

## ESTUDO DE HEURISTICAS PARA O ROTEAMENTO URBANO DE VEICULOS

**Marco Antonio Farah Caldas**  
*mafcaldas@uol.com.br*

**Davidson Almeida Santos**

UFF

### Resumo

O roteamento de veículos em áreas urbanas coloca-se como um dos principais problemas da área de logística. Esse alto nível de complexidade deve-se a multiplicidade de restrições que devem ser consideradas para este tipo de problema e ao impacto gerado em custos no momento em que o roteamento de veículos mostra-se pouco eficiente. Esse estudo desenvolve uma análise comparativa em relação às heurísticas alternativas para roteamentos de frotas de veículos normalmente usadas como apoio à decisão em logística de distribuição em regiões metropolitanas de média e grande complexidade. O estudo tem como objetivo contribuir com análises que permitirão uma melhor compreensão do problema de roteamento em áreas urbanas e verificar em que cenários as alternativas de roteamento adaptam-se melhor quando levados em consideração fatores como custos de transporte e produtividade da frota. Essa comparação foi realizada sobre um grupo de instâncias criadas a partir de dados reais de uma empresa varejista atuante na cidade do Rio de Janeiro. São propostos uma heurística construtiva e dois algoritmos de buscas locais para aperfeiçoamento das soluções obtidas por esta heurística. Finalmente, é feita uma análise comparativa entre todas essas possíveis abordagens.

**Palavras-chaves:** Heurísticas, Buscas Locais, Logística, Problema de Roteamento de Veículos

### Abstract

Routing vehicles in urban areas poses a major problem in the area of logistics. This high level of complexity occurs due to the multiplicity of restrictions that must be taken into account in this kind of problem. A non appropriate model might lead to unnecessary high costs and inefficient routing. This study develops an analysis on routing alternatives using a set of algorithms with a crescent complexity. Scenarios are built and tested using data from daily logistics operation in Rio de Janeiro. The study aims to contribute for a better understanding of the Vehicle le Routing Problem – VRP when vehicles are routed in urban areas and have to follow a complex set of restrictions. This comparison was performed over a set of instances created from real data provided by a large retailer in the city of Rio. The article proposes one constructive heuristics and two local search algorithms. Finally a comparison among all the solutions is done.

**Keywords:** Heuristics, Local Search, Logistics, Vehicle Routing Problem.

## 1. Introdução

As atividades de distribuição de empresa compreendem toda a movimentação e estocagem de bens. Segundo Christofides (1981) a última etapa nessa movimentação (da central de distribuição para os consumidores), constitui-se como elo mais caro da cadeia de distribuição. Para Bodin, L.D *et al* (1983). o sucesso na realização dessa etapa depende do desenvolvimento racional do planejamento e execução da atividade de transporte.

A relevância dos problemas de distribuição está relacionada à magnitude dos custos associados a essa atividade. Conseqüentemente, torna-se evidente a relevância dos problemas de distribuição e, por conseguinte as questões referentes ao sistema de roteamento e programação de veículos, já que estas se constituem como os fatores que determinarão o quão eficiente será a distribuição de determinado produto.

O sistema de roteamento é definido como um conjunto organizado de meios que objetiva o atendimento de demandas localizadas nos arcos e/ou nos vértices de alguma rede de transportes. No caso de roteamento de veículos, o objetivo mais comum é utilizar-se de uma frota de veículos para atender a um conjunto de pedidos de entrega, cujas demandas estão localizadas nos nós da rede denominados destino. Para atender a esses pedidos, um conjunto de restrições deve ser respeitado. Essas restrições podem ser as mais diversas, como: capacidade limitada dos veículos, capacidade limitada dos arcos ou dos nós; tamanho da frota; quantidade de nós; tempo de entrega; etc.

