

**ASPECTOS PRÁTICOS DA APLICAÇÃO DE
MODELOS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS A
PROBLEMAS REAIS**

Claudio Barbieri da Cunha

Departamento de Engenharia de Transportes
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

**Artigo publicado na Revista da ANPET
Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em
Transportes**

ARTIGO

ASPECTOS PRÁTICOS DA APLICAÇÃO DE MODELOS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS A PROBLEMAS REAIS

Claudio Barbieri da Cunha

Departamento de Engenharia de Transportes
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo discutir aspectos práticos que afetam a aplicação de modelos matemáticos a problemas de roteirização de veículos, com destaque para condicionantes encontrados em aplicações reais. Alguns desses condicionantes são específicos da realidade brasileira e podem afetar o desempenho e a qualidade das soluções obtidas através de pacotes comerciais disponíveis no mercado. Por outro lado, apontam para oportunidades desafiadoras de desenvolvimento de novos algoritmos de solução. O artigo também trata aspectos do levantamento de dados, em especial de dados espaciais e sua influência na qualidade das soluções.

ABSTRACT

In this paper practical issues regarding the use of mathematical models to vehicle routing problems are presented and discussed, with emphasis to constraints found in real world applications. Some of them are specific of the Brazilian environment and may affect the performance and the quality of solutions produced by commercial software packages available on the market. On the other hand, they may provide exciting research opportunities for developing new algorithms. Data acquisition issues are also addressed, specially geographic data and its influence on the accuracy of solutions provided by commercial packages.

1. INTRODUÇÃO

O termo *roteirização* de veículos, embora não encontrado nos dicionários de língua portuguesa, é a forma que vem sendo utilizada como equivalente ao inglês “*routing*” (ou “*routeing*”) para designar o processo para a determinação de um ou mais roteiros ou seqüências de paradas a serem cumpridos por veículos de uma frota, objetivando visitar um conjunto de pontos geograficamente dispersos, em locais pré-determinados, que necessitam de atendimento. O termo *roteamento* de veículos também é utilizado alternativamente por alguns autores (Cunha, 1997).

Segundo Laporte *et al.* (2000) o problema de roteirização de veículos consiste em definir roteiros de veículos que minimizem o custo total de atendimento, cada um dos quais iniciando e terminando 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.

Quando a definição dos roteiros envolve não só aspectos espaciais ou geográficos, mas também temporais, tais como restrições de horários de atendimento nos pontos a serem visitados, os problemas são então denominados roteirização e programação de veículos (Cunha, 1997).

De acordo com Assad (1988), a roteirização de veículos consiste em uma das histórias de grande sucesso da Pesquisa Operacional nas últimas décadas. Isto pode ser medido pelo expressivo número de artigos que vêm sendo publicados ao longo dos anos na literatura especializada, incluindo os anais de congressos da ANPET.

O primeiro problema de roteirização a ser estudado foi o do folclórico caixeiro viajante (no inglês “*traveling salesman problem*” ou TSP), que consiste em encontrar o roteiro ou seqüência de cidades a serem visitadas por um caixeiro viajante que minimize a distância total percorrida e assegure que cada cidade seja visitada exatamente uma vez.

Desde então, novas restrições vêm sendo incorporadas ao problema do caixeiro viajante, de modo a melhor representar os diferentes

tipos de problemas que envolvem roteiros de pessoas e veículos, entre as quais: restrições de horário de atendimento (conhecidas na literatura como janelas de tempo ou janelas horárias); capacidades dos veículos; frota composta de veículos de diferentes tamanhos; duração máxima dos roteiros dos veículos (tempo ou distância); restrições de tipos de veículos que podem atender determinados clientes.

Problemas de roteirização de veículos são muitas vezes definidos como problemas de múltiplos caixeiros viajantes com restrições adicionais de capacidade, além de outras que dependem de cada aplicação.

Problemas do tipo caixeiro viajante também são encontrados em outras áreas que não a logística ou operação de frotas, tais como em linhas de montagem de componentes eletrônicos, onde se busca encontrar, por exemplo, o roteiro de mínima distância para um equipamento cuja tarefa é soldar todos os componentes de uma placa eletrônica. O menor percurso total do equipamento para percorrer todos os pontos da placa está diretamente associado ao desempenho da linha (Souza, 1993).

Sob a ótica de otimização, os problemas de roteirização de veículos, incluindo o caso particular do caixeiro viajante, pertencem à categoria conhecida como *NP-difícil* (do inglês “*NP-hard*”), o que significa que possuem ordem de complexidade exponencial. Em outras palavras, o esforço computacional para a sua resolução cresce exponencialmente com o tamanho do problema (dado pelo número de pontos a serem atendidos). A título de ilustração, até hoje não são conhecidas as respectivas soluções ótimas para algumas instâncias de problemas de roteirização com restrições de janelas de tempo com apenas 100 nós, propostos por Solomon (1986) e que vêm sendo utilizadas para a avaliação comparativa de novos algoritmos de solução propostos na literatura (Cunha, 1997).

Em termos práticos, isto significa que não é possível resolver até a otimalidade problemas reais pertencentes à classe *NP-difícil*. Consequentemente, os métodos de solução de todos os *softwares* e aplicativos comerciais encontrados no mercado para roteirização de

veículos são heurísticos, isto é, não asseguram a obtenção da solução ótima do ponto de vista matemático.

