



ISSN 2175-6295 RIO DE JANEIRO- BRASIL, 12 E 13 DE AGOSTO DE 2010

SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA LIVRE COMO FERRAMENTA DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS COM MÚTIPLAS DEPÓSITOS

Orivalde Soares da Silva Júnior

Departamento de Engenharia de Produção - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
Rua Marquês de São Vicente, 225, Gávea - Rio de Janeiro, RJ - Brasil
orivalde@yahoo.com.br

Luiz Antônio Silveira Lopes

Instituto Militar de Engenharia
Praça General Tibúrcio, 80, Rio de Janeiro - RJ - Brasil
slopes@ime.eb.br

Ulf Bergmann

Instituto Militar de Engenharia
Praça General Tibúrcio, 80, Rio de Janeiro - RJ - Brasil
ulf@ime.eb.br

Resumo

O clássico Problema de Roteirização de Veículos (PRV) tem sido muito estudado nas últimas décadas devido à sua aplicação prática como ferramenta de apoio à logística e transportes. Em maior parte, o foco principal dos trabalhos encontrados na literatura é o desenvolvimento de métodos visando a busca de soluções com décimos de melhoria para instâncias consagradas na literatura. Entretanto, o foco principal deste trabalho é aplicação prática de uma variante deste problema através da integração com um Sistema de Informação Geográfica (SIG) livre. A partir de um problema identificado numa empresa do setor alimentício, identificou-se a necessidade de estender o PRV para o PRV com Múltiplos Depósitos (PRVMD) e utilizar técnicas heurísticas para resolver os problemas de grande porte da empresa. O protótipo desenvolvido apresentou melhores resultados que um software comercial consagrado no mercado.

Palavras-Chaves: Roteirização de Veículos; Múltiplos Depósitos; Sistema de Informação Geográfica; Software Livre.

Abstract

The classic Vehicle Routing Problem (VRP) has been extensively studied in recent decades due to its practical application as a tool to support the logistics and transport. In most, the main focus of studies in the literature is the development of methods aimed at finding solutions to tenths of improvement for bodies established in the literature. However, the main focus of this work is practical application of a variant of this problem through integration with a Geographic Information System (GIS) free. From a problem identified in a company of the food sector, we identified the need to extend the VRP to Multi-Depot VRP (MDVRP) and use heuristic techniques to solve large problems of the company. The prototype showed better

results than commercial software out in the market.

Keywords: Vehicle Routing; Multi-Depot; Geographic Information System; Free Software.

1. INTRODUÇÃO

Entre as diversas aplicações incorporadas no setor da Logística pela Tecnologia da Informação uma das que mais se destacam é o Sistema de Informação Geográfica (SIG), que fornece suporte à tomada de decisão para as mais diversas áreas de planejamento e operação. Basicamente, é um sistema de hardware, software, informação espacial e procedimentos computacionais que permite e facilita a análise, gestão ou representação do espaço e dos fenômenos que nele ocorrem.

O primeiro SIG desenvolvido, como se conhece hoje, foi criado na década de 1960, no Canadá, o qual foi chamado de CGIS (Canada Geograph Information System) (BRETERNITZ, 2001). Porém, a grande explosão no uso e desenvolvimento de SIG's se deu a partir de meados dos anos de 1990, quando as novas gerações de microcomputadores aliaram alta capacidade de processamento e armazenamento com baixos custos e, em outra frente, cada vez mais dados sócio-econômicos, ambientais espacialmente identificados (georreferenciados) foram disponibilizados.

Com o advento dos sistemas de navegação veicular, popularmente conhecidos por GPS, iniciou-se uma revolução geográfica ao serem criadas diversas bases de dados para representação do sistema rodoviário nos níveis: federal, estadual e municipal. Aliado à um SIG, estes dados permitem um aumento significativo nos detalhes que uma aplicação prática de roteirização de veículos, pois permitem incorporar algumas informações como o: sentido das vias, a distância real percorrida pelos veículos, a localização exata dos clientes e a visualização gráfica da rotas com imagens de satélite.

Entretanto, 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. SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA LIVRE

Existem vários softwares que auxiliam na realização das tarefas de SIG. Hoje em dia, os softwares mais consagrados mundialmente, em empresas, em universidades e em órgãos públicos, são patenteados e comercializados. Neste caso, os diversos pacotes de programas, em arquivos binários, resultantes da compilação do código fonte, são comercializados para sistemas operacionais específicos.

Porém, há também para este fim algumas alternativas interessantes em software livre, que são desenvolvidas por diversos grupos em todo o mundo. Os softwares livres também são expressivos na sua capacidade desenvolver tarefas de SIG. Segundo KINBERGER & PUNCHER (2005), o uso de softwares livres na área de geoprocessamento está ganhando

cada vez mais espaço em empresas e na administração pública, pois são capazes de substituir, na maioria dos casos, o uso de softwares comerciais.

