

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Ricardo Fukasawa

**Resolução de problemas de logística
ferroviária 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. Eduardo Uchoa

Rio de Janeiro
Novembro de 2002



Ricardo Fukasawa

Resolução de problemas de logística ferroviária 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. Eduardo Uchoa

Co-Orientador

Departamento de Engenharia de Produção — UFF

Prof. Marcus Poggi de Aragão

Departamento de Informática – PUC-Rio

Prof. Marco Caldas

Departamento de Engenharia de Produção – UFF

Prof. Ney Augusto Dumont

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico —
PUC-Rio

Rio de Janeiro, 10 de Novembro de 2002

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

Ricardo Fukasawa

Graduou-se em Engenharia Elétrica na PUC-Rio, tendo sido bolsista de desempenho acadêmico durante todo o curso. Durante sua graduação, foi pesquisador do CNPq em dois trabalhos de iniciação científica nos departamentos de Matemática e de Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Durante o Mestrado foi bolsista do CNPq mantendo um excelente desempenho acadêmico, desenvolvendo um trabalho aplicado em logística ferroviária. Atualmente trabalha desenvolvendo outras soluções em logística utilizando técnicas de otimização.

Ficha Catalográfica

Fukasawa, Ricardo

Resolução de problemas de logística ferroviária utilizando programação inteira/ Ricardo Fukasawa; orientador: Oscar Porto; co-orientador: Eduardo Uchoa. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2002.

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

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Programação Inteira. 3. Logística Ferroviária. 4. Fluxos em Rede. I. Porto, Oscar. II. Uchoa, Eduardo. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

Esta dissertação é dedicada à minha avó, que é um exemplo de vida para mim, à Marta e aos meus pais e irmãs, que têm um papel essencial na minha vida.

Agradecimentos

Ao meu orientador Oscar Porto, ao meu co-orientador Eduardo Uchoa e ao Prof. Marcus Poggi de Aragão que foram extremamente importantes na realização deste trabalho e também me ajudaram muito na minha formação acadêmica e pessoal.

Ao Prof. Abilio Lucena e ao meu amigo Alexandre Belloni que foram pessoas importantes na minha escolha por esta linha de pesquisa.

Ao CNPq e aos brasileiros que pagam impostos, pela bolsa recebida durante os dois anos de Mestrado.

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 Marta que esteve sempre ao meu lado nos momentos que eu precisava, que me ajudou muito a crescer e amadurecer e que ainda me ajudou na revisão gramatical.

E principalmente a Deus, que colocou todas estas pessoas na minha vida, além de me dar a capacidade e as oportunidades para fazer um mestrado e desenvolver este trabalho.

Resumo

Fukasawa, Ricardo; Porto, Oscar; Uchoa, Eduardo. **Resolução de problemas de logística ferroviária utilizando programação inteira**. Rio de Janeiro, 2002. 58p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Os sistemas ferroviários são grandes candidatos à aplicação de técnicas de otimização para o melhor aproveitamento dos seus recursos. Neste trabalho são apresentados dois modelos de programação inteira para problemas nesta área, o *Problema de Planejamento de Atendimento (PPA)* e o *Problema de Fluxo de Vagões (PFV)*. 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 ferroviária, Fluxos em rede

Abstract

Fukasawa, Ricardo; Porto, Oscar; Uchoa, Eduardo. **Solution of railroad logistics problems using integer programming**. Rio de Janeiro, 2002. 58p. MSc. Dissertation — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Railroad systems are major candidates for the use of optimization techniques to obtain a more efficient use of resources. In this research we present two integer programming models for freight railroad problems, the *Demand Fulfillment Problem* and the *Car Flow 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, Railroad logistics, Network flows

Conteúdo

1	Introdução	12
1.1	Motivação	12
1.2	Descrição dos problemas ferroviários	13
1.3	Os problemas reais estudados	15
1.4	O modelo de multifluxos	16
1.5	Organização da dissertação	18
2	O Problema de Planejamento de Atendimento	19
2.1	Descrição do problema	19
2.2	Formulação Matemática	21
2.3	Pré-processamento	31
2.4	Resultados	32
3	O Problema de Fluxo de Vagões	37
3.1	Descrição do problema	37
3.2	Formulação matemática	42
3.3	Extensão do modelo	47
3.4	Pré-processamento	48
3.5	Resultados	51
4	Conclusão	54
5	Referências Bibliográficas	57

Lista de Figuras

2.1	Exemplo de um ciclo simples.	23
2.2	Vértice com 2 pares de arcos (ida e volta) incidentes.	31
2.3	Fluxo desnecessário no arco (v_1, v_2) .	31
2.4	Primeira parte de um ciclo – primeira demanda.	34
2.5	Segunda parte de um ciclo – vagões vazios.	35
2.6	Terceira parte de um ciclo – outra demanda.	35
2.7	Décima sétima parte de um ciclo – volta dos vagões ao pátio de origem.	36
3.1	A malha ferroviária e suas 8 zonas de operação (indicadas pelos retângulos).	40
3.2	Exemplo de uma rota de vagão utilizada para o atendimento de uma demanda entre zonas distantes.	41
3.3	Pequeno exemplo das subredes de vagões vazios e carregados.	43
3.4	Exemplo da aplicação do procedimento <i>Pre-Degree</i> à figura 3.3.	49
3.5	Exemplo da aplicação do procedimento <i>Pre-Path</i> , apenas mostrando a eliminação de vértices.	49
4.1	Trechos da malha muito utilizados (em vermelho).	55

Lista de Tabelas

2.1	Dimensões de 12 instâncias do <i>PPA</i>	33
2.2	Resultados computacionais para 12 instâncias do <i>PPA</i>	33
2.3	Resultados computacionais para 12 instâncias do <i>PPA</i> com capacidades a 1%	34
3.1	Dimensões de 12 instâncias do <i>PFV</i> .	51
3.2	Resultados computacionais de 12 instâncias do <i>PFV</i> .	51
3.3	Resultados computacionais da extensão do <i>PFV</i> para 10 instâncias.	52

Lista de Algoritmos

1	Algoritmo de decomposição em ciclos	30
2	Algoritmo de decomposição de fluxos	47