

**Rafael Lorenzo Santos**

**Uma Aplicação de Algoritmos de Colônias  
de Formigas em Problemas de Roteirização  
de Veículos com Janelas de Tempo**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Industrial.

Orientador: Prof. José Eugenio Leal

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2006

**Rafael Lorenzo Santos**

**Uma Aplicação de Algoritmos de Colônias  
de Formigas em Problemas de Roteirização  
de Veículos com Janelas de Tempo**

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

**Prof. José Eugenio Leal**

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

**Prof. Sílvio Hamacher**

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

**Prof. Nélio Domingues Pizzolato**

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico-Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 14 de dezembro de 2006

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

### **Rafael Lorenzo Santos**

Graduou-se em Engenharia Elétrica com Ênfase em Telecomunicações pela PUC-Rio em 2004. Cursou Logística Empresarial no Centro de Estudos em Logística (COPPEAD/UFRJ) em 2006. Teve passagens pela TV Globo, Embratel e Ambev, onde atuou nesta última empresa na área de Logística. Tem interesse pela área de Transportes, Logística e Supply Chain.

#### Ficha Catalográfica

Santos, Rafael Lorenzo

Uma aplicação de algoritmos de colônias de formigas em problemas de roteirização de veículos com janelas de tempo / Rafael Lorenzo Santos ; orientador: José Eugenio Leal. – 2006.

88 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

Inclui bibliografia

1. Engenharia industrial – Teses. 2. Roteirização. 3. Colônias de formigas. 4. Logística. I. Leal, José Eugênio. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III. Título.

CDD: 658.5

Aos meus pais, Ronald e Lucila, pelo  
apoio e confiança irrestritos que sempre  
depositaram em mim.

## Agradecimentos

Ao orientador, Prof José Eugenio Leal, pelo suporte e ajuda no desenvolvimento desta dissertação.

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

Aos professores da Banca Examinadora.

Aos professores e funcionários da PUC-Rio, por tantas horas de aulas e de ensinamentos, que me ajudaram a formar uma sólida base de conhecimentos.

A todos meus amigos e familiares, que mesmo sem perceber, contribuíram de forma determinante na minha formação moral e no meu desenvolvimento acadêmico.

## Resumo

Santos, Rafael Lorenzo; Leal, José Eugenio. **Uma Aplicação de Algoritmos de Colônias de Formigas em Problemas de Roteirização de Veículos com Janelas de Tempo**. Rio de Janeiro, 2006. 88p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Muitos avanços da ciência foram obtidos a partir da observação da natureza. Milênios de seleção natural e evolução fizeram com que certos seres vivos desenvolvessem habilidades e características realmente notáveis, e que ainda hoje surpreendem pela sua complexidade e adaptabilidade. Alguns ramos da ciência fazem uso constante da observação intensiva dessas características, na tentativa de reproduzi-las em um ambiente controlado, com o objetivo de desenvolver métodos e ferramentas nelas baseados. Exemplos de métodos desenvolvidos dessa forma são os algoritmos de colônias de formigas. Sistemas de colônias de formigas (*Ant Colony Systems - ACS*) são modelos matemáticos baseados no comportamento de formigas quando imersas em colônias de indivíduos semelhantes. Formigas são indivíduos simples, porém capazes de interagir entre si, obtendo muitos benefícios desta prática. Estes modelos são muito úteis na resolução de grandes problemas de otimização combinatória, geralmente muito complexos para serem resolvidos por métodos exatos de otimização e representam um incipiente e importante campo de estudos da engenharia de produção. Este trabalho se propõe a descrever alguns algoritmos de colônias de formigas, utilizados em problemas de otimização combinatória/discreta. Particularmente, o foco do trabalho será na aplicação destes algoritmos no problema de roteirização de veículos com janelas de tempo. Uma forma de implementação do algoritmo no ambiente *Matlab* será proposta e testada em problemas padrão usados como *benchmarking* na literatura.

