



## TESTES DE COMPARAÇÃO EM ALGORITMOS PARA ROTEAMENTO E AGENDAMENTO DE VEÍCULOS

**Marco Antônio Farah Caldas**

Universidade Federal Fluminense – Núcleo de Logística Integrada e Sistemas  
Rua Passo da Pátria 156 – Sala 440, Prédio Velho, São Domingos, Niterói, 24.210-240 RJ  
[logistica@engenharia.uff.br](mailto:logistica@engenharia.uff.br)

**Roberta Lauria Lima**

Universidade Federal Fluminense – Núcleo de Logística Integrada e Sistemas  
Rua Passo da Pátria 156 – Sala 440, Prédio Velho, São Domingos, Niterói, 24.210-240 RJ  
[logistica@engenharia.uff.br](mailto:logistica@engenharia.uff.br)

### RESUMO

Esse trabalho apresenta a aplicação seguida de uma avaliação de alguns algoritmos heurísticos aplicados ao problema de roteamento de veículos com múltiplas restrições. O objetivo é identificar algumas diferenças nas funções que buscam o mínimo custo, levando-se em conta o atendimento do máximo número de pedidos possível, assim como algumas restrições. Inicialmente as variáveis pertinentes para modelagem do sistema são determinadas, assim como o conjunto de restrições. Em seguida, através de simulações, mostram-se os resultados obtidos com três diferentes tipos de métodos. Finalmente, o estudo estabelece o melhor algoritmo para a operação, apresentando alguns resultados para as rotas estabelecidas. Os resultados mostram o melhor método e variações de funções de custo entre os três métodos. O estudo traz à discussão a importância da utilização e validação desse tipo de tecnologia aplicada à empresas.

Palavras-chave: Modelagem Logística, Algoritmos Heurísticos, Operações de Coleta e Distribuição.

### ABSTRACT

This work presents an application followed by an analysis of a set of heuristics algorithms applied to the Capacitated Vehicle Routing Problem with Unequal Demands – CVRPUD. It aims to identify and analyze differences among the cost functions that are inherits to the methods. Restrictions such as vehicle occupation, time in route, and so on are taken into account. Total demand was satisfied and data file was kept as one to three different methods. The best result is shown and it was used to established variations among the three methods. The study brings to discussion the importance of using and validating CVRPUD when applying it to companies.

Key-words: Logistics Modeling, Heuristics Algorithms, Pickup and Delivery Operations.

## 1. INTRODUÇÃO

Em geral, o problema de roteirização e agendamento de veículos envolve muitas restrições, tais como restrições de tempo e distância em rotas, de janelas de tempo de coleta e entrega de produtos, além das janelas dos veículos e motoristas, entre outras. Portanto, a utilização de programas computacionais que contém diversos tipos de algoritmos heurísticos para roteirização de veículos pode ter um grande impacto na redução de custos de empresas, já que geram soluções próximas das ótimas, enquanto levam em conta todas as restrições existentes no dia-a-dia, o que é muito difícil ocorrer quando se faz um trabalho baseado apenas na experiência.



O objetivo, ao usar-se um modelo desse tipo, consiste na busca de uma solução que, contemplando todas as restrições, alcance o atendimento de toda a demanda de produtos em rotas a um custo que seja o mais próximo possível do mínimo.

No entanto, se por um lado o uso da heurística em modelagem permite que cenários altamente complexos possam ser computacionalmente trabalhados e possíveis soluções possam ser analisadas, por outro, o uso desses algoritmos não necessariamente induz a solução ao ótimo, ou seja, a determinação do custo mínimo.

O objetivo desse trabalho é testar algumas soluções advindas do uso de algoritmos específicos para que, a partir de um mesmo conjunto de dados, possa-se avaliar variações de soluções em torno de uma solução específica considerada como solução de custo mínimo.