Essa complexidade matemática dos problemas de roteirização, assim como a sua relevância no contexto logístico atual, explicam o constante interesse em busca de novas estratégias de solução que vem sendo observado desde a década de 60, resultando em um número muito expressivo de artigos publicados na literatura especializada.

Isto decorre do fato de que, sendo as estratégias de solução heurísticas, muitas vezes se apoiam em uma abordagem intuitiva, na qual a estrutura particular do problema possa ser considerada e explorada de forma inteligente, para a obtenção de uma solução adequada (Cunha, 1997). Assim, na maioria dos casos, as heurísticas propostas são bastante específicas e particulares, e carecem de robustez, isto é, não conseguem obter boas soluções para problemas com características, condicionantes ou restrições às vezes um pouco diferentes daquelas para as quais foram desenvolvidas. Em outras palavras, roteirização de veículos é uma área onde uma solução para um determinado tipo de problema e dados pode não ser adequada para outro problema similar, conforme apontado por Hall e Partyka (1997). Daí, em muitos casos, a necessidade de buscar soluções customizadas para cada problema.

Por outro lado, o interesse e a demanda pela aplicação de modelos de roteirização para problema reais, através de *softwares* comerciais disponíveis no mercado, têm crescido muito nos últimos anos, em particular no Brasil, principalmente após a estabilização da economia, conforme discutido em detalhes por Cunha (1997). Entre as razões pode-se destacar as exigências dos clientes com relação a prazos, datas e horários de atendimento (principalmente entregas); o agravamento dos problemas de trânsito, acesso, circulação e estacionamento de veículos nos centro urbanos, em particular caminhões; o aumento da competição pelo mercado e a busca de eficiência trazidas pela eliminação da inflação; o custo de capital levando à redução de estoques e ao aumento da frequência de entregas.

Tem se observado em diversas aplicações, principalmente no caso brasileiro, que, embora a seleção e a implantação de *softwares* de roteirização tenha sido feita com cuidado, os benefícios obtidos com a sua utilização resultam aquém das expectativas iniciais, mesmo em se tratando de produtos consagrados no mercado.

Isso decorre nem sempre da fragilidade dos algoritmos de solução incorporados nos *softwares*, na maioria das vezes extensivamente testados e validados, com inúmeras histórias de sucesso nos seus países de origem, mas principalmente de condicionantes locais e particularidades dos problemas que não podem ser considerados, assim como da fragilidade dos dados de entrada que alimentam os modelos.

Deve-se destacar ainda dificuldades na etapa de escolha do produto. O fato da maioria desses produtos serem verdadeiras caixas pretas em termos dos seus algoritmos de solução, conforme apontado por Hall e Partyka (1997), e o pouco conhecimento técnico especializado por parte dos representantes locais, acabam levando a escolhas que posteriormente se mostram equivocadas, uma vez que os *softwares* nem sempre conseguem atender às necessidades para os quais foram adquiridos.

Assim, os objetivos deste trabalho compreendem:

- retratar os diferentes tipos de problemas que envolvem roteirização de veículos e as formas de classificação propostas na literatura;
- apresentar e discutir alguns aspectos e condicionantes que afetam o uso de roteirizadores, com ênfase para peculiaridades locais, que nem sempre estão ou podem ser incorporadas aos pacotes existentes no mercado;
- discutir dificuldades na obtenção, na manutenção e na atualização dos dados de entrada para os modelos, que acabam interferindo na qualidade dos resultados obtidos.

Para uma análise dos principais algoritmos e estratégias de solução encontrados na literatura, sugere-se, como ponto de partida, consultar as revisões encontradas em Bodin *et al.* (1983), Laporte (1992), Cunha (1997) e Laporte *et al.* (2000).

No próximo item é apresentada uma caracterização dos principais tipos de problemas que envolvem a roteirização de veículos. Já no item 3 parte-se dos principais atributos para um *software* de roteirização para discutir aspectos específicos da realidade brasileira que não podem ser tratados pelos produtos disponíveis no mercado. O item 4 aborda a questão das formas alternativas de representação dos dados dos pontos de atendimento e da malha, discutindo os *trade-offs* entre uma representação mais precisa e o esforço para manter e atualizar os dados. As considerações finais estão no item 5.

2. CARACTERIZAÇÃO DOS PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS

A roteirização de veículos envolve um conjunto muito grande de diferentes tipos de problemas. Neste item serão apresentadas algumas propostas encontradas na literatura de taxonomia que tentam caracterizar o universo de problemas de roteirização.

BODIN *et al.* (1983) apresentaram o primeiro trabalho abrangente que retratava o estado-da-arte da modelagem de problemas de roteirização e programação de veículos e tripulações. Ainda hoje é considerada uma das importantes referências sobre o assunto, pois são considerados inúmeros tipos de problemas. Para os autores os problemas de roteirização podem ser do tipo roteirização pura ou combinados de roteirização e programação.

Nos problemas de *roteirização pura*, condicionantes temporais não são importantes para a definição dos roteiros e das seqüências de atendimentos (coletas ou entregas). As estratégias de solução são direcionadas aos aspectos espaciais da localização dos pontos a serem atendidos. Os principais tipos de problemas de roteirização pura são relacionados no Quadro 1.

