

PATRÍCIA PRADO BELFIORE

***SCATTER SEARCH* PARA PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO DE  
VEÍCULOS COM FROTA HETEROGÊNEA, JANELAS DE TEMPO E  
ENTREGAS FRACIONADAS**

Tese apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para a obtenção do título  
de Doutor em Engenharia.

São Paulo

2006

PATRÍCIA PRADO BELFIORE

**SCATTER SEARCH PARA PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO DE  
VEÍCULOS COM FROTA HETEROGÊNEA, JANELAS DE TEMPO E  
ENTREGAS FRACIONADAS**

Tese apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para a obtenção do título  
de Doutor em Engenharia.

Área de concentração:  
Engenharia de Produção

Orientador: Prof. Dr. Hugo T. Y. Yoshizaki

São Paulo

2006

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com anuência de seu orientador.

São Paulo, 30 de março de 2006.

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

## FICHA CATALOGRÁFICA

Belfiore, Patrícia Prado

*Scatter search* para Problemas de Roteirização de Veículos com Frota Heterogênea, Janelas de Tempo e Entregas Fracionadas. São Paulo, 2006.

203 p.

Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Produção.

1. Roteirização 2. Pesquisa Operacional 3. Heurística  
4. Varejo I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.  
Departamento de Engenharia de Produção II. t.

*Dedico,*

*À minha mãe, ao meu pai (em memória) e ao meu irmão que sempre me incentivaram.*

*Ao meu noivo Luiz Paulo por todo apoio, amor e carinho.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Hugo T. Y. Yoshizaki pela orientação e contribuição no desenvolvimento deste trabalho.

À toda minha família pelo apoio e incentivo.

À Profa. Débora Pretti Ronconi pelas valiosas dicas que auxiliaram o meu ingresso no mestrado e doutorado, além do aprendizado em sua disciplina que contribuiu para o avanço deste trabalho.

Ao Prof. Vinícius Amaral Armentano e ao Prof. Cláudio Barbieri da Cunha pela contribuição no trabalho.

Aos amigos e professores da Escola Politécnica e de outras unidades da USP pela oportunidade de aprendizado.

À Capes pelo suporte recebido.

*O caminho real da descoberta não  
está na procura de passagens  
novas, mas em possuir novos  
olhos...*

*Marcel Proust*

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>iv</b>
<b>LISTA DE QUADROS</b>	<b>v</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE TABELAS - ANEXOS</b>	<b>vii</b>
<b>LISTA DE GRÁFICOS</b>	<b>ix</b>
<b>RESUMO</b>	<b>x</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xii</b>
<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1 – A IMPORTÂNCIA DOS PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS	1
2 – OBJETIVO	3
3 – JUSTIFICATIVA DO TEMA E CONTRIBUIÇÕES	4
4 – DELINEAMENTO DO TRABALHO	5
<b>CAPÍTULO 1 - TAXONOMIA DOS PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS</b>	<b>7</b>
1.1 - O PROBLEMA BÁSICO DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS E SUAS EXTENSÕES	7
1.2 - CLASSIFICAÇÃO DOS PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS	11
1.2.1 - Classificação segundo Bodin et al. (1983)	
1.2.2 - Classificação segundo Ronen (1988)	
1.2.3 - Classificação segundo Assad (1988)	
1.2.4 - Classificação segundo Desrochers, Lenstra e Savelsbergh (1990)	
1.3 - PROBLEMAS CLÁSSICOS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS	18
1.4 - SÍNTESE DOS PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS	26
<b>CAPÍTULO 2 - ESTRATÉGIAS DE SOLUÇÃO EM PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS: REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>29</b>
2.1 - COMPLEXIDADE COMPUTACIONAL DOS PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS	29
2.2 - CLASSIFICAÇÃO DAS PRINCIPAIS ESTRATÉGIAS DE SOLUÇÃO EM PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO E PROGRAMAÇÃO DE VEÍCULOS	31
2.2.1 - Classificação das estratégias segundo Bodin e Golden (1981) e Bodin et al. (1983)	
2.2.2 - Classificação segundo Bott e Ballou (1986)	
2.2.3 - Classificação das estratégias de solução segundo Silver, Vidal e Werra (1980), Ball e Magazine (1981) e Zanakis, Evans e Vazacopoulos (1989)	