Foi usado um banco de dados relativos a um dia de operação de uma determinada transportadora que atua na logística de suprimentos da indústria automobilística.

A seguir, no item 2, será apresentado o cenário sobre o qual serão feitas as simulações. Logo após, no item 3 serão apresentados os algoritmos e métodos que serão utilizados. No item 4, mais alguns comentários serão feitos sobre as restrições impostas ao modelo e finalmente no item 5 serão apresentados os resultados e conclusões do estudo.

## 2. DESCRIÇÃO DAS OPERAÇÕES LOGÍSTICAS

A operação logística em questão é de coleta de peças para uma empresa do setor automobilístico. Esse tipo de operação é conhecida como “*Milkrun*”, na qual os veículos partem da garagem da transportadora, coletam os produtos nos fornecedores do cliente e entregam-nos diretamente na fábrica da empresa automobilística para posterior montagem, como pode ser visto no esquema da Figura 1. Foram utilizados para a roteirização desenvolvida 1 garagem, 34 fornecedores e 3 fábricas, chamados de locais. Cabe ressaltar que a roteirização foi desenvolvida para um dia de operação da transportadora para a empresa automobilística em questão. Assim sendo, relacionamos abaixo as outras variáveis utilizadas nesse cenário.

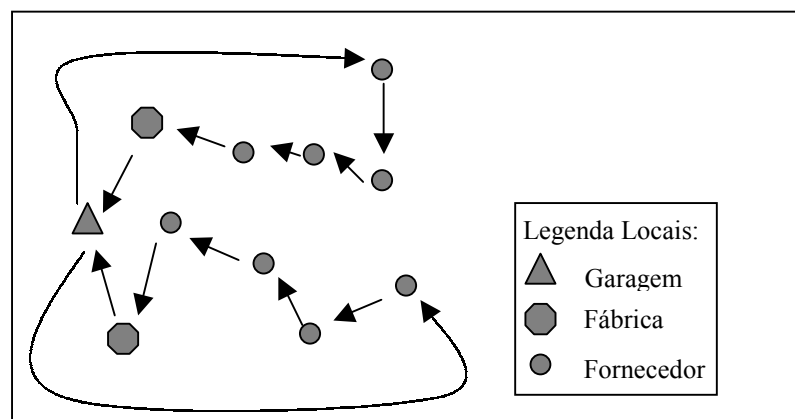


Figura 1: Esquema da operação modelada, tipo “Milkrun”.

Em uma primeira etapa, lançou-se mão de uma base de dados geo-referenciados para localizar os locais contemplados em termos de latitudes e longitudes. A utilização de Sistemas de Informações Geográficas oferece um grande suporte para sistemas de apoio à decisão, pois através deles pode-se visualizar as localizações relativas dos locais contemplados no projeto, rapidamente conseguir informações sobre o ponto desejado, calcular a distância exata entre dois pontos através da rede rodoviária utilizada e visualizar as rotas construídas, com seus respectivos tempos e distâncias totais.



Também foram inseridas informações sobre as peças transportadas dos fornecedores para a empresa automobilística em questão, que, nesse dia de operação, contabilizaram 132 diferentes tipos. Em relação a essas, foram levados em conta a unidade de medida em que são transportados (caixas, pallets, etc.), a cubagem e o peso de cada peça.

É importante que as peças listadas estejam com seus respectivos volumes, pesos e taxa de ocupação em paletes relacionados, pois no momento em que os pedidos entram no sistema para serem roteirizados, as quantidades requisitadas de cada peça são convertidas, neste caso, no número de embalagens a serem coletadas, assim como no volume e peso total para posterior acomodação nos veículos, os quais possuem limites de capacidade em relação a essas três variáveis.

Os pedidos que foram considerados nesse estudo para dar base a modelagem, dizem respeito a um dia de requisição por parte da empresa automobilística. Foram inseridos 132 pedidos, contendo informações sobre o tipo de peça a ser coletada, os locais de origem e destino de cada peça (origens são os fornecedores e destinos são as fábricas automobilísticas), suas quantidades e as data em que os pedidos foram realizados e devem ser entregues.