Quadro 1: Classificação dos problemas de roteirização pura

Denominação	número de roteiros	localização dos clientes	limite de capacidade nos veículos	número de bases	demandas
Problema do caixeiro viajante	um	nós	não	uma	determinísticas
Problema do carteiro chinês	um	arcos	não	uma	determinísticas
Problema de múltiplos caixeiros viajantes	múltiplos	nós	não	uma	determinísticas
Problema de roteirização em nós com uma única base	múltiplos	nós	sim	uma	determinísticas
Problema de roteirização em nós com múltiplas bases	Múltiplos	nós	sim	múltiplas	determinísticas
Problema de roteirização em nós com demandas incertas	Múltiplos	nós	sim	uma	estocásticas
Problema de roteirização em arcos com limite de capacidade	Múltiplos	arcos	sim	uma	determinísticas

Fonte: Adaptado de Bodin *et al.* (1983)

Deve-se observar que os problemas listados derivam do problema clássico do caixeiro viajante, com exceção do problema do carteiro chinês, em que a demanda se localiza nos arcos ao invés de nos nós e a otimização envolve os percursos ociosos, já que o veículo precisa passar em todos os arcos uma vez para atendimento.

Segundo Bodin *et al.* (1983), a maioria dos problemas *combinados de roteirização e programação*, ou simplesmente problemas de roteirização

e programação, ocorrem em situações em que estão presentes restrições de janelas de tempo (horário de atendimento) e de precedência entre tarefas (coleta deve preceder a entrega e ambas devem estar alocadas ao mesmo veículo).

Os principais problemas típicos apontados pelos autores são os seguintes:

- o problema de roteirização e programação de ônibus escolares para atendimento de um conjunto de escolas;
- o problema de roteirização e programação de cavalos mecânicos tracionando carretas com carga completa: cada carreta é tracionada individualmente de um ponto de origem para um ponto de destino.
- o problema de definição de roteiros e programação de serviços de coleta de resíduos domiciliares e de varrição de ruas, semelhante ao problema do carteiro chinês, porém com restrições de capacidade dos veículos, de duração máxima da jornada e de janelas de tempo associadas aos horários de proibição de estacionamento, de forma a possibilitar a execução do serviço de varrição.
- o problema de roteirização e programação de serviços de transporte de pessoas, conhecidos como “dial-a-ride”, em geral para o transporte porta-a-porta de idosos e deficientes; cada usuário possui locais de origem e de destino distintos e eventualmente janelas de tempo; a precedência entre tarefas é uma restrição fundamental a ser considerada.

Os autores consideraram ainda uma terceira categoria, que abrange problemas de programação de veículos e tripulações, nos quais os aspectos espaciais já estão definidos (roteiros ou seqüências de viagens a serem realizadas), restando definir a alocação de veículos e tripulações ao conjunto de viagens programadas. Problemas de programação veículos e tripulações são encontrados no transporte aéreo, ferroviário, por ônibus, etc.

Já Ronen (1988) propôs uma classificação dos diversos problemas de roteamento e programação de veículos baseada nos ambientes operacionais e objetivos a serem alcançados:

- problemas relativos ao transporte de passageiros: programação de linhas de ônibus; de sistemas de táxi; de sistemas de transporte de pessoas, em geral idosos e deficientes, conhecidos como “dial-a-ride”; de transporte de escolares por ônibus, entre outros;
- problemas de prestação de serviços: roteirização e programação de equipes de reparos ou de serviços públicos, tais como de coleta de lixo, entrega postal, varrição de ruas e leitura de parquímetros, entre outros;
- problemas relativos ao transporte de carga (coleta e distribuição).

Hall e Partyka (1997) adotam a mesma forma de classificação proposta por Ronen (1988). Todos os tipos de problemas citados acima são de natureza essencialmente operacional, ou seja, fazem parte das tarefas rotineiras de programação da frota, realizadas regularmente com periodicidade de curto prazo, em geral diária ou semanal.

Além destes, são encontrados na literatura problemas de roteirização de natureza mais tática ou estratégica do que operacional, tais como: problemas integrados de localização e roteirização; problemas integrados de estoque e roteirização, nos quais a programação dos atendimentos deve levar em consideração não só aspectos espaciais e os custos dos roteiros, como também questões como o nível de estoque; problemas de faturamento e roteirização, nos quais é preciso definir simultaneamente quem vai ser atendido a cada dia de um período de tempo pré-determinado; entre outros.

3. REQUISITOS DE UM SOFTWARE PARA ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS

Assad (1988) propôs um conjunto de elementos para caracterização geral dos problemas de roteirização, que podem ser utilizados para a especificação dos atributos e requisitos de um *software* a ser adquirido ou de um modelo de roteirização a ser desenvolvido:

- natureza e características dos atendimentos: somente coletas ou entregas; coletas de retorno (“*backhauls*”); um único produto ou múltiplos produtos; atendimento parcial ou total da demanda; conhecimento das demanda a priori; existência de incertezas na demanda; necessidade de programação de visitas periódicas com frequências definidas; prioridade de atendimentos;
- frota de veículos: homogênea ou heterogênea; restrições de capacidade (peso ou volume); restrições de carregamento/equipamento; vínculo entre o tipo de veículo e o local da base; compatibilidade entre o tipo de veículo e o tipo de produto a ser transportado; frota fixa ou variável; frota localizada em uma única base ou em múltiplas bases;
- requisitos de pessoal: duração da jornada normal de trabalho; opção e número de horas extras; número fixo ou variável de motoristas; horários e locais de início e término das jornadas de trabalho do pessoal; parada para almoço com hora marcada e outros tipos de parada (para descanso, por exemplo); possibilidade de viagens com duração superior a um dia;
- requisitos de programação: atendimento de clientes em um dado dia da semana; janelas de tempo para coleta e entrega (rígidas ou flexíveis); tempos de carga e descarga; horários de abertura/fechamento;
- requisitos de informações: disponibilidade de dados geográficos e redes viárias; recursos de localização de endereços dos clientes; tempos de viagem; localização dos veículos; informações sobre crédito dos clientes.

