

O PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS TRATADO DE FORMA SIMPLES E EFICIENTE EM UMA EMPRESA TRANSPORTADORA DE MÉDIO PORTE

Lásara Fabrícia Rodrigues

Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG
Escola de Engenharia / Campus Pampulha
lfrpro@yahoo.com.br

Eduardo Carrara Peixoto

Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG
Escola de Engenharia / Campus Pampulha
educarra@bol.com.br

Luiz Ricardo Pinto

Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG
Escola de Engenharia / Campus Pampulha
luiz@dep.ufmg.br

Samuel Vieira Conceição

Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG
Escola de Engenharia / Campus Pampulha
svieira@dep.ufmg.br

Resumo

O Problema de Roteirização de Veículos (PRV) é um dos problemas mais estudados em otimização combinatória e sua aplicação prática em problemas de distribuição é altamente recomendável. O presente trabalho apresenta uma aplicação prática da heurística de Clarke e Wright, uma heurística simples e de fácil codificação, em uma empresa transportadora de médio porte. Essa heurística foi aplicada a uma operação de distribuição de aço dessa empresa na Grande São Paulo e conseguiu, com pequenos investimentos, economias expressivas nos custos de transporte.

Palavras-Chaves: roteirização; heurística de Clarke e Wright; transporte; distribuição.

Abstract

The Vehicle Routing Problem is one of the most studied problems in combinatorial optimization and it is very important to solve distribution problem. In this paper we show the benefits of using vehicle routing, even in small instances. We developed a very simple algorithm (based on Clarke Wright heuristic) applied to a Medium Transport Organization. The result was a reduction of the distribution cost with very small investments.

Keywords: vehicle routing; Clarke e Wright; transport; distribution.

1. INTRODUÇÃO

Decisões estratégicas como as que envolvem o desenho e o planejamento de uma rede de distribuição logística são complexas e envolvem a aplicação de recursos significativos ao longo de vários anos.

O Problema de Roteirização de Veículos (PRV) é uma questão central no gerenciamento da logística nos setores privado e público (GHIANI et al, 2003) e é, atualmente, um dos problemas mais estudados em otimização combinatória (CORDEAU et al, 2002).

O PRV consiste em determinar um conjunto de rotas para os veículos onde cada veículo sai e chega num depósito, cada rota é composta por um conjunto de clientes, cada cliente é visitado uma única vez pelo veículo, cada cliente tem uma demanda conhecida, cuja soma não excede a capacidade do veículo designado para a rota, cada rota é percorrida sem ultrapassar a restrição de tempo e tem como objetivo minimizar o custo total de roteirização.

O sucesso das ferramentas de roteirização de veículos pode ser atribuído à grande proximidade da teoria e da prática no tratamento de problemas desse tipo (SATEESH et al, 1992). Além disso, os desenvolvimentos em hardware e software e a crescente integração entre atividades operacionais e comerciais geraram elevado nível de expectativa com relação aos seus potenciais benefícios, conduzindo a um clima receptivo para sua utilização na indústria e no setor de serviços.

A maioria das técnicas de resolução de PRV podem ser divididas em métodos exatos, heurísticas e metaheurísticas (RUIZ et al, 2004). Devido a sua natureza combinatória, o PRV é resolvido por métodos exatos em situações que apresentam um pequeno número de pontos de demanda e em situações que simplificam os problemas encontrados na prática (CORDEAU et al, 2002, e RUIZ et al, 2004). Como a maioria dos problemas reais apresenta um grande número de pontos de demanda, as heurísticas e metaheurísticas são os métodos de resolução mais utilizados, principalmente pela boa relação custo-benefício de obtenção da solução (CORDEAU et al, 2002, e CAMPOS e MOTA, 2000).

Tarantilis et al (2004) afirmam que, atualmente, os métodos exatos para solução de problemas de roteirização de veículos aplicam-se a problemas com até 50 clientes. Entretanto, nos problemas com número de clientes próximo a 50, o tempo necessário para obter a solução é extremamente elevado (TOTH e VIGO, 1998). Onal et al (1996) recomendam que problemas práticos com mais de 20 pontos de demanda devem ser resolvidos através de heurísticas.

Ruiz et al (2004) ressaltam que heurísticas devem ser usadas quando não é possível encontrar uma solução ótima em um tempo razoável e que embora heurística e/ou metaheurísticas possam resolver grandes instâncias do PRV, o PRV com restrições mais realistas são raramente considerados.

Como no caso em estudo a roteirização é feita diariamente, utilizando base de dados *on-line* com servidor único e comunicação em rede via internet, a velocidade de processamento é um fator decisivo na escolha da heurística de Clarke e Wright.

O presente trabalho pretende implementar uma ferramenta de roteirização de veículos que apóie, do ponto de vista tático e operacional, a tomada de decisão numa operação de distribuição de produtos de aço na Grande São Paulo, reduzindo o número de veículos alocados através da utilização da máxima capacidade de cada veículos e, com isso, diminuir o custo da operação atendendo as restrições impostas pelo sistema. Além disso, a ferramenta deve servir de base para uma alteração dos critérios utilizados para a remuneração dos terceiros através de parâmetros de custo operacional tais como: distância percorrida, tempo de carregamento e descarregamento, número de entregas, etc. O modelo de remuneração atualmente adotado (baseado somente em peso transportado) se mostra inadequado para tratar a grande variedade de situações que a operação possui, e atualmente faz-se necessário o uso de ajustes subjetivos para viabilizá-lo.

A metodologia utilizada foi a Pesquisa-ação, que aborda simultaneamente a implantação e geração de conhecimento ou teoria sobre uma ação (COUGHLAN e COUGHLAN, 2002). A Pesquisa-ação diferencia-se de outras formas de pesquisa pela união da pesquisa com a ação, ou seja, a ação e pesquisa ocorrem em paralelo (ROWLEY, 2003). As fases propostas no presente estudo são: definição do problema, revisão bibliográfica,

planejamento, coleta e análise de dados, elaboração do software de roteirização, validação do modelo, avaliação da ação e resultados, conclusões e recomendações.