Para o caso em questão a transportadora colocou vinte e cinco veículos à disposição para que fosse feito o roteamento de cargas para esse cliente, esses tipos são: caminhão tipo Leve Médio (1), com capacidade de 19 m<sup>3</sup> e 2.500 kg; Toco, limite máximo de 47 m<sup>3</sup> e 5.500 kg (10); caminhão tipo Truck (13), com capacidade de 50 m<sup>3</sup> e 12.000 kg e Conjunto (1), com capacidade para 99 m<sup>3</sup> e 18.000 kg.

Para cada tipo de veículo citado acima, foi inserido um custo por quilômetro fictício de R\$ 3,00 (três reais), os quais, de acordo com as rotas projetadas, formarão o custo total da rota. Ainda em relação a esses veículos foram colocados limites relacionados a cada tipo de veículo, no que diz respeito ao número máximo de rotas que poderiam realizar, o número máximo de horas que poderiam despender em uma rota e a velocidade máxima do veículo.

### **3. MÉTODOS E ALGORITMOS PARA CONSTRUÇÃO DE ROTAS**

Os principais modelos heurísticos para os casos de CVRPUD (Capacited Vehicle Routing Problem with Unequal Demands) são (Bramel and Simchi- Levi 1997):

- Métodos Construtivos;
- Métodos tipo “Route First - Cluster Second”
- Métodos do tipo “Cluster First – Route Second”

Na categoria de métodos construtivos o principal método é o de Clark e Wright ou Método das Economias ou “Savings Method” (Clark and Wright, 1963). O método incorpora o conceito de ganhos além de ter as seguintes características:

- Trabalhar com os ganhos que podem ser obtidos ao se efetuar a agregação de um novo ponto a um roteiro parcialmente construído.
- Inicialmente supõe-se por absurdo que cada roteiro contemple um único cliente de cada vez, retornando ao depósito a cada entrega.
- A partir dessa iniciação vão sendo feitas combinações de pontos dois a dois, formando uma lista de ganhos na ordem decrescente de valores.
- Dessa lista hierarquizada, vão sendo agregados, passo a passo, os pontos, até que se complete o roteiro.

Na categoria de “Route First – Cluster Second” o principal método é o da Varredura ou “Nearest Neighbor Method” (Bramel and Simchi-Levi, 1997). O método trata-se de um heurístico que



primeiramente ordena os pontos de entrega/coleta (clientes) de acordo com suas localizações, desagregando demandas, e então partindo destas seqüências para produzir grupos factíveis de pontos (clusters). Esses grupos consistem em conjuntos de clientes que são consecutivos a partir de uma semente inicial. Os clientes são então roteados dentro de um “cluster” a partir de um heurístico específico. O método trabalha com um eixo qualquer traçado a partir de um centro de distribuição (CD), girando no sentido horário, ou anti-horário, incorporando os pontos de visita.

Na categoria de “Cluster First – Route Second”, um dos principais métodos é o “The Location – Based Heuristic” de Bramel and Simchi-Levi (Bramel and Simchi-Levi, 1997).

Clientes são primeiramente agrupados em grupos factíveis para serem atendidos pelo mesmo veículo então eles são ordenados para serem servidos a partir de um determinado heurístico. Sua formulação matemática é dada abaixo.

Dados  $m$  possíveis locais fixos fornecimento de produtos e de capacidade fixa  $Q$  (CD's Armazéns, etc) busca-se localizar um subconjuntos desses locais  $m$  para acessar um grupo específicos de  $n$  clientes



$$x_{ij} \in \{0,1\}, \forall_{i,j}$$

$$y_j \in (0,1), \forall_j$$

#### 4. CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS DAS ROTAS

Em se tratando de configurações das propriedades das rotas a serem construídas, foram reforçados alguns aspectos para que a roteirização levasse em conta as restrições existentes no modelo. Esses aspectos foram: a capacidade dos veículos em termos de cubagem, peso e taxa de ocupação em paletes, e o número máximo de horas que um veículo pode despende em uma rota.

