

1

Introdução

O termo "roteamento de veículos" está relacionado a um grande conjunto de problemas de fundamental importância para a área de logística de transportes, em especial no que diz respeito ao uso racional de frotas de veículos, seja para o transporte de passageiros ou de bens e mercadorias.

Um dos principais objetivos de tais problemas é a determinação de rotas para os veículos de uma frota. Este objetivo, em geral, é complexo e difícil de ser alcançado, devido às restrições operacionais que dependem de fatores como, por exemplo, a natureza e características dos itens a serem transportados ou da qualidade com que o serviço deve ser executado. Além disso, os custos envolvidos costumam ser elevados e sensíveis às diferentes variáveis associadas ao problema.

Tais problemas são atualmente amplamente estudados, com um grande número de pesquisas concentrando-se no desenvolvimento de modelos matemáticos e algoritmos para os mesmos. Busca-se, assim, que as implementações computacionais delas resultantes sejam capazes de encontrar boas soluções para instâncias dos problemas em tempos computacionais aceitáveis. O objetivo final é gerar ganhos na produtividade que levem à redução dos custos associados.

O planejamento de rotas para frotas de veículos é fonte de uma ampla classe de problemas práticos de decisão, com aplicações nas mais diversas atividades diárias. Os modelos e algoritmos propostos para a resolução de tais problemas, em geral, podem ser utilizados de forma bastante eficiente na resolução de problemas que decorrem de atividades práticas como a distribuição de bens e mercadorias, o transporte escolar e o de passageiros em geral, a varredura de ruas, a coleta de lixo, a entrega de itens diversos (correspondências, jornais) e a leitura de marcadores de consumo de serviços (água, energia elétrica, gás, etc.) [11, 43].

Em geral os problemas de roteamento de veículos referem-se à determinação de rotas para os veículos de uma frota, visando o atendimento de um conjunto de clientes com demandas (passageiros ou mercadorias) a se-

rem transportadas. Considera-se que os veículos operam a partir de um ou mais depósitos base e têm que iniciar e encerrar suas rotas (seqüências de visitas aos clientes) no depósito que é a sua base. O objetivo principal é a minimização do custo total do transporte, do tempo total a ser gasto ou da distância total a ser percorrida nas rotas.

O número de variáveis a serem consideradas no planejamento de rotas para frotas de veículos pode ser bastante elevado, dentre as quais destacam-se: o número de depósitos onde estão baseados os veículos, o tamanho da frota de veículos, o tipo da frota disponível (homogênea/heterogênea), a capacidade dos veículos, a natureza da demanda, a localização do cliente, o tipo de malha viária (composta de ruas/estradas e pontos de conexão) associada ao problema, os custos envolvidos, o tipo de operação a ser realizada (coleta/entrega), horário de atendimento de um determinado cliente e requisitos de pessoal (número de motoristas, duração da jornada de trabalho, etc.) [25, 10]. Além disso, pode ser necessário considerar restrições com respeito ao tempo (limites superiores na duração de uma rota), à quantidade/peso da demanda ou quanto ao horário que o cliente deve ser atendido. Podem existir ainda restrições adicionais como, por exemplo, uma que restrinja o atendimento de um cliente em particular por um determinado veículo.

Esses problemas podem, ainda, ser classificados em duas classes, dependendo da localização dos clientes na rede viária associada ao problema. Na primeira classe, que agrega a maioria das aplicações mais tradicionais, o atendimento à demanda de um cliente implica na visita de um local específico da malha viária. Na segunda classe estão os problemas em que o atendimento de um cliente implica em percorrer um trecho completo (entre dois pontos de conexão) da malha viária.

Um exemplo clássico de problema da primeira classe é o caso em que o objetivo é a construção de uma rota de percurso mínimo que passe exatamente uma vez por todos os pontos de conexão da rede viária associada ao problema. Este problema, conhecido como problema do caixeiro viajante ou *TSP* (*Traveling Salesman Problem*), pode ser visto como um problema de roteamento de veículos em que existe apenas um depósito, um veículo de capacidade ilimitada e demandas unitárias associadas aos pontos de conexão da rede viária. Outro exemplo clássico, da segunda classe, considerando-se as mesmas limitações do *TSP*, é a construção de uma rota de percurso mínimo que passe ao longo de cada rua/estrada pelo menos uma vez, o qual é conhecido como problema do carteiro chinês ou *CPP* (*Chinese Postman Problem*).

Essa descrição genérica do problema de roteamento de veículos inclui também diversas outras variações, sendo que as mais relevantes contém restrições quanto à capacidade dos veículos. Devido à importância dessas variações para a resolução de um grande número de problemas práticos que apresentam tais restrições, as mesmas serão o foco principal desta tese. Em particular, será dedicada especial atenção a dois exemplos bastante genéricos e que englobam diversos outros como casos especiais: o roteamento de veículos com restrição de capacidade e o de roteamento sobre as ruas/estradas, também com restrição de capacidade. No primeiro, mais conhecido como *CVRP* (*Capacitated Vehicle Routing Problem*), o veículo deve atender as demandas (coleta ou entrega) de clientes localizados nos pontos de conexão, respeitando-se a capacidade do veículo. Já no segundo problema, mais conhecido como *CARP* (*Capacitated Arc Routing Problem*), o veículo deve atender demandas em clientes distribuídos ao longo das ruas/estradas.