As inúmeras pesquisas sobre a roteamento de veículos colocam essa área de estudo como um dos maiores sucessos da pesquisa operacional nas últimas décadas. Isso se deve a atuação conjunta entre teoria e prática. Por um lado a pesquisa operacional tem desenvolvido cada vez mais algoritmos que tem um importante papel na implementação de sistemas de roteamento. Por um lado tem-se o desenvolvimento crescente de software e hardware que permitem a execução dos algoritmos estruturados pela área de pesquisa operacional. Este fato também é comprovado pelos inúmeros artigos que vêm sendo publicados ao longo dos anos na literatura especializada.

## 2. O Problema de Roteamentos de Veículos (Vehicle Routing Problem - VRP)

O Problema Roteamento de Veículos, enunciado inicialmente em Dantzig e Ramser (1959), apresenta um conjunto de depósitos e um conjunto de clientes dispersos em pontos geográficos, um conjunto de demandas de transporte entre pares de pontos e uma frota de veículos. O objetivo é criar rotas para que os veículos possam transportar as demandas, respeitando uma série de restrições operacionais e minimizando os custos envolvidos. Cada rota se inicia em um depósito e termina no mesmo, formando um ciclo. Esse tipo de problema aparece em um grande número de situações. Pode citar atividades como entrega ou recolhimento de mercadorias, transporte de pessoas, coleta de lixo, entrega postal, operações de fretes, entre outras.

Todas essas variantes pertencem ao grupo de problemas NP-Difíceis, ou seja, sua resolução exata provavelmente exige um esforço computacional que cresce exponencialmente com o número de clientes a serem atendidos. Isso não impede que se construam algoritmos heurísticos capazes de encontrar soluções de excelente qualidade para problemas de grande porte, com várias centenas de clientes.

Segundo Laporte e Semet (2002) o problema de roteamento de veículos consiste em definir roteiros de veículos que minimizem o custo total de atendimento, sendo que cada um dos quais deve iniciar e terminar no depósito ou base dos veículos, assegurando que cada ponto seja visitado exatamente uma vez e a demanda em qualquer rota não exceda a capacidade do veículo que a atende.

### 3. Heurísticas Construtivas

Heurísticas construtivas são aquelas que tentam construir uma solução para um problema a partir apenas de sua definição. Muitas dessas heurísticas constroem essas soluções tomando uma seqüência de decisões encadeadas, em cada passo tomando a decisão que aumenta menos o custo da solução. Essas heurísticas são chamadas de gulosas ou míopes. Como fazer a máxima economia de custo em um determinado passo pode levar os custos maiores nos passos seguintes, tais heurísticas muitas vezes levam as soluções de baixa qualidade, porém em tempos computacionais aceitáveis.

Neste estudo, foi utilizado o Problema Generalizado de Atribuição - PGA (Fisher, M.L. e Jaikumar, R 1981) com a aplicação de relaxação e reformulação do PGA para um problema de cobertura de conjuntos. Esses conjuntos se baseiam na formação de agrupamento de clientes, fazendo com que rotas de territórios diferentes não tenham interação alguma. Cada conjunto é resolvido através da aplicação do algoritmo do caixeiro viajante. Além disso, internamente a essas soluções simples de programação linear, são aplicados métodos de buscas locais nos quais ocorre interação entre as rotas, apresentando um grau crescente de possibilidade de inserção e, ou resequenciamento de clientes de outras rotas. Os territórios são demarcados através de regiões geográficas específicas de uma determinada região metropolitana.

A formulação do PGA aproximado ao VRP segue a lógica de que para cada veículo, uma semente para localização de zonas de operação de um veículo é escolhida. Isso permite o cálculo de uma medida aproximada de uma distância extra percorrida se o cliente  $j$  é servido pelo veículo  $i$ . Assumindo uma matriz simétrica de distâncias  $d_{ij}$ , um veículo viajando do depósito  $0$ , para a distância semente  $i$ , e retornando, viajaria uma distância total de  $2d_{0i}$ . Se esse veículo visitar o cliente  $j$  durante sua viagem total (ida e volta), a distância adicional viajada será:

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

A quantidade  $c_{ij}$  pode ser usada como uma medida aproximada, permitindo PGA de ser formulado de tal maneira que sua função objetivo é uma aproximação da distância total percorrida na solução do VRP.