2. Problema de Roteirização de Veículos (PRV)

O Problema de Roteirização de Veículos foi introduzido por Dantzig e Ramser em 1959. Esses autores foram os primeiros a formular o problema e a obter um método para sua solução. Esse método considera que nos N primeiros estágios, somente clientes com cargas combinadas que não excedam a razão entre a capacidade do maior caminhão e 2^{N-1} podem ser ligados, permitindo que pontos distantes sejam ligados. Esse método tende a dar maior ênfase no preenchimento de caminhões com capacidades próximas do que a minimizar a distância percorrida.

Com base no trabalho de Dantzig e Ramser (1959), Clarke e Wright (1964) desenvolveram um procedimento iterativo que permite a seleção rápida da rota ótima ou de uma rota próxima da ótima. Além do tratamento do problema básico, os mesmos autores desenvolveram mecanismos para torná-lo flexível. Como exemplo, criaram tratamentos que podem ser incorporados ao algoritmo original para acomodar restrições práticas, tais como: clientes que só aceitam certos tipos de caminhão e prioridades de entrega.

O método de Clarke e Wright encontra resultados melhores que os do Método de Dantzig e Ramser para vários casos testados. O mérito relativo desses dois métodos depende da variabilidade da demanda dos clientes.

Reinelt (1994) comparou diversas heurísticas aplicadas ao PRV e concluiu que nenhuma delas pode dar uma solução melhor (1 – 2%) que a heurística de economia de Clarke e Wright. Esse mesmo autor ressalta a qualidade absoluta e relativa das soluções fornecidas por esse método, além da facilidade de implementação e do pequeno tempo de processamento computacional.

Podem-se classificar as heurísticas desenvolvidas para o PRV em dois grupos: as clássicas e as metaheurísticas. As heurísticas clássicas como as de Clarke e Wright e Dantzig e Ramser dão muita ênfase na obtenção rápida de uma solução viável e a aplicação posterior de um procedimento de melhoria. Já as metaheurísticas usam principalmente os princípios de busca local (ex. simulated annealing e busca tabu) e busca na população (ex. algoritmos genéticos).

Cordeau et al (2002) cita quatro atributos de uma boa heurística para o PRV:

- Acurácia e consistência: mede o grau de precisão da solução fornecida pela heurística em relação à solução ótima ou o melhor valor conhecido (para o caso de instâncias para as quais não se conhece a solução ótima) e o seu desempenho em diversas situações.
- Velocidade: velocidade computacional avaliada de acordo com a precisão requerida.
- Simplicidade: relacionada com o entendimento dos princípios e a complexidade de codificação. Muitas heurísticas são pouco empregadas, pois falham nesse quesito ainda que apresentem desempenho superior.
- Flexibilidade: necessária para acomodar restrições de situações práticas, como tempo de rota, janela de tempo e capacidade de frota variável.

Bodin (1990) cita que na maioria das aplicações práticas de modelos de roteirização de veículos, existem restrições que afetam os resultados. Poot et al (2002) concordam além de destacar a necessidade prática de gerar soluções que sejam intuitivamente aceitáveis para gerentes e planejadores.

Em muitos casos essas restrições estão presentes porque elas simplificam a atividade de roteirização manual e em outros casos são conceitos tão antigos que ninguém na organização consegue resgatar sua origem.

De acordo com Bodin (1990), quando se procura identificar um modelo para

representar uma operação real, é fundamental que se investiguem as restrições presentes avaliando a possibilidade de abandoná-las ou de relaxá-las. Esse autor também considera relevante avaliar o impacto da operação de roteirização em outras partes da organização (cobrança, manutenção, colocação de pedidos, produção de bens, serviços de urgência, localização de fábricas e depósitos, etc.).

Na opinião de Bodin (1990), vários problemas descritos na literatura simplificam de forma exagerada os problemas encontrados na prática e questões tais como: janela de tempo, frota de capacidade variada, vários depósitos e turnos de trabalho não são incorporadas aos modelos. Apesar disso, alguns algoritmos de baixa complexidade têm sido utilizados com algum sucesso na prática para tratar problemas de roteirização de veículos.

Dentro do tradicional Problema de Roteirização de Veículos, várias restrições práticas podem ser tratadas. Dentre essas restrições, pode-se citar o caso em que o veículo não retornar ao depósito depois de atender a demanda (OVRP – *Open Vehicle Routing Problem*). Sariklis e Powell (2000) desenvolveram uma heurística que trata esse problema com boa performance. Esse tipo de problema é encontrado em empresas que não possuem o veículo ou que o seu veículo é inadequado para atender a demanda dos seus clientes. Tarantilis et al (2004) avançaram no estudo desse problema e propuseram, em 2004, uma metaheurística denominada BoneRoute que apresentou o melhor resultado conhecido para o tratamento do OVRP.

Janelas de tempo também são restrições comumente encontradas em situações reais do PRV. Solomon e Desrosiers (1988) desenvolveram uma heurística para buscar uma solução nesse caso (VRPTW – *Vehicle Routing Problem with Time Windows*). Essa restrição está relacionada com a coleta ou entrega de mercadorias ou serviços em intervalos de tempo definidos pelo cliente (horário de início e horário de término). Nesse caso, os horários para início das entregas são variáveis de decisão do problema. Alguns problemas típicos do VRPTW estão relacionados a bancos, correios e ônibus escolares.

