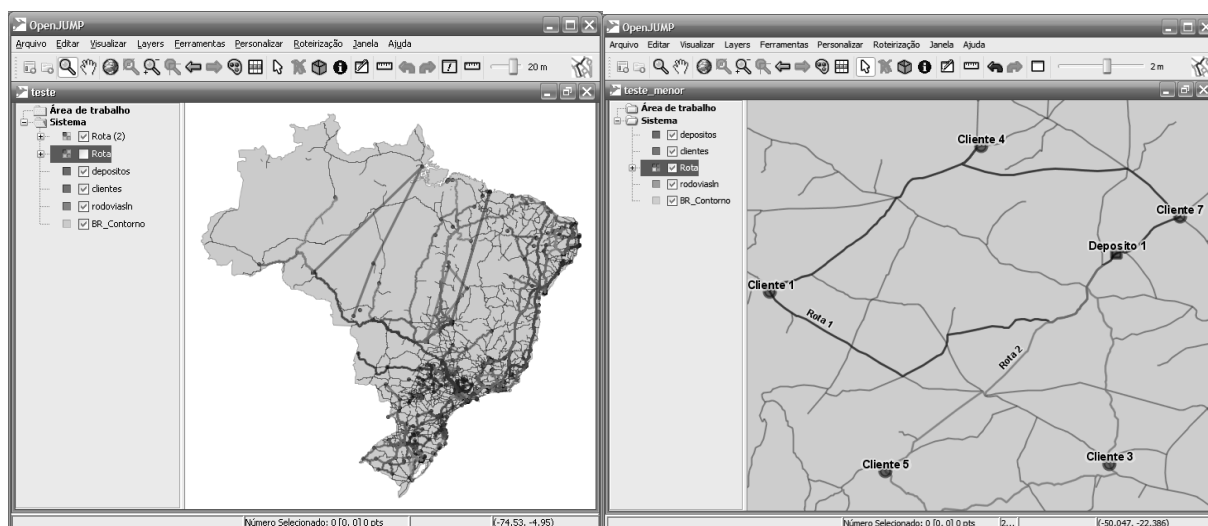


Figura 8: Rotas obtidas para todos os depósitos (a) e duas rotas de um depósito em detalhe(b)

Visando a validação dos resultados obtidos com o auxílio do protótipo desenvolvido, realizou-se o mesmo procedimento utilizando o software TransCAD e as mesmas informações fornecidas pela empresa. A tabela 3 apresenta as o número os valores totais obtidos através dos dois sistemas. Observa-se que a solução obtida pelo protótipo desenvolvido apresentou uma economia de aproximadamente 5% na distância total e conseqüentemente no custo total da solução obtida em comparação com o TransCAD.

Tabela 3: Comparação das rotas obtidas pelo protótipo desenvolvido e pelo TransCAD

Protótipo desenvolvido				TransCAD			
Veículos (unidade)	Distância (km)	Tempo (h)	Custo (R\$)	Veículos (unidade)	Distância (km)	Tempo (h)	Custo (R\$)
101	180.571,89	2.459,62	541.715,58	101	189.743,88	2.574,27	569.231,64

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi desenvolvido um procedimento para roteirização de veículos com múltiplos depósitos que utiliza uma Tecnologia de Informação (SIG) em um sistema de distribuição física. Ele foi elaborado para contemplar, restrições de carga e volume dos veículos e depósitos, de limite de jornada de trabalho, tempo de descarga no cliente, assim como restrições do sistema viário, essa obtida com a utilização do SIG.

Para tanto, foi necessário um estudo dos principais métodos existentes de solução do PRVMD. Devido à complexibilidade operacional de resolver problemas de grande porte, com vários depósitos, optou-se por utilizar um método de dois estágios com algoritmos heurísticos. No primeiro estágio, utilizou-se a heurística de atribuição com urgências paralela, no segundo estágio utilizou-se a heurística de Clarke and Wright com uma etapa de pós-otimização com o algoritmo 2-OPT. Estes se mostraram bastante eficientes e de fácil desenvolvimento.

Viabilizando uma aplicação prática, desenvolveu-se um protótipo que demonstrou a integração do SIG OpenJUMP com o procedimento de roteirização, o qual foi concebido como um plugin. Conseqüentemente, o principal benefício obtido ao utilizar o OpenJUMP é a ausência de taxas de licença de instalação e de uso, pois trata-se de um sistema livre e de código aberto.

