



Pedro Nuno de Souza Moura

**Integrando Metaheurísticas com Resolvedores
MIP para o *Capacitated Vehicle Routing Problem***

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Informática do Departamento de Informática da PUC-Rio

Orientador: Prof. Marcus Vinicius Soledade Poggi de Aragão

Rio de Janeiro
Agosto de 2011



Pedro Nuno de Souza Moura

**Integrando Metaheurísticas com Resolvedores
MIP para o *Capacitated Vehicle Routing Problem***

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Informática do Departamento de Informática do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Marcus Vinicius Soledade Poggi de Aragão

Orientador

Departamento de Informática — PUC-Rio

Prof. Eduardo Sany Laber

Departamento de Informática – PUC-Rio

Prof. Alexandre Albino Andreatta

Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro – UNIRIO

Prof. Lorenza Leão de Oliveira Moreno

Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico — PUC-Rio

Rio de Janeiro, 26 de Agosto de 2011

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Pedro Nuno de Souza Moura

Graduou-se Bacharel em Sistemas de Informação na Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro – UNIRIO. Foi monitor de disciplinas de Cálculo e realizou iniciação científica em Equações Diferenciais Parciais. Continuou seus estudos no programa de Mestrado em Informática da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio, na área de Otimização Combinatória.

Ficha Catalográfica

Moura, Pedro Nuno de Souza

Integrando Metaheurísticas com Resolvedores MIP para o *Capacitated Vehicle Routing Problem* / Pedro Nuno de Souza Moura; orientador: Marcus Vinicius Soledade Poggi de Aragão. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Informática, 2011.

v., 68 f: il. ; 29,7 cm

1. Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Informática.

Inclui referências bibliográficas.

1. Informática – Tese. 2. Metaheurísticas. 3. Vizinhança de Bola. 4. Vizinhança Elipsoidal. 5. Programação Inteira Mista. 6. Otimização Combinatória. 7. Problema de Roteamento de Veículos com Restrição de Capacidade. I. Poggi, Marcus Vinicius Soledade de Aragão. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Informática. III. Título.

CDD: 004

À minha avó Carmen, por estar ao meu lado em grande parte de minhas horas de estudo.

Agradecimentos

Ao meu irmão, Fernando Henrique, que me deu forças nos momentos em que precisei e foi uma das pessoas fundamentais para que eu realizasse este trabalho.

A meus pais, Mário e Fernanda, pelo apoio e incentivo concedidos ao longo destes anos, culminando na conclusão desta etapa da minha vida.

Ao meu orientador Marcus Poggi, pelo apoio nos momentos difíceis, pelas cobranças quando necessárias e por estar sempre presente para dar o direcionamento na realização desta dissertação.

Ao Carlos Marques, pelas conversas e apoio ao longo desta caminhada. Ao grande amigo Allan, que me proporcionou momentos de grande amadurecimento neste mestrado. Aos amigos Daniel e Ismael, com quem compartilhei períodos de muito estudo e descontração.

Aos Prof. Alexandre Andreatta, pelas palavras e conselhos em momentos importantes da minha vida. Aos Profs. Simone Bacellar, Luiz Amâncio e Luiz Pedro Jutuca, pelos ensinamentos e orientações no início de minha trajetória acadêmica na UNIRIO.

Ao doutorando Diego Pecin, pela disponibilidade e ajuda quando precisei.

Aos professores e funcionários do Departamento de Informática de maneira geral.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de fomento, e à FAPERJ, pela concessão da bolsa FAPERJ Nota 10.

Resumo

Moura, Pedro Nuno de Souza; Poggi, Marcus Vinicius Soledade de Aragão. **Integrando Metaheurísticas com Resolvedores MIP para o *Capacitated Vehicle Routing Problem***. Rio de Janeiro, 2011. 68p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Desde a sua origem, as abordagens a problemas de Otimização Combinatória polarizam-se entre métodos exatos e heurísticos. Recentemente, porém, estratégias que combinam ambos os métodos têm sido propostas para os mais variados problemas, apresentando resultados promissores. Nesse contexto, destacam-se os conceitos de vizinhanças de bola e elipsoidal, que realizam buscas em relação a uma ou mais soluções de referência. Este trabalho estuda a aplicação de tais vizinhanças para o Problema de Roteamento de Veículos com Restrição de Capacidade (CVRP), sobre o algoritmo de Branch-and-Cut-and-Price Robusto. Experimentos foram realizados e seus resultados analisados.

Palavras-chave

Metaheurísticas; Vizinhança de Bola; Vizinhança Elipsoidal; Programação Inteira Mista; Otimização Combinatória; Problema de Roteamento de Veículos com Restrição de Capacidade;

Abstract

Moura, Pedro Nuno de Souza; Poggi, Marcus Vinicius Soledade de Aragão (Advisor). **Integrating Metaheuristics with MIP Solvers to the Capacitated Vehicle Routing Problem**. Rio de Janeiro, 2011. 68p. M.Sc. Dissertation — Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Since its inception, approaches to Combinatorial Optimization were polarized between exact and heuristic methods. Recently, however, strategies that combine both methods have been proposed for various problems, showing promising results. In this context, the concepts of ball and ellipsoidal neighborhood appear, which perform a search regarding one or more reference solutions. This work studies the application of such neighborhoods for the Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP), using the Robust Branch-and-Cut-and-Price algorithm. Experiments were made and its results were analyzed.