Bertsimas e Simchi-Levi (1996) destacam que a maioria dos trabalhos envolvendo janela de tempo foca em análises empíricas, enquanto poucos estudaram o problema analiticamente na tentativa de categorizar o comportamento teórico de heurísticas para usar as idéias obtidas na construção de algoritmos efetivos. Esses autores ainda destacam que o PRV com janela de tempo está diretamente relacionado com a solução ótima do problema de programação de máquina.

Ghiani et al (2003) afirmam que muitos problemas podem ser resolvidos em tempo real devido aos recentes avanços nas tecnologias de comunicação e informação. Veículos podem ser gerenciados on-line através de GIS (*Geographic Information Systems*), GPS (*Global Positioning Systems*), sensores de fluxo de tráfego e telefones celulares. Dentre esses problemas pode-se citar: gerenciamento dinâmico de frota, sistema de distribuição, empresas de serviço de reparo e resgate, serviços de emergência e serviços de táxi. O aumento do poder computacional devido à melhora de *hardware*, o desenvolvimento de metaheurísticas que impactaram na acurácia das soluções e a computação paralela contribuíram para a aceleração e qualidade de algoritmos no contexto de tempo real.

Larsen et al (2002) propõem uma estrutura para sistema de roteamento dinâmico baseado no grau de dinamismo, considerando seu impacto na metodologia e qualidade de solução. O dinamismo do sistema representa a relação entre o número de pedidos dinâmicos e o número de pedidos total. Para investigar sistemas de roteamento dinâmicos, muitos resultados relevantes têm que ser observados. Dentre esses, pode-se citar: processo usado para gerar o tempo de chegada do pedido dinâmico, a distribuição que caracteriza o tempo para realizar o serviço na localização do cliente e o sistema de tempo de reação.

Belenguer et al (2000) abordaram o problema onde os clientes podem ser atendidos por mais de um veículo (*Split Delivery Vehicle Routing Problem - SDVRP*). O SDVRP é uma relaxação do CVRP (Problema de Roteamento de Veículos Capacitado) e pode gerar economias na distância total percorrida e no número de veículos usados.

Dethloff (2002) estuda o problema de recolhimento e entrega. Ele afirma que esse tipo de problema pode ser dividido em três categorias: quando o recolhimento tem que ser realizado após a última entrega ter sido feita (*Vehicle Routing Problem with Backhauls - VRPB*), quando o recolhimento pode ser realizado antes da última entrega ter sido feita (*VRPBM*) e quando recolhimento e a entrega são feitos simultaneamente (*VRPSDP*). O *VRPBM* é uma relaxação do *VRPSDP*, quando o recolhimento ou a entrega é considerado igual a zero. A investigação da relação entre *VRPBM* e *VRPSDP* mostra que os resultados prévios para *VRPSDP* obtidos pela transformação de *VRPSDP* e usando a heurística sugerida para o *VRPBM* não levam em consideração aspectos específicos do *VRPSDP* e, desta forma, viola a necessidade de simultaneidade de serviço.

Cheong et al (2002) estudaram o problema de roteirização aplicado à indústria de bebidas. Esse problema é normalmente denominado roteirização de veículos com tamanho e tipo de frota (*FSMVVRP - Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem*). Uma característica específica dessa variante do PRV é a possibilidade dos veículos fazerem várias viagens por dia para servir clientes novos e clientes já visitados naquele dia. Nesse tipo de problema os veículos são atribuídos a uma região para que os motoristas conheçam bem os clientes atendidos. A metodologia desenvolvida por esses autores apresenta duas fases: na primeira, são definidos o tamanho e o tipo de frota por distrito com base em planejamento de longo prazo e na segunda, o PRV é resolvido diariamente para os clientes de cada região.

Ainda segundo Bodin (1990), devido à complexidade computacional para obtenção de solução ótima nos problemas de roteirização de veículos, os métodos heurísticos têm sido largamente utilizados.

Várias pesquisas obtiveram sucesso utilizando métodos exatos e algoritmos aproximados baseados em programação matemática para solução de algumas classes de problemas de roteirização de veículos. Esses algoritmos encontram a solução ótima ou uma solução próxima da solução ótima. Esses algoritmos, com poucas exceções, não foram incorporados aos softwares comerciais disponíveis. A transferência dessa tecnologia dos pesquisadores para os usuários ainda não tem sido feita em grande extensão.

Para Bodin (1990), nos últimos tempos, a mudança mais importante nos sistemas de roteirização tem a ver com a evolução do ambiente computacional. A introdução do microcomputador permitiu ao usuário realizar intervenções manuais no processo de roteirização além de fornecer ferramentas gráficas para exibir as rotas selecionadas. Isso fez com que as ferramentas de roteirização fossem facilmente compreendidas e aplicadas a situações práticas. O aumento da capacidade computacional permitiu soluções que integram os sistemas de roteirização com informações geo-referenciadas, como colocação de pedidos e rastreamento de veículos. Essas funcionalidades têm sido um requerimento comum dos usuários. A utilização de sistema de informação geográfica pode aumentar significativamente o custo do sistema, já que o usuário tem custo com a aquisição e a manutenção desse sistema.

Como se sabe, os sistemas de transportes não operam sobre um espaço bi-dimensional contínuo, mas sim ao longo de vias ou rotas específicas que, interligadas, formam uma rede (NOVAES, 1989). As redes de transporte têm padrão geométrico irregular e sua configuração foi influenciada por fatores de origem histórica e outros. Vias modernas de alto padrão ligam dois pontos num formato quase linear e coexistem com vias antigas cujo traçado irregular obriga os veículos a se deslocarem por distâncias maiores.

Para soluções aproximadas do PRV, é comum lançar mão de uma simplificação. Nesses casos, pode-se estimar a distância entre dois pontos como sendo à distância em linha reta ou euclidiana entre esses pontos. Através de coeficiente de correção apropriado, estima-se o valor real da distância entre esses pontos.

