

**Pedro de Moura e Cunha**

**Planejamento Tático no Transporte Rodoviário  
de Cargas Fracionadas: Modelos e Algoritmos**

**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 V. S. Poggi de Aragão

Rio de Janeiro  
Abril de 2008



**Pedro de Moura e Cunha**

## **Planejamento Tático no Transporte Rodoviário de Cargas Fracionadas: Modelos e Algoritmos**

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 V. S. Poggi de Aragão**

Orientador

Departamento de Informática — PUC-Rio

**Prof. Ruy Luiz Milidiú**

Departamento de Informática — PUC-Rio

**Prof. Haroldo Gambini Santos**

Universidade Federal Fluminense — UFF

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico — PUC-Rio

Rio de Janeiro, 14 de Abril de 2008

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

### **Pedro de Moura e Cunha**

Graduou-se em Engenharia da Computação na PUC-Rio - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Durante sua graduação, foi pesquisador do CNPq em um trabalho de iniciação científica no LEARN - Laboratório de Engenharia de Algoritmos e Rede Neurais - no Departamento de Informática da PUC-Rio. Durante o Mestrado foi bolsista da CAPES, desenvolvendo um trabalho aplicado a problemas em transporte rodoviário de cargas fracionadas. Atualmente trabalha desenvolvendo resolvedores matemáticos para problemas de planejamento de logística.

#### Ficha Catalográfica

Cunha, Pedro de Moura e

Planejamento Tático no Transporte Rodoviário de Cargas Fracionadas: Modelos e Algoritmos / Pedro de Moura e Cunha; orientador: Marcus V. S. Poggi de Aragão. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Informática, 2008.

v., 79 f: il. ; 30 cm

1. Dissertação (Mestrado em Informática) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia.

1. Informática – Teses. 2. Programação Inteira. 3. Logística Rodoviária. 4. Fluxos em Redes. I. Aragão, Marcus V. S. Poggi de. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Informática. III. Título.

CDD: 004

## Agradecimentos

À CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos meus pais, irmãos e amigos.

Aos meus colegas da PUC-Rio.

Ao professor Marcos Poggi pela cooperação.

Ao pessoal da Gapso pela ajuda.

## Resumo

Cunha, Pedro de Moura e; Aragão, Marcus V. S. Poggi de. **Planejamento Tático no Transporte Rodoviário de Cargas Fracionadas: Modelos e Algoritmos**. Rio de Janeiro, 2008. 79p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Problemas de transporte de cargas fracionadas são grandes candidatos para a aplicação de técnicas de otimização como forma de obter um melhor aproveitamento de recursos. Nesta dissertação, são apresentados modelos de programação inteira e os algoritmos desenvolvidos para a resolução adequada dos problemas estudados neste contexto. O foco é o planejamento da movimentação dos veículos para o atendimento das demandas ao longo de um período pré-definido. Diferentes formas de contratação dos veículos são consideradas, demandas possuem janelas de tempo para serem atendidas e podem compartilhar um mesmo veículo em um ou mais trechos do seu caminho até o destino. Conexões são permitidas, ou seja, uma demanda pode utilizar mais de um veículo para o seu atendimento, respeitando as capacidades operacionais dos centros de distribuição e coleta. Os objetivos abrangem o dimensionamento da frota, que possui um custo fixo, e o planejamento da operação ao longo do período. Este deve determinar quais demandas são transportadas por quais veículos em que instantes e em que trechos. O método de resolução proposto utiliza algoritmos para a construção e pré-processamento de grafos que representam o problema e permitem que a formulação como programa inteiro tenha uma resolução mais eficiente. Além disso, o algoritmo correspondente resolve uma sequência de programas inteiros para obter soluções viáveis de qualidade para as diferentes versões do problema aqui considerado. Melhorias nos limites inferiores obtidos também são propostas. O código resultante foi testado em um conjunto de instâncias baseadas na operação de uma transportadora brasileira de grande porte. Resultados foram obtidos tanto para condições de utilização reais, isto é, com o tempo de execução limitado, como para testar os limites do método proposto. Em ambos os casos pôde-se obter soluções de alta qualidade comprovada.

## Palavras-chave

Programação Inteira. Logística Rodoviária. Fluxos em Redes.