## Palavras-chave

Roteirização, colônias de formigas, logística

## Abstract

Santos, Rafael Lorenzo; Leal, José Eugenio. **An Application of Ant Colony Algorithms to Vehicle Routing Problems with Time Windows.** Rio de Janeiro, 2006. 88p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Many advances in science were achieved from the observation of nature. Thousands of years of natural selection and evolution made certain living beings develop notable abilities and characteristics, that still nowadays surprise us with their complexity and adaptability. Some fields of science make constant use of intensive observation of these characteristics, in order to reproduce them in a controlled environment, with the objective of developing methods and tools based on them. Examples of methods developed this way are ant colony algorithms. Ant Colony Systems are mathematical models based on the behavior of ants when immersed in colonies of likely individuals. Ants are simple individuals, however capable of interacting with each other, obtaining benefits from this practice. These models are very useful in solving large combinatorial optimization problems, usually too complex to be solved by exact optimization methods, and represent an important and incipient field of study in production engineering. This work aims to describe some ant colony algorithms, used in combinatorial/discrete optimization problems. Particularly, the focus of this work will be in the application of these algorithms to the vehicle routing problem with time windows. A form of implementation of the algorithm in Matlab environment will be proposed and tested in standard problems used as benchmarking in the literature.

## Keywords

Vehicle routing, ant colonies, logistics

## Sumário

1. Introdução	11
2. Modelos Baseados no Comportamento de Formigas	13
3. O Problema de Roteirização de Veículos	18
3.1. O caso mais simples: o TSP	18
3.1.1. Alguns métodos heurísticos de solução do TSP	19
3.2. O caso generalizado: o VRP	22
3.2.1. Alguns métodos heurísticos de solução do VRP	26
4. O <i>Ant System</i> (AS)	35
5. O <i>Ant Colony System</i> (ACS)	39
6. O <i>Multiple Ant Colony System</i> (MACS)	43
6.1. Um algoritmo para o MACS-VRPTW	45
6.1.1. Implementação do <i>acs-vei</i>	47
6.1.2. Implementação do <i>acs_time</i>	53
6.1.3. Funções auxiliares	56
7. Aplicações Práticas do MACS-VRPTW: Exemplos	65
8. Conclusões	84
9. Referências Bibliográficas	86
10. Apêndice I – Funções do <i>Matlab 6.0</i>	88



## Lista de Figuras

Figura 1 – Algoritmo do vizinho mais próximo	21
Figura 2 – Intervalos de tempo no ciclo de serviço, para o VRPTW	29
Figura 3 – Cálculo das probabilidades de escolha de um arco, para o <i>Ant System</i>	36
Figura 4 – Disposição geográfica dos clientes nos problemas R101 e R201	68
Figura 5 – Rotas para o problema R101 de 25 clientes	69
Figura 6 – Rotas para o problema R201 de 25 clientes	71
Figura 7 – Disposição geográfica dos clientes no problema C101	73
Figura 8 – Rotas para o problema C101 de 25 clientes	74
Figura 9 – Disposição geográfica dos clientes no problema RC101	75
Figura 10 – Rotas para o problema RC101 de 25 clientes	77
Figura 11 – Rotas para o problema R111 de 25 clientes	79
Figura 12 – Disposição geográfica dos clientes no problema R103	81

## Lista de Quadros

Quadro 1 – Função <i>nearest_neighbor</i>	32
Quadro 2 – Rotina principal do MACS-VRPTW	46
Quadro 3 – Algoritmo da função <i>acs-vei</i>	47/48
Quadro 4 – Algoritmo da função <i>qtd_veículos</i>	52
Quadro 5 – Algoritmo da função <i>acs_time</i>	53/54
Quadro 6 – Algoritmo da função auxiliar <i>simula_formiga</i>	56/57
Quadro 7 – Algoritmo da função auxiliar <i>insertion_procedure</i>	62/63
Quadro 8 – Resumo dos problemas estudados	66
Quadro 9 – Dados do problema R101	67
Quadro 10 – Dados do problema R201	67/68
Quadro 11 – Características das rotas encontradas para o problema R101	70
Quadro 12 – Características das rotas encontradas para o problema R201	71
Quadro 13 – Dados do problema C101	72
Quadro 14 – Características das rotas encontradas para o problema C101	73
Quadro 15 – Dados do problema RC101	75
Quadro 16 – Características das rotas encontradas para o problema RC101	76
Quadro 17 – Dados do problema R111	78
Quadro 18 – Características das rotas encontradas para o problema R111	78
Quadro 19 – Dados do problema R103, com 50 nós	80
Quadro 20 – Resumo dos resultados obtidos nos problemas abordados	82