O uso de sistemas de informação geo-referenciados gera a necessidade de se computar as distâncias entre dois pontos como uma função da distância euclidiana (BODIN, 1990). Esse procedimento também aumenta o desempenho computacional do algoritmo já que o processamento da base de dados das distâncias mínimas reais torna o processamento lento.

Nos estudos ligados a malhas urbanas, é comum adotar um acréscimo médio de 30% sobre a distância euclidiana para se obter uma primeira aproximação para a distância efetiva entre dois pontos (NOVAES, 1989). Essa correção, ainda que aproximada, parece representar bem as situações vigentes na maioria das cidades. Novaes (1989) definiu a correlação entre a distância real e a distância euclidiana para roteiros urbanos da Grande São Paulo e para a malha ferroviária no estado de São Paulo. Em seus estudos sobre o FSMVRP, Cheong et al (2002) também utilizaram a aproximação de 30% para ajustar a distância real em relação à distância euclidiana.

Para garantir um resultado mais preciso em relação aos problemas tratados, Tarantilis et al (2004) desenvolveram uma heurística para o PRV sobre uma base de dados georeferenciada que contempla as restrições da malha rodoviária e fornece a distância real entre dois pontos de demanda. Esse sistema comercial possibilita, entre outras coisas, a atualização constante das características da rede. Esse procedimento, no entanto, aumenta a complexidade do algoritmo e também o tempo de processamento em relação à abordagem simplificada dos fatores de correção para a distância euclidiana.

Onal et al (1996) atestaram em seu trabalho que o uso de métodos analíticos no lugar de julgamentos intuitivos pode melhorar significativamente a performance da gestão operacional. Estudos bem dimensionados de ganhos com a ferramenta podem encorajar as empresas a investir em sistemas de suporte a decisão que otimizem a roteirização de veículos.

Ruiz et al (2004) desenvolveram uma ferramenta iterativa de suporte à decisão (DSS - *Decision Support System*) em uma das unidades de uma empresa que fabrica ração para animais em Valência (Espanha). Essa unidade atende cerca de 70 clientes diariamente. Um modelo de programação inteira foi desenvolvido, porém não se mostrou apropriado. Então, foi desenvolvido um algoritmo de enumeração implícita, que foi implementado no software Delphi 5 usando uma ligação dinâmica com o software Lingo 6. Essa ferramenta permitiu aos usuários do sistema selecionar o conjunto de pedidos a ser entregues, acrescentar ou retirar pedidos do conjunto, fazer análises das melhores opções e exportar resultados para formatos comuns dando maior flexibilidade, facilitando o entendimento e a utilização do DSS pelos gerentes de logística.

Todas as heurísticas de construção podem ter seus resultados melhorados a partir de procedimentos de melhoria tais como: heurísticas de inserção; algoritmo 2-opt, algoritmo 3-opt e algoritmo de Lin-Kernighan.

Vários métodos de melhoria foram propostos na literatura para tratamento do PRV, como os apresentados por Campos e Mota (2000) que utilizam o método Busca Tabu para melhorar uma solução inicial.

Aarts e Lenstra (1987) sugerem que esses procedimentos podem ser vistos como uma busca local numa dada vizinhança de uma solução viável fornecida anteriormente.

O Algoritmo 2-opt, por exemplo, propõe a definição de vizinhança como sendo o movimento (a partir de uma solução viável inicial) caracterizado pela eliminação de dois arcos de uma rota, fazendo com que ela seja dividida em duas partes e depois, reconectando essas partes, formando outro possível caminho com o objetivo de encontrar uma rota de menor custo. O Algoritmo 3-opt, analogamente, substitui 3 arcos de uma rota e, por isso mesmo, gera um número maior de soluções alternativas a serem testadas que o 2-opt.

Os chamados procedimentos de melhoria terminam geralmente em um ótimo local e implicam em aplicação de tempo computacional adicional para processamento de suas instruções e vizinhanças extensas ou no de muitas outras soluções alternativas (como por exemplo, o algoritmo 3-opt) podendo consumir grande tempo computacional. Além disso, os desempenhos desses procedimentos de melhoria dependem da instância do PRV abordada e da heurística utilizada para construção da solução inicial.

Reinelt (1994) testou vários procedimentos de melhoria em diversas instâncias do PRV tendo como solução inicial a resposta do algoritmo de economia ou de Clarke e Wright. Utilizando o procedimento de inserção, o ganho médio foi de 3%, utilizando o algoritmo 2-

opt o ganho médio foi de 1% e utilizando o 3-opt conseguiu um ganho de 7% em relação à solução original.

2.1. O Algoritmo de Clarke e Wright

O algoritmo de economia desenvolvido por Clarke e Wright (1964) é um procedimento de troca à medida que, a cada passo do algoritmo, um conjunto de rotas é substituído por outro melhor. O algoritmo objetiva alocar carga aos caminhões de maneira que todas as mercadorias sejam designadas e a distância total percorrida seja mínima. Esse procedimento é simples, mas efetivo em produzir soluções próximas do ótimo.

Inicialmente, considera-se a menor distância entre todos os nós e assume-se que todo ponto de demanda é suprido individualmente por um veículo separado. Depois, no lugar de utilizar dois veículos para atender os nós i e j , somente um é utilizado e então a economia na distância percorrida pela conexão dos nós i e j é obtida.

A seguir, essa economia é calculada para todas as possíveis conexões entre todos os nós da rede desde que não violem as restrições impostas pelo problema. Essas restrições podem ser capacidade do veículo, tempo de duração da rota, número de pontos visitados, dentre outras. As economias são então ordenadas de forma decrescente, iniciando do topo dessa lista de economias. Os nós i e j são unidos e as economias recalculadas. As economias são calculadas através da Equação 1.

$$SAV_{ij} = d_{0i} + d_{0j} - d_{ij} \quad (1)$$

Onde : d_{0i} → distância entre o depósito e o nó i ;

d_{0j} → distância entre o depósito e o nó j ;

d_{ij} → distância entre o nó i e o nó j ;

Durante as inserções, as únicas ligações permitidas serão aquelas entre os pontos ligados ao depósito. Por conveniência computacional, as capacidades dos caminhões são ordenadas e o número de caminhões considerado infinito (CLARKE e WRIGHT, 1964).

