

**Rafael Martinelli Pinto**

**Modelos e Algoritmos para  
Análise de  
Congestionamento e  
Determinação de Paradas na  
Logística Ferroviária**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA  
Programa de Pós-graduação em  
Informática**

Rio de Janeiro  
abril de 2007



**Rafael Martinelli Pinto**

**Modelos e Algoritmos para Análise de  
Congestionamento e Determinação de  
Paradas na Logística Ferroviária**

**Dissertação de Mestrado**

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

Orientador: Prof. Marcus Vinicius Soledade Poggi de  
Aragão

Rio de Janeiro  
abril de 2007



**Rafael Martinelli Pinto**

**Modelos e Algoritmos para Análise de  
Congestionamento e Determinação de  
Paradas na Logística Ferroviária**

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. Silvio Hamacher**  
Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

**Prof. Artur Pessoa**  
Departamento de Engenharia de Produção – UFF

**Prof. Oscar Porto**  
Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

**Prof. José Eugenio Leal**  
Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico —  
PUC-Rio

Rio de Janeiro, 11 de abril de 2007

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

### **Rafael Martinelli Pinto**

Graduou-se em Ciência da Computação na UERJ - Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Durante sua graduação, foi bolsista do CNPq de iniciação científica no departamento de Informática e monitor das disciplinas de Sistemas Operacionais e Introdução ao Processamento de Dados. Durante o Mestrado foi bolsista CAPES mantendo um excelente desempenho acadêmico e desenvolveu um trabalho aplicado em logística ferroviária. Atualmente trabalha desenvolvendo outras soluções em logística e planejamento utilizando técnicas de otimização e ministrando as disciplinas de Introdução ao Processamento de Dados e Sistemas Operacionais como professor substituto auxiliar na UERJ.

#### Ficha Catalográfica

Martinelli, Rafael

Modelos e Algoritmos para Análise de Congestionamento e Determinação de Paradas na Logística Ferroviária/ Rafael Martinelli Pinto; orientador: Marcus Vinicius Soledade Poggi de Aragão. — 2007.

70f.: il. (col.) ; 30cm

Dissertação (Mestrado em Informática) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Informática, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia.

1. Informática — Teses. 2. Programação Inteira. 3. Logística Ferroviária. 4. Fluxos em Rede. 5. Heurísticas. I. Poggi de Aragão, Marcus. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Informática. III. Título.

CDD: 004

À minha mãe.

## Agradecimentos

À minha família, por sempre me incentivar durante toda minha vida.

Ao meu orientador Marcus Poggi que sempre foi atencioso e acessível, sempre pronto a resolver os problemas relacionados ao trabalho. Aos professores Oscar Porto e Eduardo Uchoa, que sempre me ajudaram, qualquer que fosse minha dificuldade.

À Aline Muniz por seu carinho, atenção e sobretudo por sua compreensão.

Aos meus grandes amigos Marcos Paulo de Souza, Emiliano Starosky e Rodrigo Sacramento pelos momentos mais divertidos em todos estes anos.

Ao professor Paulo Eustáquio Duarte Pinto que sempre me incentivou, desde a época de graduação.

À Universidade do Estado do Rio de Janeiro e à Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro por terem me dado a base necessária para o desenvolvimento do meu trabalho.

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

## Resumo

Martinelli, Rafael; Poggi de Aragão, Marcus. **Modelos e Algoritmos para Análise de Congestionamento e Determinação de Paradas na Logística Ferroviária**. Rio de Janeiro, 2007. 70p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A importância do planejamento em logística ferroviária cresce a cada dia devido ao alto custo dos investimentos para o aumento da sua capacidade. Entretanto, planejar é uma atividade que exige uma representação suficientemente precisa da realidade estudada. Neste contexto, os modelos de programação matemática apresentam-se cada vez mais adequados. Isto decorre dos recentes avanços nos algoritmos e computadores disponíveis para sua resolução. Esta dissertação apresenta modelos e algoritmos para o planejamento ferroviário tático e estratégico, isto é feito estudando o Problema de Planejamento de Atendimento (PPA). Primeiramente este problema é considerado assumindo que toda a estrutura ferroviária está definida: a malha, a tração e os vagões disponíveis, os pátios para carga, descarga e transbordo, suas respectivas taxas de carga e descarga e as demandas previstas. Em seguida, a questão adicional de determinar os pátios onde paradas podem ser efetuadas é considerada. Finalmente, em uma terceira etapa, introduz-se a capacidade de se analisar os efeitos do congestionamento de trechos da malha e seu impacto nos tempos de circulação e na capacidade da estrutura logística. Modelos são apresentados para cada um dos níveis de complexidade do PPA. Algoritmos exatos e heurísticos e técnicas de pré-processamento, foram desenvolvidos para os tratamentos dos casos obtidos. Em todos os casos, foi possível resolver de maneira ótima ou quase ótima em tempo razoável, tanto em termos acadêmicos, como para a utilização prática. Resultados computacionais sobre um amplo conjunto de instâncias reais são apresentados.