Seja:

$$x_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{se o cliente } j \text{ não é atendido pelo veículo } i \\ 1 & \text{se o cliente } j \text{ é atendido pelo veículo } i \end{cases}$$

Se  $w_j$  é a demanda dos produtos requeridos pelo cliente  $j$ ,  $j = 1, \dots, n$ , e  $W_i$  é a capacidade do veículo  $i$ ,  $i = 1, \dots, m$ , então a formulação do PGA é dada por:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} + 2 \sum_{i=1}^m d_{0i} \quad (2)$$

$$\text{Sujeito a } \sum_{j=1}^n w_j x_{ij} \leq W_i \quad (3)$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1 \quad (4)$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \text{ for all } i \text{ and } j.$$

O último somatório na função objetivo em (2) é incluído para fazer uma aproximação da distância total percorrida. Esse termo pode ser ignorado quando ele for uma constante.

O número de veículos,  $m$ , deve ser fixado para que as sementes possam ser escolhidas. No entanto, o PGA pode ser resolvido para diferentes valores de  $m$  para o número de veículos os quais minimizem a distância total ou, alternativamente, para determinar o número mínimo de veículos que admitam uma solução possível.

A heurística usa relaxação Lagrangeana das restrições em (4) (Baker, B.M., Sheasby, J. 1999).

#### 4. Algoritmos de Busca Local

Segundo Laport e Semet (2002), algoritmos de busca local são heurísticas para aprimorar soluções encontradas por outros métodos, freqüentemente heurísticas construtivas. Este trabalho apresenta duas heurísticas de busca local, descritas a seguir.

##### 4.1 Resequenciar Atendimentos

Esta busca local tenta trocar a ordem dos atendimentos em uma rota na tentativa de reduzir o custo. Um atendimento só pode ser trocado, na ordem de atendimento, uma única vez. A lógica dessa busca é mostrada abaixo:

BUSCA LOCAL: resequenciar atendimento;

*ENTRADA: solução viável + instância;*

*SAÍDA : solução viável atualizada;*

INÍCIO

PARA todas as rotas  $P$

PARA todos os atendimentos  $K$  pertencentes a  $P \neq$  depósito

E atendimento  $K$  não modificado na seqüência custo original = custo da rota  $P$ ;

REMOVER atendimento  $K$ ;

CALCULAR tempo de saída de cada atendimento da rota  $P$ ;

CALCULAR valor do LTA de cada atendimento da rota  $P$ ;

PARA todos os atendimentos  $L$  pertencentes a rota  $P \neq$  depósito

E atendimento  $K \neq$  atendimento original

ADICIONAR atendimento  $K$  após atendimento  $L$ ;

SE tempo viagem(atendimento  $L$ , atendimento  $K$ ) < valor do LTA do atendimento  $L+1$

CALCULAR tempo de saída de cada atendimento da rota  $P$ ;

CALCULAR custo da rota  $P$ ;

SE custo atual < custo original melhor posição = atendimento  $L$ ;

REMOVER atendimento  $K$  da rota  $P$ ;

CALCULAR tempo de saída de cada atendimento da rota  $P$ ;

CALCULAR valor do LTA de cada atendimento da rota  $P$ ;

CALCULAR custo da rota  $P$ ;

SE houve alguma melhoria na troca de lugar do atendimento  $K$

ADICIONAR atendimento  $K$  após melhor posição;

SE NÃO

ADICIONAR atendimento  $K$  no lugar original;

CALCULAR tempo de saída de cada atendimento da rota  $P$ ;

CALCULAR valor do LTA de cada atendimento da rota  $P$ ;

CALCULAR custo da rota  $P$ ;

CALCULAR custo da solução

FIM.