Esse método permite a cada estágio juntar dois pontos que a combinação de suas cargas não exceda a capacidade do maior caminhão. Isso ocorre através da remoção da restrição de combinação de cargas não exceder a razão entre a capacidade do maior caminhão e 2^{N-1} do método de Dantzig e Ramser.

Quando a capacidade do caminhão utilizado para o transporte for superior ao somatório das demandas de todos os clientes o problema se torna um Problema do Caixeiro Viajante (CLARKE e WRIGHT, 1964).

Segundo Altinkemer e Gavish (1991), o algoritmo de economias de Clarke e Wright pertence ao grupo de inserção e economia e tem implementação seqüencial e simultânea. Na versão simultânea, o algoritmo une clientes i e j que corresponderem a maior economia sem violar a restrição de capacidade até uniões não serem mais possíveis. Embora, grupos apareçam simultaneamente, somente dois grupos são unidos a cada passo do algoritmo. Na versão seqüencial, ao invés de calcular as economias da matriz inteira, um nó arbitrário é pego como grupo inicial. A cada passo do algoritmo, a ligação correspondente a maior economia do último nó adicionado é selecionado, desde que não viole nenhuma restrição.

Várias modificações têm sido incorporadas ao método básico de Clarke e Wright. Dentre estas, pode-se citar a incorporação do parâmetro λ . Através de variação do valor de λ , é possível variar a ênfase no custo de transporte entre os nós i e j e obter diversas soluções para que a melhor seja selecionada. A economia passa a ser calculada através da Equação 2.

$$SAV_{ij} = d_{0i} + d_{0j} - \lambda d_{ij} \quad (2)$$

Golden et al (1984) justifica a utilização dessa variação do método original pelo fato de que duas ligações podem parecer quase equivalentes em estágios iniciais do algoritmo, mas a escolha entre elas pode ter impacto na solução final e a modificação do valor de λ possibilita maior variedade ao algoritmo possibilitando a obtenção de uma boa solução.

Poot et al (2002) consideram para o cálculo da economia um fator de grupo e um fator de região. Porém durante o trabalho prático que realizaram, esses autores utilizaram a fórmula padrão de cálculo de economias (Equação 1).

O algoritmo de Clarke e Wright tem recebido inúmeras contribuições de pesquisadores que procuram torná-lo mais preciso e adequado para situações específicas. Esse é o caso do trabalho desenvolvido por Pooley (1992) nos Estados Unidos, que trata a roteirização com uma extensão para seleção do tipo de fornecedor do serviço de transporte.

Altinkemer e Gavish (1991) aplicaram um algoritmo de economias paralelas PSA (Parallel Saving Algorithms) ao problema de entrega. Esse algoritmo foi baseado na idéia de economia introduzida por Clarke e Wright. A maior mudança em relação à pesquisa original foi substituir o procedimento seqüencial por um procedimento combinatório que uni soluções parciais múltiplas em cada passo. O PSA produziu soluções melhores que as conhecidas para 6 dos 14 problemas testados da literatura. A maior limitação desse algoritmo é resolver a cada iteração o Problema do Caixeiro Viajante (PCV).

Poot et al (2002) adaptaram o algoritmo de Clarke e Wright para lidar com restrições não padronizadas (frota heterogênea, restrição de tipo de veículo, restrição de região, ordem de entrega aos clientes e clientes que fornecem algum tipo de material) através do desenvolvimento de um algoritmo baseado em economias e da comparação entre esse algoritmo e um algoritmo de inserção seqüencial. Os resultados apresentados por esse artigo mostraram que o algoritmo baseado em economias supera o algoritmo de inserção seqüencial para todo o conjunto de dados, especialmente ao lidar com medidas de qualidade não padronizadas (atratividade visual e restrição de região). Esses autores comentam ainda que é importante na prática gerar soluções intuitivamente aceitáveis para gerentes e planejadores.

3. Estudo de Caso

O presente estudo tem como ênfase à operação de distribuição de uma empresa transportadora. Essa operação é dedicada à distribuição de aço na Grande São Paulo, mas apesar da origem das mercadorias ser Belo Horizonte, não é objetivo do trabalho estudar o transporte da carga de Belo Horizonte até o depósito em Osasco (Grande São Paulo) e sim do depósito até os clientes finais. A utilização desse depósito é justificada pela dificuldade da realização de entregas nessa região por equipe inexperiente. Além disso, a transferência de Belo Horizonte para Osasco pode ser realizada em veículos de maior capacidade (carretas – 27 toneladas) que apresenta um custo unitário de transporte menor que os veículos utilizados nessa operação de distribuição (truck – 12,5 toneladas – e toco – 7 toneladas).

A transportadora utiliza para essa operação frota terceirizada de caminhões. O pagamento pelo transporte é feito baseado no peso da carga e no custo com ajudantes destinados à descarga dos produtos no cliente.

Nesse estudo, deve-se considerar o tempo de entrega do pedido de dois dias úteis contados a partir do momento da expedição em Belo Horizonte até a entrega ao cliente na Grande São Paulo.

O volume médio mensal transportado nessa operação é de 1400 toneladas de aço. Esse volume atende a aproximadamente 400 clientes com tamanho médio dos pedidos de 2 toneladas. O número médio de clientes atendidos diariamente é de 40.

