



Jodelson Aguilar Sabino

**Otimização com colônia de formigas aplicada à
programação de operações de locomotivas de manobras**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao programa de pós-graduação em Engenharia de Produção da PUC-Rio como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Orientador: Dr. José Eugênio Leal
Departamento de Engenharia Industrial – PUC, Rio de Janeiro, Brasil

Co-orientador: Dr. Thomas Günther Stützle
IRIDIA/CoDE – Université Libre de Bruxelles, Bruxelas, Bélgica

Rio de Janeiro
Março de 2008



Jodelson Aguilar Sabino

**Otimização com colônia de formigas aplicada à
programação de operações de locomotivas de manobras**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de
Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Produção
da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. José Eugênio Leal

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. Marc Reimann

University of Warwick

Prof. Reinaldo Morabito Neto

UFSCar

Prof. Fabiano Mezadre Pompermayer

Consultor Autônomo

Prof. Madiagne Diallo

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. Fernanda Maria Pereira Raupp

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 31 de março de 2008

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

Jodelson Aguilar Sabino

Graduou-se em Matemática na UFES (Universidade Federal do Espírito Santo) em 1986. Concluiu a pós-graduação em gerência de projetos em 2001. Em 2002 recebeu o *Student Paper Award* do *RASIG - INFORMS (Institute for Operations Research and Management Science)*. Concluiu o Mestrado em Informática na UFES em 2004. Pesquisador convidado do IRIDIA/CoDE na ULB (*Université Libre de Bruxelles*) em 2006. Trabalha na Vale, na área de Tecnologia da Informação, desde 1987. Atualmente é Gestor de Projetos de Tecnologia da Informação em Vitória (ES), atuando no atendimento a demandas corporativas da área de logística.

Ficha Catalográfica

Sabino, Jodelson Aguilar

Otimização com colônia de formigas aplicada à programação de operações de locomotivas de manobras / Jodelson Aguilar Sabino ; orientador: José Eugênio Leal ; co-orientador: Thomas Günther Stütze. – 2008.

111 f. : il. (color.) ; 30 cm

Tese (Doutorado em Engenharia Industrial)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia

1. Engenharia industrial – Teses. 2. Otimização por colônia de formigas. 3. Planejamento operacional de pátios ferroviários. 4. Sistemas de transporte ferroviário. 5. Roteirização. I. Leal, José Eugênio. II. Stütze, Thomas Günther. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. IV. Título.

CDD: 658.5

Dedico este trabalho a Jacqueline, Thomas e Eric Sabino

Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Eugênio Leal, pelo apoio e estímulo em todas as etapas da realização deste trabalho.

Ao meu co-orientador, Dr. Thomas Stützle e ao Dr. Mauro Birattari, pelas contribuições relevantes e pela agradável companhia durante os doze meses em que estive com eles.

Ao Dr. Marco Dorigo, por acreditar em mim e por disponibilizar pessoas e recursos no momento certo.

Aos membros da banca examinadora, pela leitura crítica e minuciosa deste trabalho e pelos comentários e sugestões encaminhados, os quais foram fundamentais para a melhoria de sua versão final.

À Vale, pelo suporte e patrocínio.

Aos meus colegas da Vale, da PUC-Rio e do IRIDIA/CoDE pelas colaborações e pela companhia.

Aos meus amigos e familiares pelo apoio fundamental nas horas difíceis.

À minha esposa e filhos, a quem coube a tarefa mais difícil e mais importante de suportar a minha ausência e me incentivar nos momentos em que eu estava presente.

Resumo

Sabino, Jodelson Aguilar; Leal, José Eugênio; Stützle, Thomas Günther. **Otimização com colônia de formigas aplicada à programação de operações de locomotivas de manobras.** Rio de Janeiro, 2008. 111p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho trata da modelagem e solução de um problema complexo da vida real: o planejamento de operações de locomotivas de manobras. Sua principal motivação é o desenvolvimento de uma aplicação prática para apoio ao planejamento operacional de grandes pátios ferroviários, visando à utilização eficiente de seus recursos. A questão fundamental considerada é a definição de qual locomotiva deve executar quais manobras, em que ordem estas manobras devem ser executadas e qual a rota a ser utilizada em cada manobra de modo a reduzir os custos operacionais e aumentar a produtividade do sistema ferroviário. Um pátio ferroviário de grandes proporções é usado como referência para desenvolver um modelo matemático, baseado na teoria dos grafos, que representa o problema proposto como um problema de coleta e entrega com frota heterogênea, janelas de tempo e restrições de capacidade. O modelo desenvolvido considera os principais elementos e variáveis do caso real, tais como o leiaute do pátio, os acordos de nível de serviço e as restrições operacionais vigentes. A técnica proposta para resolução do problema é Otimização Com Colônia de Formigas, utilizando duas colônias de formigas. Os testes computacionais avaliam diversas combinações de parâmetros e variantes do algoritmo proposto para identificar a que produz os melhores resultados. O baixo consumo de recursos computacionais e a qualidade das soluções obtidas mostram que o algoritmo proposto é capaz de produzir soluções eficientes para problemas com proporções e características reais.