Onde:

LTA (Latest Time of Arrival) de um atendimento  $v_i$  nessa rota como sendo o último instante de tempo que o veículo pode chegar em  $v_i$  e ainda ter tempo de atender  $v_{i+1}, \dots, v_n$ . O conceito de LTA é importante para levar em conta as janelas de tempo de forma eficiente.

#### 4.2 Inserir atendimentos

Devido a limitações nas quantidades de veículos disponíveis, é possível que os algoritmos construtivos não consigam rotear todos os clientes, o que implica numa penalização. Esta busca local tenta inserir clientes não-atendidos para alguma rota já existente. A lógica dessa busca é mostrada abaixo:

BUSCA LOCAL inserir atendimento;

*ENTRADA: solução viável + instância + lista de atendimentos não roteados;*

*SAÍDA: solução viável atualizada + instância atualizada;*

INÍCIO

ORDERNAR lista de rotas por ordem crescente, quantidade de atendimentos por rota;

PARA todos os atendimentos K não roteados

PARA todas as rotas P E atendimento K não foi inserido em uma rota P

PARA todos os atendimentos L pertencentes a rota P

SE tempo viagem(atendimento L, atendimento K) < fechamento janela tempo do atendimento K

SE restrições do veículo da rota P são respeitadas

SE tempo viagem(atendimento L, atendimento K, atendimento L+1)  $\leq$  valor do LTA do atendimento L

ADICIONAR atendimento K na rota P entre atendimento L e L+1;

CALCULAR tempo de saída de cada atendimento da rota P;

CALCULAR novo custo da solução;

FIM.

#### 5. Análises comparativas de cenários de roteamento

Para a implementação das análises comparativas baseadas na utilização do algoritmo descrito anteriormente, foram criados dois cenários específicos:

**Cenário 1:** Pontos de venda concentrados em uma determinada região geográfica e próximos uns dos outros.

Esse cenário refere-se à situação na qual existem pontos concentrados em uma determinada área e que são muito próximos um dos outros, viabilizando a possibilidade de interação entre as rotas que realizarão o atendimento desta área.

**Cenário 2:** Pontos de venda concentrados em uma determinada região geográfica e afastados um dos outros.

Esse cenário refere-se à situação na qual se tem pontos concentrados em uma determinada área, porém, afastados um dos outros. O número de pontos atendidos, bem como a frota foram exatamente iguais ao cenário 1.

Outro aspecto importante na formação dos cenários simulados de roteamento refere-se aos itens que compõem os parâmetros de roteamento e que se colocarão como restrições a resolução das dos cenários. Esses parâmetros são: distância por rota, número de clientes por rota, tempo em rota, tempo de deslocamento, tempo de espera por rota e número de rotas, média máxima de quilômetros por hora, tempo máximo antes da hora extra e remuneração por hora e por hora extra da equipe de entrega, o custo por quilometragem percorrida e o custo por hora.

Os itens distância por rota, número de clientes por rota, tempo em rota, tempo de deslocamento, tempo de espera por rota foram calculados por intermédio da média e o maior

## ESTUDO DE HEURISTICAS PARA O ROTEAMENTO URBANO DE VEICULOS

valor registrado, em cada nível de volume, das rotas que realizam o atendimento das áreas (pontos concentrados próximos um dos outros, pontos concentrados e afastados um dos outros e pontos concentrados ao redor da Central de Distribuição – CD).

Para essa a mensuração dos valores de entrada, foram analisados cerca de 100 dias de entrega excetuando-se Domingo.

