

**Pedro Tiago Barbosa do
Couto**

**Resolução de problemas de
transporte rodoviário de
cargas utilizando
programação inteira**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
Programa de Pós-graduação em
Engenharia Elétrica**

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2004



Pedro Tiago Barbosa do Couto

**Resolução de problemas de transporte
rodoviário de cargas utilizando
programação inteira**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Oscar Porto
Co–Orientador: Prof. Marcus Vinicius Soledade
Poggi de Aragão

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2004



Pedro Tiago Barbosa do Couto

**Resolução de problemas de transporte
rodoviário de cargas utilizando
programação inteira**

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

Prof. Oscar Porto

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica — PUC-Rio

Prof. Marcus Vinicius Soledade Poggi de Aragão

Co-Orientador

Departamento de Informática — PUC-Rio

Prof. Nelson Maculan Filho

COPPE/UFRJ

Prof. Eduardo Uchoa Barboza

UFF

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico –
PUC-Rio

Rio de Janeiro, 14 de Fevereiro de 2004

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

Pedro Tiago Barbosa do Couto

Graduou-se em Engenharia Elétrica na PUC-Rio. Durante sua graduação, foi monitor no departamento de Matemática da PUC-Rio. Durante o Mestrado foi bolsista da PUC-Rio e monitor no departamento de Engenharia Elétrica mantendo um excelente desempenho acadêmico, desenvolvendo um trabalho aplicado em logística rodoviária. Atualmente trabalha desenvolvendo outras soluções em logística utilizando técnicas de otimização.

Ficha Catalográfica

Barbosa do Couto, Pedro Tiago

Resolução de problemas de transporte rodoviário de cargas utilizando programação inteira/ Pedro Tiago Barbosa do Couto; orientador: Oscar Porto; co-orientador: Marcus Vinicius Soledade Poggi de Aragão. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2004.

[11], 47f.: il. ; 30cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Elétrica. 2. Programação Inteira. 3. Logística Rodoviária. 4. Fluxo em Redes. 5. Geração de Colunas I. Porto, Oscar. II. Soledade Poggi de Aragão, Marcus Vinicius. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

Esta dissertação é dedicada à Anna Carolina, aos meus pais José Quintas e Inês Barbosa e aos meus irmãos Miguel Couto e João Couto, que têm e tiveram um papel essencial na minha vida.

Agradecimentos

Ao meu orientador Oscar Porto, ao meu co-orientador Marcus Poggi de Aragão, ao Prof. Nelson Maculan, ao Prof. Eduardo Uchoa e aos meus colegas Ricardo Fukasawa, Alexandre Pigatti e Humberto Longo que foram extremamente importantes na realização deste trabalho e também me ajudaram muito na minha formação acadêmica e pessoal.

A PUC-Rio pela bolsa recebida e pelas condições de ensino durante os dois anos de Mestrado e os cinco anos de graduação.

A todos os meus amigos que sempre me apoiaram e me ajudaram.

A toda a minha família que me criou, me educou e incentivou a poder superar todas as dificuldades.

À Anna Carolina que esteve sempre ao meu lado nos momentos que eu precisava e sempre me apoiou.

Resumo

Barbosa do Couto, Pedro Tiago; Porto, Oscar; Soledade Poggi de Aragão, Marcus Vinicius. **Resolução de problemas de transporte rodoviário de cargas utilizando programação inteira**. Rio de Janeiro, 2004. 81p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Os sistemas rodoviários são grandes candidatos à aplicação de técnicas de otimização para a redução dos custos operacionais. Neste trabalho são apresentados dois modelos de programação inteira para problemas nesta área, o *Problema de Transferência de Cargas (PTC)* e o *Problema de Alocação de Cargas (PAC)*. Ambos foram resolvidos de maneira ótima ou quase ótima em tempo razoável, tanto em termos acadêmicos como para sua utilização prática. São apresentados os problemas, as formulações dos modelos, as técnicas de pré-processamento utilizadas, assim como resultados computacionais de instâncias reais.

Palavras-chave

Programação inteira, Logística rodoviária, Fluxos em rede, Geração de colunas

Abstract

Barbosa do Couto, Pedro Tiago; Porto, Oscar; Soledade Poggi de Aragão, Marcus Vinicius. **Solution of load transportation problems using integer programming**. Rio de Janeiro, 2004. 81p. MSc. Dissertation — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Road systems are major candidates for the use of optimization techniques to obtain operational reduction costs. In this research we present two integer programming models for road problems, the *Load Transference Problem* and the *Load Scheduling Problem*. Both problems were solved to optimality or near-optimality in a reasonable time, either for academic or practical purposes. We present the descriptions of the problems, the mathematical formulations, the preprocessing techniques used, as well as computational results for real instances.

Keywords

Integer programming, Road logistics, Network flows, Columns generation

Conteúdo

1	Introdução	12
1.1	Motivação	12
1.2	Descrição dos problemas rodoviários	13
1.3	Os problemas reais estudados	14
1.4	O modelo de multifluxos	16
1.5	Geração de Colunas	17
1.6	Organização da dissertação	21
2	O Problema de Transferência de Cargas	22
2.1	Descrição do Problema	22
2.2	Formulação Matemática	24
2.3	Resultados	32
3	O Problema de Alocação de Cargas	35
3.1	Descrição do Problema	35
3.2	Formulação Matemática	38
3.3	Resultados	67
4	Conclusão	76
4.1	Problema de Transferência de Cargas - PTC	76
4.2	Problema de Atribuição de Cargas - PAC	77
4.3	Conclusão Final	79
5	Referências Bibliográficas	80

Lista de Figuras

2.1	Exemplo de uma malha com três cidades e três dias.	25
2.2	Exemplo da representação de uma variável de conjunto.	25
2.3	Exemplo de trajeto de atendimento de demanda.	27
3.1	Exemplo de uma Programação Dinâmica bi-dimensional.	63

Lista de Tabelas

2.1	Tamanho de 17 instâncias do <i>PTC</i>	32
2.2	Resultados computacionais para 17 instâncias do <i>PTC</i>	33
2.3	Piores resultados computacionais no Branch & Bound para 17 instâncias do <i>PTC</i>	34
3.1	Tamanho e resultados da heurística inicial de 14 instâncias do <i>PAC</i>	67
3.2	Resultados no nó zero para a formulação compacta do <i>PAC</i>	68
3.3	Tamanho para a formulação compacta do <i>PAC</i>	69
3.4	Desempenho, no Branch & Bound, da formulação compacta do <i>PAC</i> com o CPLEX 7.0	70
3.5	Desempenho, no Branch & Bound, da formulação compacta do <i>PAC</i> com o CPLEX 8.0	71
3.6	Desempenho, com igualdade para as restrições de atendimento de cargas, da formulação heurística das instâncias do <i>PAC</i>	72
3.7	Desempenho, com desigualdade para as restrições de atendimento de cargas, da formulação heurística das instâncias do <i>PAC</i>	73
3.8	Melhoria do limite inferior por geração de colunas, em comparação com as formulações compactas com CPLEX 7.0 e CPLEX 8.0, das instâncias do <i>PAC</i>	74
3.9	Comparação dos tempos de resolução entre as Formulações Compactas utilizando o CPLEX 7.0 e 8.0 e o Branch & Price, das instâncias do <i>PAC</i>	75

Lista de Algoritmos

1	Algoritmo de alocação de cargas - <i>alocaCargas()</i>	40
2	Algoritmo de fixação de caminhões - <i>fixaCaminhoes()</i>	41
3	Algoritmo da heurística inicial	41