Keywords

Metaheuristics; Ball Neighborhood; Ellipsoidal Neighborhood; Mixed Integer Programming; Combinatorial Optimization; Capacitated Vehicle Routing Problem;

Sumário

1	Introdução	12
1.1	Motivação	12
1.2	Objetivos do Trabalho	15
1.3	Organização do Trabalho	15
2	Problema de Roteamento de Veículos com Restrição de Capacidade	16
2.1	Definição	16
2.2	Revisão de Abordagens Propostas	18
2.2.1	Abordagens Exatas	18
2.2.2	Abordagens Heurísticas	19
2.3	Formulações do Problema	22
2.3.1	Formulação Clássica	22
2.3.2	Formulação por Geração de Colunas	23
2.3.3	Formulação com Número Exponencial de Colunas e Restrições	24
3	Metaheurísticas e Resolvedores MIP	26
3.1	<i>Local Branching</i>	27
3.2	Vizinhança Elipsoidal	29
4	Heurísticas Propostas	32
4.1	Metodologia	32
4.2	Busca Local	33
4.3	Busca Elipsoidal	39
4.3.1	Busca Elipsoidal de 2 Soluções	40
4.3.2	Busca Elipsoidal de 3 Soluções	51
4.4	Gráficos de Desempenho	58
5	Conclusão	62
5.1	Considerações Finais	62
5.2	Trabalhos Futuros	63

Lista de figuras

2.1	Exemplo de solução para uma instância do problema.	17
3.1	Combinações entre metaheurísticas e algoritmos exatos (Retirado de Puchinger e Raidl [42]).	27
3.2	Ilustração da vizinhança de bola (t -OPT).	29
3.3	Ilustração da vizinhança elipsoidal.	30
4.1	Arestas do depósito.	42
4.2	Arestas obtidas a partir da <i>giant tour</i> .	45
4.3	Representação gráfica de uma solução-base \bar{x}^1 .	47
4.4	Representação gráfica de uma solução-base \bar{x}^2 .	47
4.5	Solução obtida na aplicação da vizinhança elipsoidal a partir de \bar{x}^1 e \bar{x}^2 .	48
4.6	Representação gráfica de uma solução-base \bar{x}^3 .	48
4.7	Representação gráfica de uma solução-base \bar{x}^4 .	49
4.8	Solução obtida na aplicação da vizinhança elipsoidal a partir de \bar{x}^3 e \bar{x}^4 .	49
4.9	Solução ótima para a instância A-n39-k6.	50
4.10	Desempenho comparativo para instância An-34-k5 com $t = 4$.	58
4.11	Desempenho comparativo para instância B-n50-k7 com $t = 6$.	59
4.12	Desempenho comparativo para instância E-n76-k10 com $t = 10$.	60
4.13	Desempenho comparativo para instância E-n76-k10 com $t = 30$.	60

Lista de tabelas

4.1	Conjunto de testes usado nos experimentos.	33
4.2	Resultados para busca local com $t = 2$.	35
4.3	Resultados para busca local com $t = 4$.	36
4.4	Resultados para busca local com $t = 8$.	36
4.5	Resultados para busca local com $t = 10$.	36
4.6	Resultados para busca local com alguns valores de t .	37
4.7	Resultados para busca local com $t = 30$.	37
4.8	Resultados para busca elipsoidal de 2 com $t = 2$.	41
4.9	Resultados para busca elipsoidal de 2 com $t = 4$.	41
4.10	Resultados para busca elipsoidal de 2 com $t = 10$.	41
4.11	Resultados para busca elipsoidal de 2 com alguns valores de t .	42
4.12	Resultados para busca elipsoidal de 2 usando arestas do depósito com $t = 2$.	43
4.13	Resultados para busca elipsoidal de 2 usando arestas do depósito com $t = 10$.	43
4.14	Resultados para busca elipsoidal de 2 usando arestas do depósito com alguns valores de t .	44
4.15	Resultados para busca elipsoidal de 2 usando arestas de uma <i>giant tour</i> com $t = 2$.	45
4.16	Resultados para busca elipsoidal de 2 usando arestas da <i>giant tour</i> com $t = 10$.	46
4.17	Resultados para busca elipsoidal de 2 usando arestas da <i>giant tour</i> com alguns valores de t .	46
4.18	Resultados para busca elipsoidal de 3 com $t = 2$.	52
4.19	Resultados para busca elipsoidal de 3 com $t = 4$.	52
4.20	Resultados para busca elipsoidal de 3 com $t = 10$.	52
4.21	Resultados para busca elipsoidal de 3 com alguns valores de t .	53
4.22	Resultados para busca elipsoidal de 3 usando arestas do depósito com $t = 2$.	54
4.23	Resultados para busca elipsoidal de 3 usando arestas do depósito com $t = 10$.	54
4.24	Resultados para busca elipsoidal de 3 usando arestas do depósito com alguns valores de t .	54
4.25	Resultados para busca elipsoidal de 3 usando arestas da <i>giant tour</i> com $t = 2$.	55
4.26	Resultados para busca elipsoidal de 3 usando arestas da <i>giant tour</i> com $t = 10$.	56
4.27	Resultados para busca elipsoidal de 3 usando arestas da <i>giant tour</i> com alguns valores de t .	56
4.28	Resultados para busca elipsoidal de 3 usando arestas da <i>giant tour</i> com $t = 30$.	57

“Quando se tem uma meta, o que era um obstáculo passa a ser uma das etapas do plano.”

Gerhard Erich Boehme