Para o desenvolvimento das análises comparativas serão consideradas 4 alternativas de roteamento conforme a figura 1 abaixo:

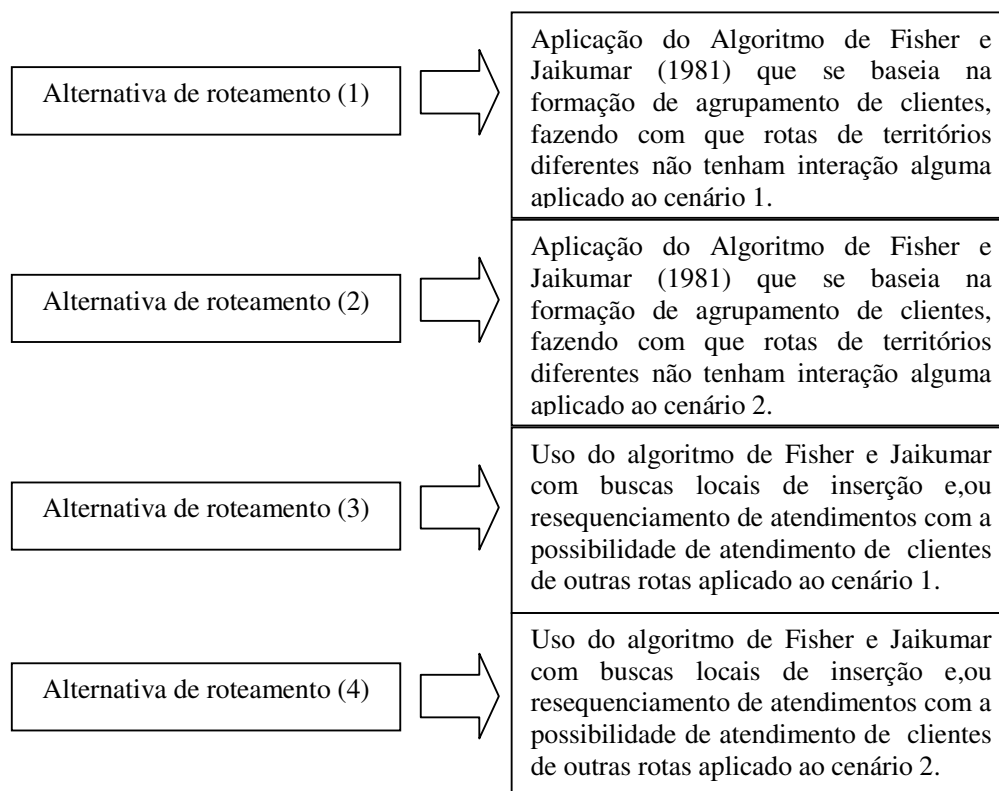


Figura 1: Relação das alternativas de roteamento em relação as suas características básicas

Os resultados das alternativas de roteamento com relação a quilometragem total das rotas, tempo total das rotas, numero de rotas, custo total operacional das alternativas e necessidade de retorno do veiculo para recarga são apresentados abaixo na tabela 1.

Tabela 1 – Resultados dos Algoritmos

Alternativas	Média de Tempo em Rota (h: mm)	Média de Km	Nº Rotas	Custo total (R\$)	Recarga (nº viagens)
Alternativa (1)	8:58	88.17	6	852,51	0
Alternativa (2)	8:48	80.04	6	790,76	0
Alternativa (3)	7:44	61.94	4	577,37	0
Alternativa (4)	7:17	58.94	4	537,37	0

Pode-se notar com os resultados acima que, apesar de os centros de gravidade de ambas as regiões relativas ao cenário 1 e cenário 2 ficarem a uma distância semelhante com relação ao

centro de distribuição da empresa e o número de pontos atendidos for exatamente o mesmo nos dois casos, o cenário 2 se mostrou mais adequado as condições dos algoritmos usados.

Tanto os tempos em rota quanto os custos para a forma geográfica do cenário 1 foram substancialmente maiores. Isso traz a discussão de que essas heurísticas, nesse caso, funcionaram melhor na situação **(d)** mostrada na figura abaixo.