A carga chega em Osasco de segunda a sexta antes das 4 horas. É, então, descarregada e verificada conforme o estabelecido na nota fiscal da mercadoria. Às 4 horas, os materiais desembarcados são confirmados e analisados para realizar a roteirização.

Atualmente, a roteirização é feita diariamente utilizando o conceito de ‘cabeça de CEP’, ou seja, através dos três primeiros números do CEP do cliente obtém-se a região onde ele se encontra e, com essas regiões, forma-se as rotas. Essas rotas são ajustadas pelo controlador de tráfego com base na sua experiência. Esse tipo de roteirização não aproveita a sinergia entre regiões vizinhas, podendo gerar custo adicional.

Com as rotas estabelecidas, começa-se o carregamento dos caminhões que acontece até as 7 horas.

Foi adotada uma aproximação de 30% (conforme sugerido na literatura) como parâmetro para definir a distância real entre os pontos a serem roteirizados nesse caso e procura-se, através da comparação com a distância real percorrida pelos veículos, ajustar esse parâmetro à realidade da operação em estudo.

As informações de demanda por cliente serão fornecidas pela base de dados da Transportadora onde serão cadastradas as informações de localização dos clientes de forma geo-referenciada.

4. Implantação

A heurística de Clarke e Wright (1964) foi escolhida para implementação nesse caso devido a sua simplicidade, velocidade de processamento e facilidade de codificação (CORDEAU et al, 2002). Quanto a otimalidade da solução, apesar dessa heurística apresentar desempenho inferior a outras técnicas, ela é adequada para situações onde o tempo de processamento e a simplicidade operacional são relevantes (SATEESH et al, 1992, e LAWLER et al, 1987).

O sistema de roteirização será integrado ao sistema operacional administrativo e o controlador de tráfego irá selecionar as entregas disponíveis, indicar os parâmetros operacionais e executar o algoritmo de roteirização que fornecerá um relatório indicando as rotas e os respectivos clientes atendidos. Previsões adicionais de tempo de viagem, distância percorrida e valor do frete serão indicados para priorizar e organizar o carregamento e a negociação com os terceiros (proprietários dos veículos).

A base escolhida como fonte do sistema de roteirização foi o Conhecimento de Transporte – CTCR. Esse documento fiscal contém informações do cliente e da demanda a serem atendidos e esses são os dados básicos para a roteirização.

Foi utilizada a base de dados da empresa e incluída nessa base a respectiva localização geo-referenciada (latitude e longitude) de cada cliente. Através dos endereços disponíveis na base de dados da empresa, as coordenadas (longitude e latitude) foram obtidas. Para isso, foi utilizada a base de dados do site www.maporama.com. Além da base de endereços foram feitos ajustes através de mapas apresentados nesse site e do CEP para a confirmação visual dos endereços.

Os dados utilizados para comparação entre os resultados obtidos através do roteirizador com os encontrados na prática foram os dados referentes ao mês de julho de 2004.

Baseado e integrado no sistema de informações da transportadora foi desenvolvido um aplicativo em Visual Basic – VB utilizando a plataforma MS SQL Server 2000 totalmente integrado as funcionalidades já existentes e aproveitando ao máximo os dados registrados em processos que antecedem a roteirização de entregas.

O funcionário responsável pela atividade de roteirização seleciona na lista de CTCRs os CTCRs correspondentes ao dia em que se deseja realizar a roteirização. Após essa seleção, são definidos os parâmetros utilizados na roteirização (restrições, configurações do problema e o tipo de caminhão disponível).

Após essa seleção, a roteirização é iniciada. O relatório de programação de roteiros é mostrado na Quadro 1.

Rota	Tonelada	Entregas	Tempo	Distância	Custo
1	10,731	3	6,03	121,36	226,56
2	10,570	5	7,93	117,21	223,47
3	8,540	3	4,38	55,17	184,40
4	7,793	3	4,21	48,49	176,41
5	6,840	3	4,37	54,97	176,41
6	5,188	3	4,90	76,08	176,41
	49,662		31,832	473,27	1163,65

Quadro 1 - Relatório resultante do processo de roteirização

5. Validação do Modelo

A validação do modelo ocorreu através da comparação entre os resultados obtidos através do roteirizador e os obtidos na prática. Os dados comparados foram distância percorrida e tempo de rotas. Então, foram roteirizadas algumas rotas utilizando o roteirizador e, os dados obtidos foram comparados com os observados na prática.

Os resultados obtidos são mostrados no Quadro 2.

Rota	Distâncias (em Km)		Tempos (em horas)		Relação entre a distância CW ¹ e a Real	Relação entre o tempo CW ¹ e a Real
	Real	CW ¹	Real	CW ¹		
1	157,00	144,04	10,75	9,60	+ 9,00	+ 11,97
2	120,00	149,55	9,00	9,74	- 19,75	- 7,59
3	78,00	102,79	9,00	9,57	- 24,11	- 5,95
4	128,00	91,50	9,25	9,00	+ 38,89	+ 2,77
5	108,00	76,99	10,10	8,50	+ 40,27	+ 18,82
6	104,00	82,08	7,00	7,00	+ 26,70	0,00
7	140,00	155,34	8,22	9,88	- 9,86	- 16,80
8	160,00	130,41	8,05	10,50	+ 22,68	- 23,38
9	115,00	77,04	8,25	8,93	+ 49,27	- 7,61
10	103,00	139,65	8,05	7,85	- 26,24	+ 2,55
11	42,00	32,99	5,00	4,82	+ 27,31	+ 3,73
12	115,00	141,69	7,67	7,50	- 18,83	+ 2,27
13	116,00	100,98	8,25	8,25	+ 14,87	0,00
14	112,00	105,54	8,16	7,64	+ 6,64	+ 6,80
15	148,00	131,55	9,00	9,29	+ 12,50	- 3,12
16	128,00	150,20	7,50	9,75	- 14,80	- 23,07
17	100,00	81,72	8,00	8,00	+ 22,36	0,00
18	73,00	82,53	6,50	8,07	+ 11,54	- 19,45
19	134,00	114,30	7,16	7,86	+ 17,54	+ 8,90
20	101,00	109,60	10,06	7,77	- 7,85	+ 29,47
Valor Médio das Distâncias e Tempos					+ 8,91%	- 0,98%

¹ - Clarke Wright (Roteirizador)

Quadro 2 – Relação entre as distâncias e tempos obtidos através do roteirizador (CW) e os observados na prática

Pode-se observar que a diferença percentual entre as distâncias obtidas através do roteirizador e as observadas na prática foi de 8,91%, ou seja, as distâncias percorridas foram 8,91% superiores as obtidas através do roteirizador.