Por software livre são compreendidos, neste trabalho, os softwares cujos códigos fonte são distribuídos gratuitamente, normalmente licenciados pela GNU General Public License ou pela LGPL (GNU Lesser General Public License).

O uso de softwares livres oferece a vantagem de não haver custos financeiros na compra do software. Isto pode ser vantajoso em certas situações, por exemplo, quando um grande número de cópias deve ser instalado, em várias estações de trabalho. Além disso, o software livre pode oferecer a vantagem de suprir atualizações de software mais facilmente, perante a rápida evolução do hardware. Porém, no que se refere à mão de obra para instalação, treinamento, e manutenção, é atualmente mais difícil encontrar profissionais qualificados em softwares livres do que em softwares patenteados.

No desenvolvimento de softwares específicos para SIG, sejam livres ou proprietários, podem ser percebidas duas correntes claras, também relacionadas à licença para uso. Por um lado, se coloca o desenvolvimento de sistemas completos e complexos, que são capazes de realizar quase todas as funções envolvidas, oferecendo interfaces gráficas amigáveis para os usuários. Esse é o caso dos softwares proprietários. No software livre, o desenvolvimento ocorre de forma diferente. A iniciativa é normalmente financiada por fundos de pesquisa e desenvolvimento, tanto em empresas como em universidades e órgãos públicos, em todo o mundo. Além disso, há também os entusiastas programadores, que contribuem também de maneira decisiva. O desenvolvimento fica assim mais pulverizado, sendo criados softwares normalmente de menor porte, voltados para necessidades mais específicas. CÂMARA & ONSRUD (2004) chegaram a uma conclusão semelhante a esta.

Estes, entre outros fatos e discussões relacionados com o tema, tornam interessante a identificação de um conjunto de softwares livres que, trabalhando de forma integrada, seja capaz de armazenar dados georreferenciados e oferecer ferramentas para gerenciamento, consultas, processamento e visualização de informações alfanuméricas e geométricas, constituindo um SIG. Com este trabalho, é buscado satisfazer esta tarefa, onde possíveis soluções para estações de trabalho (desktops) são analisadas.

Partindo do princípio que a falta de conhecimento em software livre seja pela falta de documentação ou pela maior dificuldade associada é um fator que dificulta a decisão por esta alternativa, os softwares escolhidos neste trabalho deverão ser de uso o mais amigável e intuitivo possível. Isto implica em estarem disponíveis interfaces gráficas para a realização do maior número de tarefas possível, evitando o uso de terminais de linha de comando. Além disso, o grau de desenvolvimento do software e a consistência do sistema montado também são fatores decisivos na escolha. Ao final do trabalho, deve estar caracterizado um SIG completo, constituído exclusivamente de softwares livres.

2.1. SOFTWARES

O processo de busca de softwares pode ser feito com o auxílio de uma ferramenta de busca na internet. Os grupos desenvolvedores de software livre mantêm normalmente páginas na internet onde é possível obter o código fonte dos softwares, pacotes pré-compilados para sistemas operacionais específicos, documentação, entre outros recursos. É grande a quantidade de softwares que pode ser encontrada desta forma. O trabalho de eleição de um software, de acordo com os critérios apresentados, implica na sua instalação e na realização de testes com alguns dados.

Podem ser estabelecidos três grupos principais de softwares, que trabalhando de forma conjunta são capazes de constituir um SIG completo. São eles os softwares específicos para operações de SIG, os softwares para bancos de dados e os softwares de apoio.

Primeiramente, foram buscados softwares específicos para SIG, que englobam funções de leitura e gravação de dados, ferramentas para consultas, visualização e processamento. Foram escolhidos, dentre vários outros softwares analisados, o Quantum GIS (versão 0.8.0 Preview 1, obtida em <http://download.qgis.org>), o GRASS (versão 6.0.1, obtida

em <http://grass.itc.it/download/index.php>) e o OpenJUMP (versão 1.2.0, obtida em <http://sourceforge.net/projects/jump-pilot>).

O Quantum GIS é um SIG com interface gráfica amigável para o usuário, com características que competem principalmente com o software comercial ArcView, da empresa ESRI. É capaz de carregar, utilizando bibliotecas de apoio, uma grande variedade de dados, em formato raster e vetorial, e tem grande capacidade de edição de propriedades visuais de camadas. Possibilita a edição de informações alfanuméricas e geométricas de camadas vetoriais em arquivos e diretamente no banco de dados. Oferece ainda uma ferramenta para a confecção de mapas impressos (layouts).

O GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) é um SIG completo, englobando mais de 350 funções para análise geoespacial, modelagem ambiental, mapas temáticos, integração de banco de dados, processamento de imagens e visualização. Possui também interface gráfica bem desenvolvida para utilização, mas ela não é tão intuitiva como no Quantum GIS. O GRASS é normalmente utilizado para executar operações de SIG mais complexas. De acordo com KINBERGER & PUNCHER (2005), as possibilidades oferecidas pelo GRASS são hoje até mesmo dificilmente alcançadas com o uso de softwares proprietários, onde o suporte de GIS para dados raster e vetorial são combinadas com técnicas de visualização e processamento de imagens.

O projeto OpenJUMP é um SIG com interface gráfica amigável para o usuário e também é capaz de carregar uma grande variedade de dados, em formato raster e vetorial. É um SIG totalmente desenvolvido em Java e possui alta modularidade, facilitando o desenvolvimento de novos plug-ins. Também é possível encontrar diversos plug-ins já desenvolvidos que solucionam problemas das diversas áreas de atuação de um SIG.

2.2. SIG LIVRE ADOTADO

O número de softwares livres que se dispõem a realizar tarefas de SIG é grande. Há muitas possibilidades para a escolha, sendo que, cada uma possui vantagens específicas. Também há vários graus diferentes de desenvolvimento entre elas.

Levando em consideração os requisitos estabelecidos para a escolha dos softwares para constituir um SIG completo, que são a disponibilidade dos códigos fonte, o grau de desenvolvimento, a estabilidade do sistema e a facilidade de uso, escolheu-se o OpenJUMP.

3. O PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS COM MÚLTIPLOS DEPÓSITOS

Apesar de possuírem diversas funcionalidades para análise e processamento geoespacial, conexão com banco de dados, todos os SIGs livre analisados não possuem ferramentas de apoio à tomada de decisões logísticas, como, por exemplo, caminho mínimo e roteirização de veículos. Neste trabalho propõe-se o preenchimento desta lacuna através da integração do SIG OpenJUMP com o procedimento de 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.

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 de cliente. Adicionalmente, o objetivo também 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, não é apropriado para empresas possuam 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.

Sob a ótica computacional, tanto o PRV quanto o PRVMD são do tipo NP-difícil, 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.

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).

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 do mesmo depósito a 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 AP e do VRP 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 (<i>Clarke and Wright</i>)	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 et al. (1977)	Heurística - Varredura	heurística construtiva - economias (<i>Clarke and Wright</i> 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 et al. (1993)	Heurística - Varredura	heurística construtiva - economias (<i>Clarke and Wright</i> modific.)	d = 9 c = 360
RENAUD et al. (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 (<i>SALHI 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 (<i>Clarke and Wright</i>)	d = 12 c = 181
CREVIER et al. (2007)	Método exato - branch and bound	Metaheurística - busca tabu	d=7, c=288
HO et al. (2007)	Heurística Paralela	Metaheurística híbrida - algoritmo	d = 2,

	genético	c=50 a 100
--	----------	------------

Destas 14 encontradas na literatura, duas utilizam o método de um estágio e 12 utilizam o método de duas fases. Entre as soluções do problema 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 com 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 da primeira fase e o método das economias de Clarke and Wright na segunda fase. Os autores reportaram resultados para o problema com até 12 depósitos e 181 clientes.

4. METODOLOGIA PROPOSTA

4.1. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

O PRVMD é classificado como NP-difícil, 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:

V	$= \{1, \dots, n\}$	nós
A	$= \{(1,2), (1,3), \dots, (1,n), (n,1), (n,2), \dots, (n,n-1)\}$	todos arcos para cada par de nós
I	$= \{1, \dots, v\}$	veículos
J	$= \{1, \dots, d\}$	depósitos
U	$\subset V$	sub - conjunto próprio de nós $\exists 2 \leq U \leq V - 2$

Parâmetros:

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

Variáveis de Decisão:

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

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{(k,l) \in A} C_{ijkl} x_{ijkl} \quad (1)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

A função objetivo (1) representa a distância total a ser minimizada. A restrição (2) impõe que a capacidade do depósito não seja excedida; a restrição (3) impõe cada cliente pode ser atendido por apenas um veículo; a restrição (4) impõe que deve ser utilizado um veículo encontrado; as restrições (5) e (6) impõe, respectivamente, que apenas um veículo chega e sai de um cliente; a restrição (7) impõe que o veículo que chega num cliente deve ser igual ao veículo que sai do mesmo cliente; a restrição (8) impõe o limite da sub-rotas; a restrição (9) impõe o limite do tamanho da rota. Por fim, a restrição (10) impõe o limite da capacidade dos veículos.