O quadro 2 sintetiza os principais condicionantes e requisitos desejáveis para um *software* comercial genérico para roteirização de veículos, segundo as visões de Assad (1988), Ronen (1988) e Bodin (1990). Essa relação de atributos pode ser utilizada como ponto de partida num processo de seleção, para definir uma lista de verificação dos condicionantes práticos que um *software* de roteirização deve poder lidar para uma dada aplicação prática.

Quadro 2: Requisitos e características de sistemas para roteirização de veículos

CARACTERÍSTICA	ASSAD (1988)	RONEN (1988)	BODIN (1990)
Uma ou múltiplas bases	Sim	Sim	Sim
Diferentes tipos de veículos	Sim	-	Sim
Coletas e entregas – coletas de retorno (“backhauls”)	Sim	Sim	Sim
Janelas de tempo	Sim	Sim	Sim
Tempos de carga e descarga	Sim	-	-
Velocidades variáveis	Sim	-	-
Contratação de terceiros	Sim	Sim	-
Limite de peso e volume	Sim	Sim	-
Múltiplos compartimentos por veículo	-	Sim	-
Duração máxima do roteiro	Sim	Sim	Sim
Contabilização de horas extras	Sim	-	Sim
Horários de início e término de viagem	Sim	-	-
Roteiros com pernoite; troca de motoristas	Sim	Sim	-
Locais de parada fixos (e.g. almoço)	Sim	-	-
Restrições de tamanho de veículo e equipamentos para um cliente	Sim	-	Sim
Zonas de entregas e possibilidade de fracionamento de carga;	Sim	-	-
Barreiras físicas e restrições de circulação de veículos	Sim	Sim	-
Mais de um roteiro por veículo (quando veículo retorna cedo à base)	Sim	-	-

3.1. Sistemas comerciais para a roteirização de veículos

Hall e Partyka (1997) realizaram a mais recente pesquisa conhecida para identificar os principais características de 20 diferentes *softwares* de roteirização disponíveis no mercado.

Em particular no mercado brasileiro, até há alguns anos atrás havia apenas uma opção disponível de *software* de roteirização (o Trucks, não relacionado no trabalho dos autores). Mais recentemente tornaram-se disponíveis no mercado vários outros, tais como o Truckstops, o RoadShow, o RouteSmart, todos desenvolvidos por empresas estrangeiras e relacionados no levantamento de Hall e Partyka (1997), além de alguns desenvolvidos localmente, como, por exemplo, o RotaCerta.

As informações levantadas abrangeram: o ano que cada produto foi lançado; as plataformas em que ele pode ser processado (Windows, Mac, Unix, etc.) e os requisitos mínimos de *hardware*; o número máximo de paradas, de veículos e de terminais que podem ser considerados; preço; possíveis interfaces com Sistemas de Informações Geográficas (SIG); se permitem roteirização em nós e arcos (problemas do tipo carteiro chinês); consideração de janelas de tempo rígidas (não podem ser violadas) ou flexíveis (penalidade pela violação); e implantações mais significativas.

Os autores ressaltam não ter sido realizada nenhuma avaliação do desempenho comparativo dos *softwares*, em termos de qualidade das soluções obtidas, de robustez (capacidade de resolver adequadamente diferentes instâncias) e de desempenho computacional (tempo de processamento e memória requerida).

Destacam ainda a importância de roteiros que podem ser alterados dinamicamente, quando os veículos estão na rua, em função de novas solicitações de atendimento que são recebidas e tem que ser inseridas na programação de algum veículo. É o caso, por exemplo, de alguns sistemas de transporte de passageiros do tipo “*dial-a-ride*”. É também a realidade da maioria das empresas de carga expressa, do tipo “*courier*” (como, por exemplo, a FedEx ou a DHL) em que as coletas se dão num curto período de tempo após a solicitação, por veículos que já estão nas ruas.

3.2. A utilização dos sistemas comerciais no contexto da distribuição no Brasil

Muitos dos pacotes disponíveis no mercado brasileiro são bastante sofisticados e poderosos em termos de recursos e de possibilidades de consideração de diversos tipos de restrições, e foram bem testados e validados em diferentes tipos de problemas. Por outro lado, sua implantação tem exigido, às vezes, investimentos e recursos significativos, além de tempo para a preparação de bases de dados e para treinamento para utilização, até que estejam em condições operacionais para a sua efetiva utilização no dia-a-dia das empresas.

Um aspecto importante a ser destacado é que, embora a maioria dos modelos se proponham a otimizar a roteirização, na prática nem sempre os algoritmos conseguem levar em consideração todas as parcelas dos custos de operação, que compreendem não só os custos variáveis com a distância percorrida, como também os custos fixos dos veículos e os custos horários da tripulação (incluindo a decisão de utilizar ou não horas extras da tripulação para reduzir a necessidade de frota e a quilometragem percorrida).