Observe que tanto o problema do caixeiro viajante (*TSP*) quanto o roteamento de veículos com restrição de capacidade (*CVRP*) podem ser vistos como casos especiais do *CARP*. Em ambos os problemas, pode-se dividir cada ponto de conexão a ser visitado na rede viária em duas novas conexões e colocar a demanda, alocada no ponto de conexão original, na nova via que liga as duas novas conexões.

A resolução dos problemas de roteamento é amplamente estudada na área de otimização combinatória. A natureza intrinsecamente combinatorial desses problemas sugere que boa parte deles pode ser formulada e resolvida como um problema de programação linear inteira (ver definições na seção 2). Contudo, a maioria dos algoritmos atualmente disponíveis não consegue encontrar, em tempos computacionais aceitáveis, a solução ótima para instâncias de porte razoável. O sucesso desses algoritmos tem sido limitado, em parte devido ao fato dos mesmos não explorarem avanços recentes na área de programação linear inteira. Algumas dessas novas técnicas serão objeto de estudo da tese e descritas no capítulo 2.

1.1

Organização da Tese

O corpo da tese está dividido em três partes. A primeira delas descreve as metodologias utilizadas na segunda parte. No capítulo 3, nesta primeira parte, são descritas as técnicas básicas de decomposição de problemas de programação linear e linear inteira e de geração de colunas (seções 3.1 e 3.1.1). Além disso, é descrita uma proposta de reformulação de problemas

de programação linear inteira (seção 3.3) alternativa àquela que gera o tradicional problema mestre de *Dantzig-Wolfe*, geralmente utilizados em abordagens por geração de colunas (seção 3.2). O capítulo 4 trata da resolução de *IPs* por algoritmos enumerativos. Inicialmente é descrito na seção 4.1 o algoritmo *branch-and-bound* e nas seções 4.2, 4.3 e 4.4 são apresentadas breves descrições gerais das variações *branch-and-cut*, *branch-and-price* e *branch-and-cut-and-price*, respectivamente.

A segunda parte esta dividida em 3 capítulos que descrevem a aplicação das metodologias descritas na primeira parte a problemas de roteamento de veículos com restrição de capacidade. No primeiro deles, capítulo 5, é apresentada a aplicação da técnica denominada *Geração Projetada de Colunas* ao *CVRP*.

No capítulo 6 é abordada a resolução do *CARP* através de sua transformação no *CVRP* e uso de um algoritmo *branch-and-cut-and-price*. Nas seções 6.2 e 6.3 são mostradas duas alternativas de redução do *CARP* ao *CVRP*. A primeira foi proposta por Pearn et al. em [88] e a segunda é uma simplificação desta. Esta segunda redução é utilizada em um algoritmo *branch-and-cut-and-price* para o *CARP* derivado de um algoritmo originalmente desenvolvido para o *CVRP*, o qual é descrito na seção 6.6. A seção 6.7 apresenta os resultados computacionais obtidos com esse algoritmo.

O capítulo 7 apresenta a formulação de um novo problema, na área de redistribuição de carros de aluguel, o qual deriva-se de uma proposta recente para a melhoria do trânsito em cidades de grande porte. Essa alternativa propõe a interdição ao acesso de determinadas áreas, exceto para veículos que prestem algum tipo de serviço e para carros de aluguel de pequeno porte. Estes últimos poderiam ser retirados e/ou devolvidos em diferentes estacionamentos, o que poderia, eventualmente, gerar um desequilíbrio na distribuição dos mesmos entre os estacionamentos. O problema em questão refere-se ao modo de redistribuí-los, utilizando para isto veículos que percorrem rotas pré-definidas.

A seção 7.5 descreve a formulação desse problema como um *IP*, segundo uma abordagem por geração de colunas. Nas seções 7.6 e 7.7 é descrito um esquema dinâmico de geração de colunas, que identifica programações viáveis de redistribuições dos carros de aluguel a serem executadas pelos veículos. A seção 7.8 mostra um esquema heurístico de particionamento do espaço de soluções específico para esse problema. Este, embora não garanta que um algoritmo *branch-and-price* vá encontrar a solução ótima para uma instância do problema, restringe bastante o espaço de soluções e é suficiente para garantir que sejam encontradas boas soluções.

Na seção 7.10 são apresentados os resultados computacionais obtidos para duas classes de instâncias, geradas segundo as estratégias descritas na seção 7.9.

Finalmente, a terceira e última parte contém as conclusões a respeito desta tese e as referências bibliográficas utilizadas durante o seu desenvolvimento.