Como citado anteriormente, utilizamos uma base geo-referenciada para dar suporte ao roteamento, de forma que o resultado em termos de distância fosse muito próximo do real (margem de erro  $\pm 4,5\%$ ). Os mapas utilizados, englobando a Grande São Paulo e as rodovias estaduais e federais do Brasil, foram segmentados em cinco tipo de vias, cada qual com sua velocidade média. Esses tipos de vias e suas respectivas velocidades médias são os que se seguem: federais, 80 km/h; estaduais, 75 km/h; avenidas, 60 km/h; coletoras, 50 km/h e ruas, 45 km/h.

Dependendo do algoritmo selecionado para a construção de rotas, é necessário que exista um critério para a inicialização da rota, que é mais conhecido como semente. Essa semente pode priorizar pedidos para iniciar a rota pelo seu tamanho (m<sup>3</sup>, kg, etc) ou ainda pela maior distância da garagem. Nesse caso, consideramos a melhor opção priorizar pedidos pela distância, de forma que o algoritmo busque criar pontos base nos lugares mais distantes da garagem, e à medida que for coletando as peças requisitadas nos fornecedores, vá se aproximando do local de entrega.

Especificamente, as seguintes restrições foram levadas em consideração:

- Restrições de tempo e distância em rotas;
- Janelas de tempo de entrega de produtos;
- Capacidade de Veículos.

#### 5. RESULTADOS E ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES

Primeiramente, utilizamos o método da Varredura ou “Nearest Neighbor” para fazer simulações, buscando o número ótimo de veículos, que fossem utilizados ao máximo e com o menor custo possível. Esse algoritmo tem base nos princípios mostrados no item 3. Ele constrói rotas uma por vez e tenta completar um veículo antes de utilizar outro. O pedido de maior prioridade inicia a rota (nesse caso, o mais distante da garagem), o algoritmo, então, aumenta a rota através da inserção de pedidos não roteados mais próximos à rota.

No caso do “Cluster”, os pedidos que estão indo para locais que estão mais próximos uns dos outros iniciam a rota. O algoritmo irá aumentar a rota através da inserção das ordens não roteadas mais próximas ao “cluster”.

O Método das Economias ou “Savings”, inicializa o roteamento calculando os custos relacionados à cada rota, partindo do princípio que uma rota é formada apenas por um ponto e prossegue calculando as economias de se adicionar um ponto a uma determinada rota. O ponto que oferecer a maior economia é inserido na rota e o algoritmo continua fazendo as iterações até que o último ponto seja encaixado nas rotas existentes, sem que nenhuma restrição seja violada.



Os resultados obtidos em termos de rotas construídas, total de pedidos roteados, quilometragem total percorrida e tempo total despendido, custo total, cubagem total, peso total e ocupação total em paletes, podem ser vistos na Tabela 1, para os algoritmos: “Nearest Neighbor”, “Cluster” e “Savings”.

**Tabela 1:** Resultados Totais obtidos para o roteamento utilizando diversos algoritmos.

Algoritmos Utilizados	Nº Rotas	Total Pedidos	Total Km	Total Tempo	Total Custo	Total m <sup>3</sup>	Total kg	Total paletes
Nearest Neighbor	15	100%	4,014.0	142.4	12,042.0	187.1	47,501.0	130.2
Cluster	23	100%	5,255.0	178.1	15,765.0	187.1	47,501.0	130.2
Savings	17	100%	4,012.5	143.4	12,037.5	187.1	47,501.0	130.2

A tabela acima mostra o número de rotas geradas por cada método, o total de quilômetros percorridos nessas rotas, o tempo gasto e o custo total das rotas. É importante salientar que a demanda foi totalmente atendida nos três casos em que os pedidos foram exatamente os mesmos.