Já para os tempos de rota, pode-se observar que os tempos observados na prática foram 0,98% menores que os obtidos através do roteirizador.

Através desses dados, pode-se observar a validade do modelo para os parâmetros distância percorrida e tempo de rotas, já que estes apresentaram pequenas variações com os

dados observados na prática.

6. Avaliação de resultados e custos de implementação

O período escolhido para análise foi o mês de julho de 2004.

Os resultados obtidos através do roteirizador (Clarke e Wright) são comparados com os obtidos através do método de roteirização utilizado pela empresa na Quadro 3.

Data de Expedição	Peso Expedido (Ton)	Numero de Entregas	Numero de Caminhões		Custo Total de Transporte (R\$)		Variação do Numero de Caminhões	Variação do Custo (R\$)
			Real	CW ¹	Real	CW ¹		
2/7/2004	12,9	6	4	2	494,63	328,90	2	165,73
5/7/2004	31,6	13	3	3	683,09	674,91	0	8,18
7/7/2004	55,1	28	8	6	1420,85	1186,94	2	233,91
8/7/2004	26,9	13	5	3	823,02	586,79	2	236,23
9/7/2004	21,3	10	2	2	460,58	450,58	0	10,00
13/7/2004	31,0	23	5	5	801,16	747,12	0	54,04
14/7/2004	21,1	10	3	2	555,65	446,95	1	108,70
16/7/2004	14,8	11	2	2	371,04	323,94	0	47,10
17/7/2004	24,0	18	3	3	613,14	521,86	0	91,28
20/7/2004	42,4	18	7	4	1124,01	896,76	3	227,25
22/7/2004	28,6	13	4	3	687,33	610,87	1	76,46
24/7/2004	19,2	12	2	3	419,68	466,95	-1	-47,27
26/7/2004	48,9	29	8	5	1359,57	1040,64	3	318,93
27/7/2004	87,5	43	11	8	2142,76	1843,94	3	298,82
28/7/2004	23,1	11	2	3	495,05	518,70	-1	-23,65
29/7/2004	42,7	16	5	4	1002,06	901,28	1	100,78
30/7/2004	38,4	19	4	4	897,12	818,50	0	78,62
31/7/2004	12,4	6	1	1	264,34	259,34	0	5,00
Total:					14615,08	12624,97	16	1990,11
Economia no custo total de transportes no período:								13,6%

¹ - Clarke Wright

Quadro 3 – Relação entre o método de roteirização utilizado pela empresa (real) e roteirizador (Clark Wright)

Através do roteirizador, foi obtida uma economia de 16 caminhões e de R\$1990,11 durante o período analisado. Isso representa uma economia de 13,6% em relação ao custo total no período. Essa redução projetada ao longo do ano representa uma economia de aproximadamente R\$ 33.168,5.

Os parâmetros utilizados na roteirização foram tempo de carregamento (fixo de 01 hora), tempo de entrega (fixo de 01 hora por entrega), velocidade média durante o percurso (40 Km/h), restrição de tempo de rota (10 horas) e um fator de aproximação da distância euclidiana (30%).

Os critérios de precificação do frete foram mantidos, ou seja, foi utilizado como base de remuneração o peso transportado.

O tempo máximo de resposta do algoritmo em ambiente internet durante as operações de teste foi de 5 segundos.

Os investimentos na implementação dessa ferramenta foram em análise de sistemas, programação, cadastro e implementação, resultando num investimento total de R\$ 2.510,00.

Esse investimento corresponde à economia gerada pela utilização do roteirizador durante cerca de um mês e meio. Isso foi possível devido ao aproveitamento da estrutura existente na empresa.

7. Conclusões e Recomendações

As economias geradas com a utilização do roteirizador baseado na heurística de Clarke Wright foram significativas, da ordem de 13,6 %.

A troca dos critérios de precificação do frete para valores baseados em parâmetros de custo é altamente recomendável e o software já foi concebido para suportar essa alteração de procedimento.

Resultados gráficos devem ser incorporados ao relatório final do algoritmo para aumentar a confiabilidade e possibilitar conferência/validação da localização geo-referenciada dos clientes.

A interface com o usuário pode ser melhorada com a inclusão de *link* de cadastro de latitude e longitude a partir da página de filtro de Notas Fiscais.

O baixo custo de implementação da ferramenta de roteirização deve-se, em grande parte, a utilização dos recursos pré-existent na empresa, que exigiu apenas algumas poucas modificações na base de dados (cadastros de latitude e longitude) e o desenvolvimento de um aplicativo simples para rodar o algoritmo de Clarke e Wright.

Os resultados reforçam a recomendação para utilização da ferramenta de roteirização mesmo para pequenas instancias do PRV.

Quanto à validação do modelo, deve-se observar que o número de dados utilizados foi reduzido. Logo, para aumentar a confiabilidade deve-se utilizar um número maior de dados.