4.2. MÉTODOS HEURÍSTICOS ADOTADOS

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 tempo computacional reduzido.

Escolheu-se para o primeiro estágio, o algoritmo 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.

A atribuição paralela é assim chamada devido ao fato de que a prioridade para cada cliente é calculada 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. Esta heurística possui o seguinte funcionamento:

- 1) Cada cliente pertence a somente um dos seguintes conjuntos:
 - a) *A* se um cliente foi atribuído para um depósito,
 - b) *NA* se o cliente ainda não foi atribuído para um depósito.
- 2) Cada depósito pertence apenas a um dos seguintes conjuntos:
 - a) *DS* se a demanda do depósito já foi satisfeita,
 - b) *DNS* se a demanda do depósito ainda não foi satisfeita.
- 3) Uma atribuição de um cliente para um depósito é possível se:
 - a) o depósito pertence ao conjunto *DNS*,
 - b) o cliente pertence ao conjunto *NA*.
- 4) Calcula-se então a urgência u de cada cliente pela seguinte expressão:

$$u_c = \sum_{c \in D} (d(c, D) - (d * (c, D^*)))$$
- 5) Cria-se uma lista de clientes ordenada em ordem decrescente pelo valor da urgência u e o cliente com a maior urgência é atribuído ao depósito mais próximo que esteja contido no conjunto *DNS*.
- 6) A heurística termina quando todos os clientes forem atendidos.

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.

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 percorrida ou tempo de deslocamento. 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. O algoritmo de Clarke and Wright é detalhado a seguir:

- 1) Calcular os ganhos S_{ij} para todos os pares ij ($ij, i0, j0$).
- 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 seqüência obtida em 2.
- 4) Para um par de nós ij , correspondente ao k -ésimo elemento da seqüência 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, cria-se 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.

4.3. 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.

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.

4.4. 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.

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 2).



101	180.571,89	2.459,62	541.715,58	101	189.743,88	2.574,27	569.231,64
-----	------------	----------	------------	-----	------------	----------	------------

6. CONCLUSÕES

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 existente em resolver problemas de grande porte, com vários depósitos, optou-se por utilizar um método de duas fases com algoritmos heurísticos. Na primeira fase, utilizou-se o algoritmo de atribuição com urgências paralela, na segunda fase utilizou-se o método das economias de Clarke and Wright com uma etapa de pós-otimização 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

- [1] BALLOU, Ronald H. Logística empresarial: transporte, administração de materiais e distribuição física. São Paulo: Atlas, 1993. ISBN 8522408742.
- [2] 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.
- [3] BRETERNITZ, Vivaldo J. Sistemas de informações geográficas: uma visão para administradores e profissionais de tecnologia da informação. Jundiaí: Análise, v. 4, p. 41-55, 2001.
- [4] CÂMARA, G.; ONSRUD, H. Open source GIS software: myths and realities. In: Julie M. Esanu and Paul F. Uhler, Eds, Open Access and the Public Domain in Digital Data and Information for Science: Proceedings of an International Symposium. Washington: The National Academies Press, 2004. ISBN 0-309-09145-4.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] CLARKE, G., WRIGHT, J.W. Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. Operations Research, 1964.

- [8] 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.
- [9] CROES, G.A. A method for solving traveling salesman problems. *Op.Res.* 6, pp., 791-812, 1958.
- [10] DIJKSTRA, E. W. A Note on Two Problems in Connection with Graphs. *Numerische Math.* 1, 269-271, 1959.
- [11] GILLETT, B. E., MILLER, L. E. A heuristic algorithm for the vehicle-dispatch problem, *Operations Research*, v. 22, p. 340-349, 1974.
- [12] 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.
- [13] GOLDEN, B.L., MAGNANTI, T. L., NGUYEN, H. Q. Implementing vehicle routing algorithms, *Networks*, v. 7, p. 113-148, 1977.
- [14] 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.
- [15] KINBERGER, M., PUCHER. A. Open Source GIS als Alternative im Desktop-Bereich - Evaluation freier Software im Bereich Geoinformation. In: *CORP 2005*, Wien, Österreich, 2005.
- [16] LAPORTE, Gilbert, NORBERT, Y., ARPIN, D. Optimal solutions to capacitated multidepot vehicle routing problems. *Congressus Numerantiwn.* v. 44, p. 283-292, 1984.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] RENAUD, Jacques., LAPORTE, Gilbert., BOCTOR, Fayed F. A Tabu Search Heuristic for the Multi-depot Vehicle Routing Problem, *Computer Op. Res.*, v. 23, p. 229-235, 1996.
- [21] TILLMAN, F. A. The multiple terminal delivery problem with probabilistic demands, *Transportation Science.* v. 3, p. 192-204, 1969.
- [22] 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.