Em muitos casos, as heurísticas embutidas nos *softwares* produzem soluções que correspondem a algum tipo de sub-otimização, buscando prioritariamente minimizar a frota e, em seguida, a distância total percorrida. Isso decorre do fato de que as heurísticas clássicas em que se apoiam os softwares, tais como as heurísticas de economias (Clarke e Wright, 1964), de varredura (Wren e Holiday, 1972; Gillet e Miller, 1974) e outras do tipo agrupa-primeiro e roteiriza depois (Fisher e Jaikumar, 1981) se baseiam em medidas de distâncias ou tempos de viagem e não consideram outras parcelas de custo.

Mais recentemente, em particular na última década, o esforço de pesquisa vem sendo direcionado ao desenvolvimento das chamadas meta-heurísticas. Elas englobam as estratégias e técnicas mais recentes e avançadas, não tradicionais, que são baseadas em sistemas especialistas, métodos de busca e, principalmente, procedimentos iterativos com alguma inteligência no processo de busca.

A consideração em separado de diversos métodos nesta categoria foi proposta por Souza (1993) e é decorrente do fato de que suas características são diferentes dos métodos heurísticos tradicionais. A idéia é explorar de maneira mais inteligente as regiões mais promissoras do espaço de soluções.

No caso da roteirização de veículos, segundo Laporte *et. al.* (2000), a busca tabu (do inglês *tabu search*) corresponde a meta-heurística com resultados mais promissores. Entretanto, os autores destacam que, embora a qualidade das soluções obtidas através de meta-heurísticas seja muito superior às das heurísticas convencionais, os tempos computacionais ainda são elevados, o que dificulta a sua incorporação às aplicações comerciais. Adicionalmente, segundo os autores, as meta-heurísticas são muito dependentes do contexto e requerem ajuste fino de parâmetros de processamento caso a caso, o que também inviabiliza sua utilização em *softwares* comerciais.

Assim, questões como o uso de mais veículos pequenos percorrendo uma distância total menor *versus* menos veículos grandes percorrendo uma distância total maior não são possíveis de serem avaliadas no processo de otimização dos roteiros.

A definição dos roteiros em que é mais vantajoso o uso de frota própria ou é melhor utilizar serviços de terceiros, de modo a otimizar o custo total (da utilização da frota própria e do total de frete pago a terceiros) é outro aspecto em que as especificidades da realidade brasileira na contratação de terceiros, particularmente nas operações de coleta e distribuição urbanas, não conseguem ser representadas nos *softwares* de roteirização disponíveis no mercado.

Isso ocorre porque, no Brasil, os fretes pagos nem sempre são calculados com base na distância percorrida pelos veículos. Nas contratações de terceiros para serviços de coletas e entregas urbanas, a prática mais comum é o pagamento segundo a quantidade total transportada pelo veículo (medida pelo peso, volume, número de caixas, etc.) e segundo o número de paradas do roteiro. Nas grandes cidades, usualmente a contratação pode prever ainda valores diferenciados de fretes unitários por região ou por área a ser atendida, de modo a considerar uma maior “*dificuldade*” espacial

(locais mais distantes, na periferia, com sistema viário deficiente, com entregas mais dispersas, etc.). Há situações em que o frete de todas as entregas é calculado com base na entrega mais distante ou “*difícil*”.

O problema ocorre porque nenhum software de roteirização disponível no mercado permite considerar esse tipo particular de estrutura de custo, desvinculada da distância efetivamente percorrida, levando a soluções onde os custos com a distância e com a frota própria sejam minimizados, o que não necessariamente corresponde à solução de menor custo quando há terceiros realizando parte dos atendimentos.

Os pacotes comerciais também não consideram, na definição dos roteiros, o problema do arranjo da carga em cada veículo. Em entregas (e coletas) cujas cargas apresentem dimensões muito diversas (grandes e pequenos pesos e/ou volumes), como as encontradas, por exemplo, em entregas de lojas de departamento e de supermercados (por exemplo, geladeiras ao lado de batedeiras portáteis), o arranjo das cargas dentro do veículo pode ser decisivo para a otimização da distribuição. Em outras palavras, o conjunto de roteiros de menor distância total pode levar a um baixo aproveitamento do espaço de carga dos veículos, como também à impossibilidade de carregamento do veículo, ou a arranjos, por exemplo, em que cargas que estão na parte da frente de uma carroceria baú tenham que ser retiradas ou movimentadas para que outras cargas possam ser descarregadas, acarretando aumentos não previstos nos tempos de parada. Tal tipo de restrição pode até inviabilizar o cumprimento dos roteiros programados.

4. ATRIBUTOS ESPACIAIS PARA O PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO

Nas formulações matemáticas de problemas de roteirização de veículos pressupõe-se ser conhecido um grafo ou rede $G=(N, A)$ composto de um conjunto de nós N , que representa um conjunto de pontos a serem atendidos e a base onde se localizam os veículos, e um conjunto de arcos A , representando as ligações entre todos os pares de nós em N , para os quais são conhecidas as distâncias e os tempos de viagem.