## Palavras-chave

Programação Inteira, Logística Ferroviária, Fluxos em Rede, Heurísticas

## Abstract

Martinelli, Rafael; Poggi de Aragão, Marcus. **Models and Algorithms for Congestion Analysis and Yard Use Determination in Railway Logistics**. Rio de Janeiro, 2007. 70p. MSc. Dissertation — Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Planning in Railway Logistic is an activity with growing importance. This is due to the high costs of investment to increase the railway capacity. Nevertheless, planning in this context is a cumbersome task, since a precise representation is necessary to consider most relevant points in this activity. Mathematical programming is becoming one of the best ways derive precise representations and to solve them. This is due to the recent advances on algorithms and computers used in the resolution of mathematical programming problems. This dissertation presents models and algorithms for tactical and strategical railway planning what is done by studying a demand planning problem (PPA). First, this problem is considered assuming that all the railway structure is defined: the network, the locomotives and wagons available, the yards for loading and unloading with their respective rates, and the forecast of demands. Next, the question of deciding the yards to stop is considered. Finally, in a third step, the effect of congestion in parts of the network is introduced to the models. This allows analyzing the variation in the travel times and its consequence in the logistic structure capacity. Models are presented for all cases of the PPA. Exact and heuristic algorithms, as well as pre-processing techniques, are described for the problem resolution. In all cases, the resulting approach allowed to solve the problems optimally or quasi-optimally in a reasonable computing time. Computational results are presented on a wide set of real world instances.

## Keywords

Integer Programming, Railway Logistic, Network Flows, Heuristics

# Conteúdo

1	Introdução	<b>11</b>
1.1	Motivação	11
1.2	Problemas Estudados	12
1.3	Bibliografia Relacionada	14
1.4	Organização da Dissertação	16
2	O Problema de Planejamento de Atendimento	<b>17</b>
2.1	Descrição do Problema	17
2.2	Formulação Matemática	19
2.3	Resultados Computacionais	38
3	O Problema da Análise de Congestionamento	<b>43</b>
3.1	Descrição do Problema	43
3.2	Formulação Matemática	45
3.3	Resultados Computacionais	49
4	O Problema da Determinação de Paradas	<b>52</b>
4.1	Descrição do Problema	52
4.2	Formulação Matemática	53
4.3	Resultados Computacionais	60
5	Conclusão	<b>63</b>
6	Referências Bibliográficas	<b>66</b>
A	Dicionário de Variáveis	<b>68</b>
A.1	O Problema de Planejamento de Atendimento	68
A.2	O Problema da Análise de Congestionamento	69
A.3	O Problema da Determinação de Paradas	69

## Lista de Figuras

2.1	Malha fictícia utilizada nos testes	39
2.2	Ciclo gerado na solução	39
2.3	Malha real utilizada nos testes	39
3.1	Uma função convexa de congestionamento	44
3.2	Função baseada em algumas derivadas da função convexa	44
3.3	Arcos com custos de tempo incrementais	44
3.4	Arcos com custos de tempo independentes	45
3.5	Função degrau baseada na função de congestionamento original	45

## Lista de Tabelas

2.1	Resultados computacionais das instâncias simples do <i>Problema de Planejamento de Atendimento</i>	40
2.2	Resultados computacionais para a instância 1 do <i>Problema de Planejamento de Atendimento</i>	41
2.3	Resultados computacionais para a instância 2 do <i>Problema de Planejamento de Atendimento</i>	41
2.4	Resultados computacionais para a instância 6 do <i>Problema de Planejamento de Atendimento</i>	42
2.5	Resultados computacionais consolidados para as instâncias do <i>Problema de Planejamento de Atendimento</i>	42
3.1	Resultados computacionais das instâncias simples do <i>Problema da Análise do Congestionamento</i>	49
3.2	Resultados computacionais para a instância 1 do <i>Problema da Análise do Congestionamento</i>	50
3.3	Resultados computacionais para a instância 2 do <i>Problema da Análise do Congestionamento</i>	51
3.4	Resultados computacionais para a instância 6 do <i>Problema da Análise do Congestionamento</i>	51
3.5	Resultados computacionais consolidados para as instâncias do <i>Problema da Análise de Congestionamento</i>	51
4.1	Resultados computacionais das instâncias simples do <i>Problema de Planejamento de Atendimento</i>	60
4.2	Resultados computacionais para a instância 1 do <i>Problema da Determinação de Paradas</i>	61
4.3	Resultados computacionais para a instância 2 do <i>Problema da Determinação de Paradas</i>	61
4.4	Resultados computacionais para a instância 6 do <i>Problema da Determinação de Paradas</i>	62
4.5	Resultados computacionais consolidados para as instâncias do <i>Problema da Determinação de Paradas</i>	62