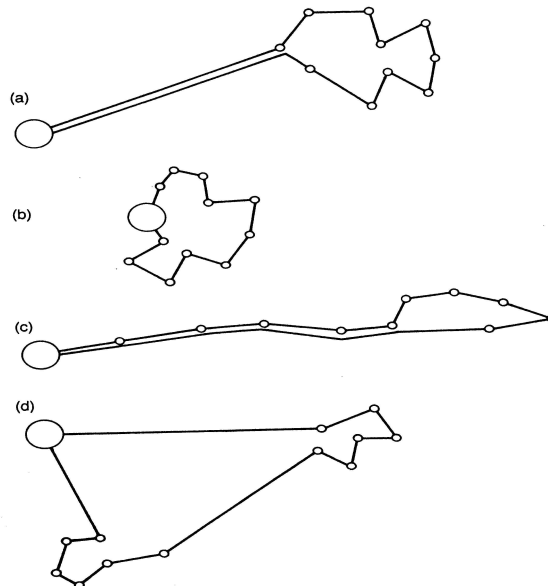


Figura 2: Possíveis formações espaciais de rotas

A figura 2 mostra as possíveis formas de distribuição espacial dos pontos a serem atendidos pelos veículos com relação a um centro de distribuição. A figura **(a)** representa a forma geográfica do cenário 1 e a figura **(d)** representa a forma geográfica do cenário 2. A figura b mostra um formato de rota onde os pontos de atendimento estão próximos e igualmente distribuídos em torno do depósito. E a figura c mostra uma distribuição desigual de pontos em rota. As distâncias entre os pontos são bem menores de um lado da rota do que do outro.

## 6. Conclusão e Comentários

O trabalho teve como objetivo, a aplicação de dois algoritmos aplicados a dois cenários espacialmente diferentes de roteamento de veículos em uma região metropolitana.

Quatro alternativas de roteamento que tiveram como característica básica o posicionamento geográfico dos pontos de venda em relação a uma central de distribuição e o tipo de algoritmo usado foram testadas.

Um melhor desempenho dos algoritmos foi encontrado para um determinado cenário espacial onde os pontos de venda estão concentrados em uma determinada região geográfica e afastados um dos outros. Nesse cenário, tanto os tempos médios em rota como os custos foram menores levando à conclusão que o algoritmo usado funciona melhor para essa situação espacial.

No entanto, as heurísticas de buscas locais aplicadas ao algoritmo construtivo usado, obtiveram um resultado substancialmente melhor também aplicado a essa situação espacial mostrando e contribuindo para a questão de que forma espacial e tipo de modelagem tem influencia direta na otimização de rotas de veículos.

## 7. Referências

- Baker, E., (2002). Evolution of vehicle routing software: case studies in the United States. The vehicle routing problem, P. Toth e D. Vigo Eds., 353-361.
- Baker, B.M., Sheasby, J. (1999). Extensions to the generalised assignment heuristic for vehicle routing. European Journal of Operation Research, v. 119, 147-157.
- Bodin, L. D.; Golden, B.; Assad, A.; Ball, M. (1983). Routing and scheduling of vehicle and crews: The state of the art. Computers and Operational Research. v.9, p. 63-212.
- Caldas, M.A.F., Lauria, R. (2002). Testes de Comparação em Algoritmos para Roteamento e Agendamento de Veículos. Anais do XXXIV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional.
- Christofides, N.; Eilon, S. (1969). An algorithm for the vehicle Dispatching problem.. Operational Research, n. 20, p. 309-318.
- Christofides, N. (1981). Uses of a vehicle routing and scheduling system in strategic distribution planning. Scandinavian Journal of Mat Admin, v.7, 39-55.
- Dantzig, G., Ramser, J., (1959). The truck dispatching Problem. Management Science, 6:81-691.
- Fisher, M. L.; Jaikumar, R. (1981). A generalized assignment heuristic for vehicle routing. Networks. v. 11, pp. 109-124.
- Golden B. L. & Assad A. A., (1998). Vehicle Routing: Methods and Studies. North-Holland, Amsterdam.
- Laporte, G. & Semet, F., (2002). Classical Heuristics for the Capacitated VRP. The vehicle routing problem, P. Toth e D. Vigo Eds, 109-128.