A realização de um estudo de caso possibilitou a aplicação do procedimento proposto e validação do protótipo de software desenvolvido, o qual permitiu obter rapidamente uma solução e fornecer uma série de benefícios como redução da distância percorrida, menor consumo de combustível, menor número de horas extras e redução do tempo de entrega do produto. Validou-se o protótipo desenvolvido através da comparação dos resultados com um software comercial a qual demonstrou que o protótipo fornece boas soluções.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALLOU, Ronald H. Logística empresarial: transporte, administração de materiais e distribuição física. São Paulo: Atlas, 1993. ISBN 8522408742.
- BALLOU, Ronald H. Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: Planejamento, Organização e Logística Empresarial. São Paulo: Bookman, 2001, ISBN 8573078510.
- BONASSER, U.O. Meta-heurísticas híbridas para solução do problema de roteirização de veículos com múltiplos depósitos e frota heterogênea fixa: aplicação na força aérea brasileira. 2005. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- CHAN, Yupo, BAKER, S.F. The Multiple Depot, Multiple Traveling Salesmen Facility-Location Problem: Vehicle Range, Service Frequency, and Heuristic Implementations. *Mathematical and Computer Modeling*, v. 41, p. 1035-1053, 2005.
- CHAO, I. M., GOLDEN, B.L., WASIL, E. A new heuristic for the multi-depot vehicle routing problem that improves upon best-known solutions. *American Journal of Mathematical and Management Mgmt Sciences*, v. 13, p. 371-406, 1993.
- CLARKE, G., WRIGHT, J.W. Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. *Operations Research*, 1964.
- CREVIER, B., CORDEAU, J.F., LAPORTE, G. The Multi-Depot Vehicle Routing Problem with Inter-Depot Routes, *European Journal of Operational Research*, v. 176, p. 756-773, 2007.
- CROES, G.A. A method for solving traveling salesman problems. *Op.Res.* 6, pp., 791-812, 1958.
- DIJKSTRA, E. W. A Note on Two Problems in Connection with Graphs. *Numerische Math.* 1, 269-271, 1959.
- GILLET, B. E., MILLER, L. E. A heuristic algorithm for the vehicle-dispatch problem, *Operations Research*, v. 22, p. 340-349, 1974.
- GIOSA, D., TANSINI, L., VIERA, O. New assignment algorithms for the multi-depot vehicle routing problem, *Journal of the Operations Research Society*, v. 53, p. 997-984, 2002.
- GOLDEN, B.L., MAGNANTI, T. L., NGUYEN, H. Q. Implementing vehicle routing algorithms, *Networks*, v. 7, p. 113-148, 1977.
- HO, William, HO, George T.S, JI, Ping, LAW, Henry C.W. A Hybrid Genetic Algorithm for the Multi-depot Vehicle Routing Problem. *Engineering App. of Artificial Intelligence*, 2007.
- LAPORTE, Gilbert, NORBERT, Y., ARPIN, D. Optimal solutions to capacitated multidepot vehicle routing problems. *Congressus Numerantiwn.* v. 44, p. 283-292, 1984.
- LAPORTE, Gilbert, NORBERT, Y., TAILLEFER, S. Solving a family of multi-depot vehicle routing and location-routing problems, *Transp. Science*, v. 22, 161-172, 1988.
- LIM, Andrew, WANG, Fan. Multi-Depot Vehicle Routing Problem: A One-Stage Approach, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, v. 2, n. 4, p. 397-402, 2005.
- NAGY, G., SALHI, S.. Heuristic algorithms for single and multiple depot vehicle routing problems with pickups and deliveries, *European Journal Op. Res.*, v. 162, p. 126-141, 2004.
- RENAUD, Jacques., LAPORTE, Gilbert., BOCTOR, Faye F. A Tabu Search Heuristic for the Multi-depot Vehicle Routing Problem, *Computer Op. Res.*, v. 23, p. 229-235, 1996.
- TILLMAN, F. A. The multiple terminal delivery problem with probabilistic demands, *Transportation Science.* v. 3, p. 192-204, 1969.
- WREN, A. HOLLIDAY, A. Computer scheduling of vehicles from one or more depots to a number of delivery points. *Operations Research*, v. 23, p. 333-344, 1972.

Orivalde Soares da Silva Júnior (orivalde@yahoo.com.br)

Luiz Antônio Silveira Lopes (laslopes@ime.eb.br)

Ulf Bergmann (ulf@ime.eb.br)

Mestrado em Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia
Praça General Tibúrcio, 80, Praia Vermelha - Rio de Janeiro, RJ, Brasil