Assim, o processamento de um algoritmo para um problema de roteirização deve ser precedido pela etapa de obtenção do grafo G . Isto envolve a localização geográfica ou espacial dos pontos de atendimento e a determinação das distâncias e dos tempos de viagem entre os mesmos. Este é um aspecto pouco discutido, mas de fundamental importância para a aplicação de modelos matemáticos a problemas reais de roteirização, uma vez que, em muitos casos, a forma como o grafo G é obtido e representado pode ser decisiva para a qualidade dos resultados obtidos e para a viabilidade de execução dos roteiros; às vezes tanto quanto a qualidade dos algoritmos de solução.

4.1. Formas de representação do grafo

Alguns *softwares* adotam um modelo mais simplificado para determinação do grafo: os pontos de atendimento e a base onde se localizam os veículos são representados através de algum sistema de coordenadas, geralmente cartesianas ou georeferenciadas (latitude e longitude).

Neste caso, as distâncias nos arcos são calculadas com base nas coordenadas dos pontos, segundo alguma métrica (distância Euclideana ou retangular), podendo ser ajustadas por fatores de correção, de forma a considerar o percurso adicional decorrente do sistema viário, conforme discutido por Novaes (1989). Os tempos de viagem são calculados com base nas distâncias e em velocidades médias, que podem variar segundo o tipo de veículo, ou ainda segundo as zonas onde se localizam os pontos de origem e de destino e segundo a distância a ser percorrida.

Alguns *softwares* oferecem ainda o recurso adicional de cadastramento de barreiras geográficas, através de linhas ou polígonos, de modo a representar obstáculos naturais (tais como rios, montanhas, lagos, parques, etc.) ou artificiais (ferrovias, rodovias expressas, etc.) que não podem ser atravessados. Nesse caso, no cálculo das distâncias (em linha reta) é considerado o percurso adicional para contornar o obstáculo ou para a sua transposição através de pontos específicos (tais como pontes sobre rios).

Já outros *softwares* possuem interfaces com mapas digitais georeferenciados ou Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para representar os pontos de atendimento e a malha viária por onde trafegam os veículos. Um SIG possibilita a localização automática de clientes e endereços. A distância e o tempo de viagem em cada um dos arcos A do grafo G são obtidos através do processamento prévio de algum algoritmo de caminhos mínimos, aplicado à malha viária da região de interesse. Assim, um *software* de roteirização não opera diretamente sobre o banco de dados da malha viária, a qual pode conter até centenas de milhares de trechos de vias cadastrados.

Mais informações sobre a utilização de SIG's associados a modelos de Pesquisa Operacional, incluindo aplicações a problemas de roteirização de veículos, são encontradas em Koch (1999).

4.2. Aspectos favoráveis e desfavoráveis

A decisão quanto à melhor forma de obtenção de um grafo, a partir de uma representação simplificada através de coordenadas ou de um banco de dados acoplado a um mapa digital depende de cada situação e também da natureza do ambiente de operação. No contexto espacial, pode-se dividir os problemas em duas categorias distintas: a dos roteiros urbanos e a dos interurbanos / regionais.

Na distribuição urbana, o problema é mais complexo, pois o sistema viário é mais denso, o número de alternativas de roteiros é muito superior (é possível ir de algum ponto a qualquer outro) e as restrições de circulação são mais severas (restrições de circulação, mãos de direção, movimentos permitidos e proibidos, tais como conversões, retornos, etc.). Tal situação recomendaria uma representação mais realista da malha viária, através de mapas digitais.

Por outro lado, segundo Bodin (1990), criar e manter um SIG pode implicar um aumento significativo no custo de um sistema completo de roteirização e programação de veículos. A manutenção e a atualização de uma base de dados de informações viárias é particularmente crítica, principalmente em cidades maiores, nas

quais há mudanças freqüentes de mão de direção e de restrições à circulação de veículos (conversões e outros movimentos proibidos).

Além de tudo isso, as bases geográficas armazenam um único valor de tempo ou velocidade em cada trecho da malha, que independe do horário do dia. Em regiões urbanas mais congestionadas, a consideração de velocidades médias ou de tempos de viagem que variam segundo o horário do dia, refletindo períodos de gargalo e congestionamento, são fundamentais para o sucesso da roteirização, principalmente quando restrições temporais, como janelas de tempo, estão envolvidas.

Adicionalmente, no caso brasileiro, ainda não há mapas digitais da malha viária para a grande maioria dos municípios, com exceção de algumas capitais e cidades mais importantes. Mesmo onde disponíveis, tais bases nem sempre abrangem toda a malha viária, nem tampouco contêm informações de mãos de direção, de movimentos permitidos e proibidos e de velocidades e tempos de viagem suficientemente acurados.

Já na roteirização em nível regional, as distâncias entre pontos de atendimento (em geral, diferentes cidades) são geralmente mais longas, a malha muito menor em termos de extensão, assim como o número de trechos. Além disso, são menores as incertezas associadas às restrições e condicionantes de tráfego. Nesse contexto, não é difícil montar um cadastro rodoviário que contenha a matriz de distâncias e tempos de viagem entre cidades de interesse (onde se localizam clientes e/ou atendimentos), sem a necessidade de recorrer a coordenadas cartesianas ou à digitalização de mapas. Em geral esta matriz é suficiente para a obtenção de uma roteirização razoavelmente acurada, em termos de distâncias e seqüências de entregas.