## Abstract

Cunha, Pedro de Moura e; Aragão, Marcus V. S. Poggi de. **Tactical Less-than-truckload Transportation Planning: Models and Algorithms**. Rio de Janeiro, 2008. 79p. MsC Thesis — Department of Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Less-than-truckload transportation problems are great candidates for the application of optimization techniques as a form to obtain a better exploitation of resources. This thesis introduces integer programming models and the developed algorithms for the proper resolution of the studied problems in this context. The focal point is the vehicle's dislocation planning for the ideal attendance of the demands during a certain time period. Different forms of vehicle contract are considered. There are time windows for the attendances and demands can share a same vehicle in one or more parts of its route until his destination. Connections are allowed, that is, demands can use more than one vehicle for its attendance, respecting the operational capacities of the centers (collection and distribution stations). The goals embraces the sizing of the proper fleet which has a fixed cost, and the operation's planning during the period. This one should determine which demands are transported by which vehicles in what instants and where on routes. The resolution's method proposed uses algorithms for the graph's construction and pre-processing which represents the problem and allows that the formulation, as an integer program, to have a resolution more efficient. Furthermore, the corresponding algorithm solves a sequence of integer programs to obtain feasible quality solutions for the differents versions of the considered problem. Improvements on the lower bounds gotten are also proposed. The resulting code was tested in a set of proposed instances that were based on the operation of an important brazilian trucking company. Results were acquired such for conditions of real utilization, in other words, with a limited time of execution, as to test the limits of the proposed method. In both cases, solutions of comproved high quality were obtained.

## Keywords

Integer Programming. Road Logistics. Network flows.

## Sumário

1	Introdução	10
1.1	Motivação	10
1.2	Contexto	11
1.3	Objetivos	13
1.4	Trabalhos Relacionados	14
1.5	Estrutura da Dissertação	15
2	Descrição do Problema	17
2.1	Problema de Planejamento de Atendimento	17
2.2	Problema de Planejamento de Atendimento com Veículos Extras	21
2.3	Problema de Planejamento de Atendimento Aplicado	21
3	Formulações	28
3.1	Formulação para o Problema Planejamento de Atendimento	28
3.2	Problema de Planejamento de Atendimento com Veículos Extras	43
3.3	Formulação para o Problema de Planejamento de Atendimento Aplicado	48
4	Algoritmos	55
4.1	Pré-Processamento	55
4.2	Estratégias de Resolução	58
4.3	Eliminação de Simetria	63
5	Testes Realizados	65
5.1	Instâncias	65
5.2	Resultados Computacionais	68
6	Conclusão	77
	Referências Bibliográficas	78

## Lista de figuras

1.1	Cada localidade é atendida por apenas um centro de distribuição.	12
2.1	Exemplo de malha rodoviária.	17
2.2	Rotas disponíveis.	18
3.1	Fluxo de veículos e demandas.	29
3.2	Conservação de fluxo de carga.	32
3.3	Variáveis de fluxo de carga.	32
3.4	Fluxo de carga nos veículos.	33
3.5	Fluxo de carga em estoque.	33
3.6	Fluxo de veículos nos centros de distribuição.	34
3.7	Fluxo de veículos e demandas.	37
3.8	Conservação de fluxo de veículo.	40
3.9	Variáveis de fluxo de veículo.	40
3.10	Fluxo de veículos nos centros de distribuição.	41
3.11	Fluxo de veículos nos centros de distribuição.	51
4.1	Eliminação de variáveis de deslocamento de veículos.	56
4.2	Fluxo de veículos após eliminação de variáveis de deslocamento.	57
4.3	Legenda	57
4.4	Eliminação de variáveis de deslocamento de demandas.	58
4.5	Movimentação de veículos extras.	60
4.6	Cortes de simetria	64
5.1	Malha A: Malha rodoviária composta por 3 CD's e 6 arcos.	65
5.2	Malha B: Malha rodoviária composta por 11 CD's e 24 arcos.	66
5.3	Malha C: Malha rodoviária composta por 14 CD's e 34 arcos.	66
5.4	Malha D: Malha rodoviária composta por 16 CD's e 60 arcos.	66
5.5	Comparação de estratégias.	74
5.6	Comparação de estratégias.	74



## Lista de tabelas

5.1	Instâncias para a Malha A	67
5.2	Instâncias para a Malha B	67
5.3	Instâncias para a Malha C	67
5.4	Instâncias para a Malha D	68
5.5	Resultados computacionais para instâncias da malha D.	69
5.6	Resultados computacionais para instâncias da malha A.	70
5.7	Resultados computacionais para instâncias da malha B.	70
5.8	Resultados computacionais para instâncias da malha C.	71
5.9	Resultados computacionais para instâncias da malha D utilizando-se a Estratégia 2.	72
5.10	Resultados computacionais para instâncias da malha D utilizando-se a Estratégia 3.	73
5.11	Resultados computacionais para instâncias da malha D utilizando-se a Estratégia 3 e restrições para eliminar simetria.	76