Sugestão para trabalho futuro: detalhamento e avaliação do impacto das variáveis e parâmetros sugeridos pelo estudo para melhorar o ajuste do modelo teórico com a operação pratica em questão: (a) coeficientes de correção das economias do algoritmo de Clarke e Wright, (b) coeficiente de correção da distância euclidiana para a distância rodoviária urbana na Grande São Paulo, (c) velocidade média de trânsito e (d) tempo médio de carga e descarga das mercadorias por cliente.

O presente trabalho implementou uma ferramenta de roteirização de veículos que apóia diariamente a tomada de decisão numa operação de distribuição de produtos de aço na Grande São Paulo. Essa implementação possibilitou a redução do número de veículos alocados através da utilização da máxima capacidade de cada veículo e, com isso, diminui o custo da operação atendendo as restrições impostas pelo sistema.

8. Referências Bibliográficas

- [1] ALTINKEMER, K. E GAVISH, B. (1991) *Parallel Savings Based Heuristic for the Delivery Problem*. Operations Research **39**: 456-469.
- [2] BELENGUER J. M., MARTINEZ M. C. E MOTA E. (2000) A Lower Bound for the Split Delivery Vehicle Routing Problem. Operations Research **48**: 801-810.
- [3] BERTSIMAS, D. J. E SIMCHI-LEVI, D. (1996) A New Generation of Vehicle Routing Research: Robust Algorithms, Addressing Uncertainty. Operations Research **44**: 286-304.
- [4] BODIN L. D. (1990). *Twenty Years of Routing and Scheduling*. Operations Research **38**: 571-579.
- [5] CAMPOS V. E MOTA E. (2000) *Heuristic Procedures for the Capacitated Vehicle Routing Problem*. Computational Optimization and Application **16**: 265-277.
- [6] CHEONG, Y. M., ONG, H. L. E HUANG, H. C. (2002) *Modeling the Vehicle Routine Problem for a Soft Drink Distribution Company*. Pacific Journal of Operational Research **19**: 17-34.
- [7] CLARKE, G. E WRIGHT, J. (1964). *Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points*. Operations Research **12**: 568-581.

- [8] CORDEAU J-F, GENDREAU M, LAPORTE G, POTVIN J-Y E SEMET F (2002). *A guide to vehicle routing heuristics*. Journal of Operational Research Society **53**: 512-522.
- [9] COUGHLAN P. E COUGHLAN D. (2002). *Action Research for operations management*. International Journal of Operations & Production Management **22**: 220-240.
- [10] DANTZIG G. B. E HAMSER J. H. (1959). The Truck Dispatching Problem. Management Science **6**: 80-91.
- [11] DETHLOFF J. (2002) Relation between Vehicle Routing Problems: an Insertion Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pick-up applied to the Vehicle Routing Problem with Backhauls. Journal of the Operational Research Society **53**:115-118.
- [12] GHIANI, G., GUERRIERO, F., LAPORTE, G. E MUSMANNO, R. (2003) *Real-time vehicle routing: Solutions concepts, algorithms and parallel computing strategies*. European Journal of Operational Research **151**: 1-11.
- [13] GOLDEN, B., ASSAD, A., LEVY, L. E GHEYSSENS, F. (1984) *The fleet size and mix vehicle routing problem*. Computer e Operations Research **11**: 49-65.
- [14] LARSEN, A., MADSEN, O. E SOLOMON, M. (2002) *Partially Dinamic Vehicle Routing – models and algorithms*. Journal of the Operational Research Society **53**: 637-646.
- [15] LAWLER, E. L., LENSTRA, J. K., KINNOOY KAN, A. H. G. E SHMOYS, D. B. The Traveling Salesman Problem – A Guided Tour of Combinatorial Optimization. Ed John Wiley & Sons Ltd.: Chichester, 1987.
- [16] NOVAES, A. G. (1989) *Sistemas Logísticos: transporte, armazenagem e distribuição física de produtos*. Ed Campus: São Paulo.
- [17] ONAL H., JARAMILLO B. M. E MAZZOCCO M. A. (1996) Two Formulations of the Vehicle Routing Problem: An Empirical Application and Computational Experience. Logistics and Transportation Review **32**: 177-190.
- [18] POOLEY J. (1992). A Vehicle Routing Algorithm for the Less-Than-Truckload vs. Multiple-Stop Truckload Problem. Journal of Business Logistics **13**:239-259.
- [19] POOT A., KANT G. E WAGELMANS A. (2002) *A Savings Based Method for Real-Life Vehicle Routing Problems*. Journal of the Operational Research Society **53**:57-68
- [20] REINELT, G. The Traveling Salesman Computational Solutions of TSP Applications. Ed Springer-Verlag: Berlim, 1994.
- [21] ROWLEY, J. (2003) *Action Research: an approach to student work based learning*. Education + Training **45**: 131-138.
- [22] RUIZ, R., MAROTO, C. E ALCARAZ, J. (2004) *A decision support system for a real vehicle routing problem*. European Journal of Operational Research **153**: 593-606.
- [23] SARIKLIS D. E POWELL S. (2000) *A Heuristic Method for the Open Vehicle Routing Problem*. Journal of the Operational Research Society **51**:564-573.
- [24] SATEESH C, RAY E PRADIP K (1992). *Vehicle Routing in Large Organization: a Case Study*. International Journal of Operations & Production Management **12**: 71-79.
- [25] SOLOMON, M. M. E DESROSIERS, J. (1988) *Time Window Constrained Routing and Scheduling Problems*. Transportation Science **22**: 1-13.

- [26] TARANTILIS, C. D., DIAKOULAKI D., KIRANOUDIS C. T. (2004) *Combination of geographical information system and efficient routing algorithms for real life distribution operations*. European Journal of Operational Research **152**: 437-453.
- [27] TOTH P E VIGO D (1998). *Exact solution of the vehicle routing problem*. In: Craninic TG and Laporte G (eds). Fleet Management and Logistics. Kluwer: Boston, pp 1-31.