Como pode-se perceber pela Tabela 1, o algoritmo “Savings” foi o que apresentou os melhores resultados, construindo 17 rotas ao custo mínimo, se comparado com os outros dois métodos, englobando 100% dos pedidos realizados, com um custo total do roteamento de R\$ 12.037,5. O algoritmo “Nearest Neighbor” também apresentou um resultado considerado bom, à medida que utilizou dois veículos a menos do que o algoritmo “Savings”, com um acréscimo de apenas R\$ 4,5.

Como a frota disponibilizada para a operação foi de 25 veículos, dependendo da necessidade da empresa, pode ser mais interessante utilizar apenas 15 veículos com um acréscimo irrisório no custo (Nearest Neighbor), a utilizar 17 veículos (Savings).

Os métodos de Economias ou “Savings” e o da Varredura ou “Nearest Neighbor” apresentaram resultados praticamente iguais. No entanto esse resultado chegou a ser 31% menor que o método “Cluster”, quando manteve-se o mesmo conjunto de dados e restrições.

Isso aconteceu para uma operação diária, tornando o problema muito mais sério quando levado à operações semanais ou mensais.

Essa diferença pode estar associada a vários fatores, tais como:

- Janelas de Tempo muito díspares;
- Forma geográfica em que os pontos visitados estão localizados, influenciando o formato das rotas.

## 6. CONCLUSÕES

A aplicação de métodos de CRVPUD induz o analista ao uso da heurística no sentido de encontrar uma solução, mesmo que a mesma não seja a ótima, para problemas onde as restrições podem ser inúmeras.

Existem vários estudos onde se testam estas soluções em relação à modelagem matemática, bem como em relação à elas mesmas. Os resultados desses estudos auxiliam na percepção do erro de estimação das funções de mínimo em relação ao mínimo real.

Esse estudo apresenta alguns resultados na aplicação de três métodos de modelagem heurística, aplicados a um mesmo banco de dados relativo as operações logísticas de um operador logístico da indústria automobilística.



Os algoritmos usados foram o da “Varredura” ou “Nearest Neighbor”, o Método das Economias ou “Savings” e o “Cluster”.

O estudo mostra discrepâncias muito grandes advindas dos resultados obtidos com os métodos. Os métodos de Economias ou “Savings” e o da Varredura ou “Nearest Neighbor” apresentaram resultados praticamente iguais. No entanto esse resultado chegou a ser 31% menor que o método “Cluster”, quando manteve-se o mesmo conjunto de dados e restrições.

O estudo traz à discussão importantes pontos sobre o uso da heurística no problema de roteamento. É fundamental que o analista use mais de um método quando for modelar operações dessa natureza. Caso contrário, poderá estar incorporando à análise erros grosseiros para o planejamento e o controle de rotas de empresas, inclusive tornando os valores de custo dessas operações absurdamente diferentes do que pode-se estar realizando na prática.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Bramel, J., Simchi-Levi, D. (1997) “The Logic of Logistics – Theory, Algorithms, and Applications for Logistics Management”. Ed. Springer Series in Operations Research.

Caldas, M.A.F., Soares, E.F. “Planejamento de Rotas Aéreas – “Alocação de Aeronaves em função da Demanda” XXXIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional – Campos do Jordão – SP – Brasil – 6 a 9 de Novembro de 2001.

Caps Logistics (1998) RoutePro Dispatcher 7.0 Version – User Manual.

Clarke, G. and Wright, J.W. (1963) “Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points” Operations Research, Vol. 11, 568 – 581.

Solomon, M. M., Desrosiers, J. (1988), Time Window Constrained Routing and Scheduling Problems: A Survey. Transportation Sci. 22, 1-13.