Parte III

Contribuições e Conclusões

8

Contribuições e Conclusões

Assumiui-se, no desenvolvimento desta tese, que o enfoque principal seria dado aos métodos computacionais para a resolução de problemas de roteamento de veículos com restrição de capacidade. Assim, as contribuições da mesma estão presentes na segunda parte, onde são descritas as aplicações das metodologias descritas na primeira parte.

A primeira contribuição está na seção 5.2, onde é descrita uma forma para a obtenção de uma formulação compacta de um problema de programação linear inteira. Essa formulação, com um número polinomial de variáveis, é capaz de produzir estimativas análogas às obtidas por formulações com número exponencial de variáveis. A validade dessa proposta é enunciada no teorema 5.1, cuja demonstração também é apresentada. Em particular, esta é uma contribuição no sentido de se utilizar de uma decomposição baseada em partes da solução do problema. Esta é uma generalização do caso descrito por Boyd em [26, 27] em que desigualdades são obtidas a partir de soluções completas do problema.

A motivação maior para o desenvolvimento dessa técnica é suplantando uma dificuldade que vem junto com o uso de um algoritmo *branch-and-cut-and-price*: a necessidade de se aplicar a técnica de geração de colunas, que é computacionalmente cara, não apenas uma vez, mas em cada um dos nós da árvore de enumeração. A abordagem descrita nesse capítulo permite que a geração de colunas seja aplicada somente no nó raiz e a partir deste ponto o algoritmo proceda como um *branch-and-cut* convencional, apenas gerando novos cortes no restante da árvore, o que pode permitir a redução do tempo gasto nesses nós.

Os resultados computacionais da aplicação dessa técnica (aqui chamada de *geração de colunas projetada*) ainda são bastante incipientes (limitados a uma única instância do *CVRP – Capacitated Vehicle Routing Problem*, com 20 clientes e 4 veículos). Contudo, os resultados desta experiência piloto foram encorajadores e sugerem que essa técnica ainda pode ser bastante promissora.

O capítulo seguinte (6), que trata do problema de roteamento com demandas sobre os arcos, o problema clássico *Capacitated Arc Routing Problem - CARP*, apresenta uma nova transformação deste ao *CVRP*. Essa transformação claramente abre novas possibilidades na resolução do *CARP*.

Uma nova formulação mestre explícita para o *CVRP* foi obtida ao se considerar as particularidades dessa transformação do *CARP* ao *CVRP*. Essa modificação permitiu a especialização de um algoritmo *branch-and-cut-and-price* para tirar vantagem do fato de, para uma dada instância, existir um número fixo de arestas que obrigatoriamente devem pertencer a todas as soluções. A proposta de transformação do *CARP* ao *CVRP*, embora resulte numa instância com o dobro de vértices, permite ao algoritmo *branch-and-cut-and-price* comportar-se como se estivesse resolvendo uma instância com o mesmo número de vértices.

O uso desse algoritmo para a solução de instâncias do *CVRP* assim obtidas, não somente consegue melhorar as estimativas inferiores dos valores das soluções ótimas de um grande conjunto de instâncias do *CARP*, como também consegue encontrar as soluções ótimas para diversas dessas instâncias que estavam até então em aberto. Os extensivos resultados computacionais com essa abordagem comprovam a qualidade deste trabalho.

Além disso, este capítulo apresenta também formas para se incorporar à nova formulação mestre explícita do *CVRP* as desigualdades propostas por Belenguer e Benavent em [20]. Antes da nova abordagem aqui apresentada, as melhores estimativas para as soluções ótimas das instâncias utilizadas nos testes computacionais descritos na seção 6.7 foram obtidas por Belenguer e Benavent com a utilização de tais desigualdades.

Uma proposta para trabalho futuro é a utilização dessas desigualdades, específicas para o *CARP*, no algoritmo *branch-and-cut-and-price* utilizado para a resolução das instâncias do *CVRP* resultantes da transformação proposta. A expectativa é de que as estimativas das soluções ótimas para as instâncias do *CARP* podem ser ainda muito melhoradas com a adição de tais desigualdades.

Outro ponto a ser estudado é o desenvolvimento de uma nova transformação do *CARP* ao *CVRP*. Diante da experiência adquirida com as duas transformações mostradas nesse capítulo e dos resultados computacionais obtidos, cabe a avaliação da substituição de uma aresta com demanda, do *CARP*, por apenas um vértice, no *CVRP*.

Uma proposta para a abordagem de um problema na área de transporte urbano é o assunto do capítulo 7, o qual trata da redistribuição de carros especiais, ou de transporte individual, em grandes centros. Este pro-

blema foi denominado de Problema de Redistribuição de *EcoCarros* ou *ECP*. O estudo procurou apresentar estratégias compatíveis com as práticas atuais em sistemas que apresentam problemas similares e apresenta um algoritmo *branch-and-price* para encontrar boas soluções para um problema de altíssima complexidade. Uma contribuição deste capítulo é a demonstração de que o problema apresentado pertence à classe dos problemas $\mathcal{NP}$ -Completo, que foi feita com a apresentação de uma redução do Problema de Steiner em Grafos ao *ECP*.

Dentre os vários problemas enfrentados durante o desenvolvimento da abordagem descrita neste capítulo, um dos mais sérios foi a indisponibilidade de instâncias do mundo real para a realização de testes. À primeira vista, dado que o *ECP* é um problema novo e ainda não estão disponíveis instâncias advindas do mundo real, a solução do mesmo poderia até ser considerada um objetivo inexecutável. Contudo, o desenvolvimento de procedimentos para geração de instâncias que, de modo mais fiel possível, simulam situações do mundo real, permite mostrar que tal suposição não é totalmente verdadeira. Os resultados computacionais dos testes realizados mostram que é possível encontrar soluções de boa qualidade em instâncias de porte médio.

O capítulo apresenta, portanto, duas formas originais de geração de instâncias para o problema em questão. A forma como uma instância é gerada garante a existência de pelo menos uma solução factível para a mesma, o que permite avaliar a eficácia de um esquema de *branching* proposto especificamente para o problema em questão (veja seção 7.8). A estrutura das instâncias geradas também permite calcular uma estimativa superior para o valor da solução ótima para uma instância em particular. Esta estimativa, devido à dificuldade de construção heurística de soluções para instâncias do *ECP*, é importante para permitir mensurar a qualidade das soluções encontradas pelo algoritmo *Branch-and-Price* proposto na seção 7.8.

Pode-se avaliar a partir dos problemas tratados nesta tese a importância de boas metodologias para a resolução de problemas com potencial de aplicação prática. Observa-se que as novas metodologias aportam não somente linhas que podem trazer avanços significativos mas também, junto com as novas opções, questões ligadas a implementação e a estratégias de resolução que se acumulam. Soluções para estes novos problemas deverão ser consideradas em um futuro próximo.