Assim, fica nítido um “*trade-off*” a ser avaliado, caso a caso, entre a maior precisão e realismo proporcionados pela representação geográfica detalhada do grafo através de um SIG ou mapa digital, que exige o processamento prévio dos caminhos mínimos para a montagem do grafo e o impacto que acarretam no desempenho computacional do sistema (maior tempo e recursos de

processamento), em comparação com o cálculo simplificado de distâncias euclidianas (que podem considerar barreiras geográficas).

A questão da utilização de coordenadas cartesianas ou redes matemáticas para representar os pontos de atendimento depende primordialmente da necessidade de precisão quanto aos roteiros e programações de atendimentos e o esforço necessário para manter essas informações atualizadas.

Finalmente, um último aspecto a ser destacado refere-se aos problemas de localização dos pontos de atendimento, uma fonte de erros e imprecisões que afetam a qualidade dos roteiros obtidos. De nada adianta um algoritmo muito eficiente, se os pontos estão localizados incorretamente. Este problema é mais comum do que se imagina, e particularmente crítico em sistemas de atendimento em que os pontos mudam diariamente (como ocorre em serviços do tipo *courier*, serviços de entrega ou atendimento domiciliar, etc.). O recurso de localização automática de endereços (conhecido como “*address matching*”) apresenta dificuldades no caso brasileiro, decorrentes tanto da imprecisão do cadastro (falta de CEP ou incorreto) quanto da existência de mais de um logradouro com o mesmo nome em regiões metropolitanas, ruas sem nome (rua A, B, etc.), de endereços que não constam do cadastro oficial (geralmente em áreas de periferia), entre outros.

Há que se considerar ainda que no meio urbano, problemas com muitos atendimentos por veículo, geralmente em que os pontos estão muito próximos entre si, como por exemplo, na distribuição de bebidas, cigarros ou jornais, o detalhe mais microscópico da malha viária, das mãos de direção e dos movimentos permitidos e proibidos pode ser fundamental para que os roteiros programados possam ser efetivamente cumpridos na prática. Neste caso, até a própria localização geográfica dos pontos de entrega pode afetar os resultados. Alguns *softwares* localizam geograficamente os pontos de atendimento nos cruzamentos de ruas, outros no meio da quadra. Dependendo da proximidade entre os pontos e do peso/volume da carga a ser movimentada (como no caso de bebidas), uma localização deficiente pode inviabilizar o cumprimento da sequência de entregas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A importância da roteirização de veículos, bem como a diversidade de problemas do mundo real e a sua complexidade computacional, têm desafiado os pesquisadores no sentido de se buscarem novos algoritmos que permitam obter melhores resultados e resolver problemas de dimensões crescentes e cada vez mais complexos, além de incorporar restrições que permitam tornar mais realistas os modelos que os representam.

Por outro lado, pouco se tem discutido na literatura sobre os requisitos e condicionantes a serem considerados na escolha de softwares de roteirização disponíveis no mercado. Os trabalhos mais recentes encontrados datam de cerca de 10 anos atrás, embora muitos desses requisitos e condicionantes ainda sejam válidos e atuais nos dias de hoje. Além disso, pouco se conhece sobre os produtos disponíveis no mercado.

Tal desconhecimento sobre o assunto acaba levando a resultados muitas vezes insatisfatórios, mesmo com a utilização de sofisticados pacotes de roteirização. A complexidade computacional desta categoria de problemas obriga a adoção de estratégias de solução heurísticas, que nem sempre apresentam bom desempenho quando as restrições e condicionantes do problema diferem daquelas consideradas na sua concepção.

Na prática, isto significa que não existe um único produto ou solução que seja capaz de resolver todos os problemas. Conforme foi visto no item 2, roteirização de veículos engloba um conjunto de problemas distintos que requerem, muitas vezes, estratégias de solução diferentes.

O levantamento dos produtos disponíveis no mercado, realizado por Hall e Partyka (1997), embora abrangente e razoavelmente recente, baseou-se apenas em informações obtidas junto às empresas que desenvolveram os *softwares*. O trabalho não contemplou uma avaliação mais detalhada dos inúmeros tipos de restrições e condicionantes encontradas na prática que os *softwares* permitem considerar, tomando por base, por exemplo, a relação apresentada no

Quadro 1. O trabalho tampouco tratou da qualidade dos resultados obtidos e da facilidade de utilização e interface com o usuário. Pouco se sabe sobre os algoritmos de solução dos pacotes disponíveis comercialmente, nem tampouco se os novos métodos de solução sendo pesquisados estão sendo de alguma forma incorporados.

Os principais requisitos e condicionantes dos softwares de roteirização relacionados no Quadro 1 podem ainda servir como guia para a auxiliar na escolha de uma solução disponível no mercado. Foram identificadas algumas algumas restrições e características encontradas em problemas da realidade brasileira que não podem ser consideradas nos pacotes disponíveis no mercado, embora sejam fundamentais para a otimização. Entre elas, o sistema de cálculo de custos de fretes de terceiros e o problema de arranjo da carga no veículo constituem excelentes oportunidades de pesquisa de novas estratégias de solução mais adequadas à realidade brasileira.