Palavras-chave

Otimização com colônia de formigas, planejamento operacional de pátios ferroviários, sistemas de transporte ferroviário, roteirização.

Abstract

Sabino, Jodelson Aguilar; Leal, José Eugênio; Stützle, Thomas Günther. **Otimização com colônia de formigas aplicada à programação de operações de locomotivas de manobras.** Rio de Janeiro, 2008. 111p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This thesis targets the modeling and solving of a real life complex problem: the switch engine's operational planning in railroad yards. Its main motivation is the development of a practical application to help operational planners of large railroad yards to achieve efficient resource utilization. The key issue addressed in this research is the determination of which switch engine shall perform which switch orders, in which sequence the switch orders shall be performed and which is the route to follow while performing the switch orders in order to produce operational savings and improve the railroad system productivity. A huge railroad yard is regarded as a reference for designing a mathematical model, based on graph theory, which represents the proposed problem as a pickup and delivery problem with heterogeneous fleet, time windows and capacity constraints. The model takes into consideration the main elements and variables of the real world case like the yard layout, the service level agreements and the operational constraints in effect. The proposed technique for solving this problem is based on ACO – Ant Colony Optimization with two ant colonies. The computational tests evaluate several parameter combinations and algorithm variants to identify the one that leads to better results. The computational resource consumption and the solution quality show that the proposed algorithm is able to produce efficient solutions to realistic and large problem instances.

Keywords

Ant colony optimization, railroad yard operational planning, railroad transportation systems, routing.

Sumário

1 Introdução	12
2 Apresentação do Problema	15
2.1. Conceitos e terminologia	15
2.2. Etapas do planejamento operacional de pátios ferroviários	21
2.3. Enunciado	29
2.4. Modelagem do Problema utilizando grafos	31
2.5. O PPOLM como um problema estático	44
3 Revisão da literatura	46
3.1. Planejamento operacional de pátios ferroviários	46
3.2. Problema de coleta e entrega	49
3.3. Otimização com Colônia de Formiga	52
4 Metodologia de solução do problema	58
4.1. Escolha dos algoritmos	58
4.2. Construção do plano de trabalho das locomotivas de manobras	59
4.3. Cálculo da atratividade	62
4.4. Regras de decisão	65
4.5. Regras de atualização de feromônio	66
4.6. Detalhes sobre a implementação do algoritmo YoYo	68
4.7. Determinação da rota de cada passo	75
5 Testes computacionais	82

5.1. O programa gerador de ordens de serviço	82
5.2. Preparação dos experimentos e métricas utilizadas	88
5.3. Resultados	91
6 Conclusão	99
7 Referências Bibliográficas	103

Lista de Figuras

Figura 1: Área de um pátio ferroviário em operação	16
Figura 2: Etapas da realização de uma manobra	18
Figura 3: Um controlador de Pátio em seu posto de trabalho. Toronto, Ontário, Canadá.	20
Figura 4: Etapas do planejamento operacional de pátios ferroviários	23
Figura 5: Grafo descritivo do leiaute da área B do pátio K	34
Figura 6: Correspondência entre os grafos G e G'	36
Figura 7: Caminho de coleta e entrega O_e no grafo G	37
Figura 8: Duas linhas adjacentes e o cálculo da distância entre elas	39
Figura 9: Movimentos possíveis de uma formiga a partir do estado i	54
Figura 10: Algoritmo ACO genérico, baseado em Maniezzo & Carbonaro (1999)	55
Figura 11: Caminho de uma formiga com três passos destacados	61
Figura 12: Algoritmo CompetAnts, conforme Reimann (2002)	62
Figura 13: Rotina ACO usada no algoritmo YoYo	70
Figura 14: Rotina <i>RegraDecisão</i> , usada na rotina ACO	71
Figura 15: Rotina <i>SortearResposta</i> , usada rotina <i>RegraDecisão</i>	72
Figura 16: Rotina <i>Viável</i> , usada rotina <i>RegraDecisão</i>	72
Figura 17: Matriz M ($p+q$, $p+q$, 2) de feromônios	74
Figura 18: Horizonte de planejamento dividido em intervalos	77
Figura 19: Matriz Z de alocação de pátio após movimento do comboio k	79
Figura 20: Comboio estacionado em A, pronto para se deslocar até B.	79
Figura 21: Dimensões envolvidas no cálculo do tempo de alocação das linhas	80

Figura 22: Pátio de descarregamento RRT1 utilizado nos testes computacionais.	84
Figura 23: Diagrama de Fluxo de Dados do programa SOGY	86
Figura 24: Comparação da qualidade da solução para as regras CME e RNK	92
Figura 25: Comparação das soluções CME e RNK variando n_orders e m	94
Figura 26: Comparação das regras RNK e CME variando ρ e β	96
Figura 27: Número médio de iterações para CME e RNK variando n_orders e m	97
Figura 28: Boxplot do tempo de CPU para todas as combinações de parâmetros considerando $n_orders=60$	98