Há de se considerar ainda que, num futuro breve, os pacotes de roteirização devem cada vez mais deixar de serem ferramentas de otimização isoladas e se integrarem aos diversos sistemas e bancos de dados das empresas, entre os quais os de pedidos, cadastro de clientes e faturamento e até ferramentas do tipo ERP – “*Enterprise Resource Planning*”. Além disso, espera-se que os sistemas de roteirização venham a se integrar também aos sistemas de rastreamento de veículos via GPS, possibilitando a alteração dinâmica e em tempo real de roteiros, de forma a atender novas solicitações, além de proverem uma retro-alimentação dos dados das viagens realizadas de forma a permitir o ajuste e o aprimoramento das bases de dados de tempos de viagem e distâncias.

Discutiu-se ainda a importância da forma de representação dos dados especiais de clientes e do sistema viário para a qualidade dos roteiros gerados. Se, por um lado as formas de representação apoiadas em Sistemas de Informações Geográficas permitem produzir resultados mais precisos e realistas, por outro lado, para problemas no ambiente urbano das grandes cidades, a consideração de velocidades e tempos de viagem que variem ao longo do dia, refletindo as variações das condições de trânsito, podem ser

fundamentais para que os roteiros programados se tornem exequíveis na prática.

Assim, considerando ainda a não disponibilidade de mapas digitais, para algumas categorias de problemas, uma representação mais simplificada através de coordenadas pode produzir resultados suficientemente satisfatórios a ponto de não compensar o esforço necessário para manter e atualizar as informações de uma base de dados geográfica do sistema viário.

Obter dados realistas das diferentes condições de trânsito e incorporar esses dados aos modelos de roteirização parecem ser desafios importantes para o aprimoramento dos *softwares* de roteirização, além de, no caso brasileiro, a própria necessidade de bases de dados geográficos mais precisos.

Finalmente, o trabalho teve ainda como objetivos discutir e chamar a atenção para o fato de que algumas características e restrições dos problemas, bem como a imprecisão dos dados de entrada, em particular na realidade brasileira, podem ter maior influência na qualidade dos resultados obtidos (podendo até inviabilizar o cumprimento dos roteiros programados) do que os efeitos decorrentes dos próprios métodos heurísticos de solução que não garantem a obtenção da solução ótima.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Assad, A.A. (1988) Modeling and implementation issues in vehicle routing. In: *Vehicle Routing: Methods and Studies*, B.L.Golden, A.A.Assad (eds), North Holland, Amsterdam, p. 7-46.
- Bodin, L.D.; B. Golden; A. Assad e M. Ball (1983) Routing and scheduling of vehicles and crews: The state of the art. *Computers and Operations Research*, vol.10, n.2.
- Bodin, L.D. (1990) Twenty years of routing and scheduling. *Operations Research*, v.38, n.4, p.571-579.
- Clarke, G.e J.W. Wright (1964) Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, v.12, p.568-581.

- Cunha, C.B. (1991) *Algoritmos para roteamento e programação de veículos no contexto da distribuição física*. São Paulo: EPUSP, Departamento de Engenharia de Transportes. 178p. (Dissertação de Mestrado).
- Cunha, C.B. (1997) *Uma contribuição para o problema de roteirização de veículos com restrições operacionais*. São Paulo: EPUSP, Departamento de Engenharia de Transportes. 222p. (Tese de Doutorado).
- Fisher, M.L. e R. Jaikumar (1981) A generalized assignment heuristic for vehicle routing. *Networks*, v.11, p.109-124.
- Gillet, B.E. e L.R. Miller (1974) A heuristic algorithm for the vehicle dispatch problem. *Operations Research*, v.22, p.240-249.
- Golden, B.L. e A. Assad (1988) *Vehicle routing: methods and studies*. North Holland, Amsterdã, Países Baixos.
- Hall, R.W.; J.G. Partyka (1997). On the road to efficiency. *OR/MS Today*, p.38-47, jun/97.
- Kock, T. (1999) GIS: Mapping the OR/MS World. *OR/MS Today*, ago/99.
- Laporte, G. (1992) The vehicle routing problem: an overview of exact and approximate algorithms, *European Journal of Operational Research*, v.59, n.3, p.345-358.
- Laporte, G.; M. Gendreau; J.Y. Potvin e F. Semet (2000) Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem, *International Transactions in Operational Research*, v.7, n4/5, p.285-300.
- Novaes, A.G.N. (1989) *Sistemas Logísticos: Transporte, Armazenagem e Distribuição de Produtos*, Edgard Blucher, São Paulo.
- Ronen, D. (1988) Perspectives on practical aspects of truck routing and scheduling. *European Journal of Operational Research*, 35(2):137-145.
- Solomon, M.M. (1986) On the worst-case performance of some heuristics for the vehicle routing and scheduling with time windows constraints. *Networks*, v.16, p.161-174
- Souza, P.S. (1993) *Asynchronous organizations for multi-algorithms problems*. Pittsburgh: Carnegie Mellow University, Department of Electrical and Computer Engineering. 139p. (Tese de Doutorado).
- Wren, A. e A. Holliday (1972) Computer scheduling of vehicles from one or more depots to a number of delivery points. *Operational Research Quarterly*, v.23, p.333-344.

Endereço do autor:

Claudio Barbieri da Cunha

Departamento de Engenharia de Transportes

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

C.P. 61548 - CEP 05424-970

São Paulo – SP – Brazil

Tel: (11) 3818-5732

Fax: (11) 3818-5716

Email: cbcunha@usp.br