2.2.4 - Classificação segundo Laporte (1992), Christofides (1985), Osman (1993) e Cunha (1997)	
<b>2.3 - REVISÃO DA LITERATURA DOS PRINCIPAIS MÉTODOS DE SOLUÇÃO PARA PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS</b>	<b>36</b>
2.3.1 - Problema Clássico de Roteirização de Veículos ( <i>Vehicle Routing Problem - VRP</i> )	
2.3.2 - Problema de Roteirização de Veículos com Janelas de Tempo ( <i>Vehicle Routing Problem with Time Windows - VRPTW</i> )	
2.3.3 - Problema de Roteirização de Veículos com Janela de Tempo Flexível ( <i>Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows - VRPSTW</i> )	
2.3.4 - Problema de Roteirização de Veículos com Entregas Fracionadas ( <i>Vehicle Routing Problem with Split Deliveries - VRPSD</i> )	
2.3.5 - Problema de Roteirização de Veículos com Janelas de Tempo e Entregas Fracionadas ( <i>Vehicle Routing Problem with Time Windows and Split Deliveries - VRPTWSD</i> )	
2.3.6 - Problema de Roteirização de Veículos com Demanda em Arcos, Janelas de Tempo e Entregas Fracionadas ( <i>Capacitated Arc Routing Problem with Time Windows and Split Deliveries - CARPTWSD</i> )	
2.3.7 - Problema de Roteirização de Veículos com Frota Heterogênea Fixa ( <i>Heterogeneous Fixed Fleet Vehicle Routing Problem - HFFVRP</i> )	
2.3.8 - Problema de Roteirização de Veículos com Frota Heterogênea Fixa e Restrições de Janelas de Tempo ( <i>Heterogeneous Fixed Fleet Vehicle Routing Problem with Time Windows - HFFVRPTW</i> )	
2.3.9 - Problema de Dimensionamento e Roteirização de uma Frota Heterogênea de Veículos ( <i>Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem - FSMVRP</i> )	
2.3.10 - Problema de Dimensionamento e Roteirização de uma Frota Heterogênea de Veículos com Restrições de Janelas de Tempo ( <i>Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time Windows - FSMVRPTW</i> )	
<b>2.4 - CONCLUSÃO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E CONTRIBUIÇÕES</b>	<b>80</b>
<b>CAPÍTULO 3 - SCATTER SEARCH E SUAS APLICAÇÕES EM PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS</b>	<b>81</b>
3.1 - DESCRIÇÃO DO MÉTODO	83
3.2 - APLICAÇÕES EM PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS	89
<b>CAPÍTULO 4 - DEFINIÇÃO DO PROBLEMA</b>	<b>91</b>
4.1 - CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO DESROCHERS, LENSTRA E SAVELSBERGH (1990)	92
4.2 - MODELAGEM MATEMÁTICA	94
4.3 - COMPLEXIDADE DO PROBLEMA E ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO	97
<b>CAPÍTULO 5 - ESTUDO DE CASO</b>	<b>98</b>
5.1 - CENTRO DE DISTRIBUIÇÃO	98
5.2 - TIPOS DE VEÍCULOS	98
5.3 - MODELO DE PREÇO DE FRETE	99
5.4 - DISTÂNCIA	102
5.5 - VELOCIDADES E TEMPO DE DESCARGA	102
5.6 - DEMANDA DAS LOJAS	103



5.7 - JANELAS DE TEMPO DAS LOJAS	104
<b>CAPÍTULO 6 - RESOLUÇÃO DO MODELO</b>	<b>105</b>
6.1 - HEURÍSTICA DE ECONOMIAS (VERSÃO PARALELA)	105
6.1.1 - Frota heterogênea	
6.1.2 - Demanda maior que a capacidade dos veículos	
6.1.3 - Cálculo das economias	
6.1.4 - Restrições de janelas de tempo, capacidade e tipo de veículo	
6.2 - ADAPTAÇÃO DA HEURÍSTICA DE INSERÇÃO SEQUENCIAL I1 DE SOLOMON (AI1)	112
6.3 - ADAPTAÇÃO DA HEURÍSTICA DE INSERÇÃO SEQUENCIAL DE HO E HAUGLAND (AHH)	115
6.4 - ADAPTAÇÃO DA HEURÍSTICA DE INSERÇÃO SEQUENCIAL DE DULLAERT ET AL. (AHD)	115
6.5 - <i>SCATTER SEARCH</i>	118
6.6 - INSTÂNCIAS DE PROBLEMAS DA LITERATURA	141
6.6.1 - Instâncias de problemas de Solomon (1987)	
6.6.2 - Instâncias de problemas de Ho e Haugland (2004)	
6.6.3 - Instâncias de problemas de Liu e Shen (1999)	
<b>CAPÍTULO 7 - ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>152</b>
7.1 - ESTUDO DE CASO	152
7.2 - INSTÂNCIAS DE SOLOMON (1987)	159
7.3 - INSTÂNCIAS DE HO E HAUGLAND (2004)	164
7.4 - INSTÂNCIAS DE LIU E SHEN (1999)	166
<b>CONCLUSÕES E FUTURAS PESQUISAS</b>	<b>172</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>174</b>
<b>APÊNDICE</b>	<b>189</b>
A) RESULTADOS DETALHADOS	189
<b>ANEXOS</b>	<b>195</b>
A) EXEMPLO DE APLICAÇÃO DE <i>SCATTER SEARCH</i>	195
B) CÁLCULO DA DISTÂNCIA GEODÉSICA	201
C) INSTÂNCIAS DE PROBLEMAS DE LIU E SHEN (1999)	202

**LISTA DE FIGURAS**

FIGURA 1.1 - GRAFO DO PROBLEMA HAMILTONIANO	19
FIGURA 2.1 - COMBINANDO DOIS CLIENTES EM UM ROTEIRO	38
FIGURA 2.2 - PASSOS INICIAIS DO ALGORITMO DE ECONOMIAS	38
FIGURA 2.3 - VERSÃO PARALELA DO ALGORITMO DE ECONOMIAS	38
FIGURA 2.4 - VERSÃO SEQUENCIAL DO ALGORITMO DE ECONOMIAS	39
FIGURA 2.5 - INSERÇÃO	62
FIGURA 2.6 - TROCA DE CLIENTES FRACIONADOS	62
FIGURA 2.7 - TROCA DE CLIENTES ENTRE ROTAS	63
FIGURA 2.8 - TROCA DE ARCOS	63
FIGURA 3.1 - PROCEDIMENTO <i>SCATTER SEARCH</i>	85
FIGURA 3.2 - ESQUEMA DO MÉTODO <i>SCATTER SEARCH</i>	86
FIGURA 6.1 - ALGORITMO PARA ATENDIMENTO DAS LOJAS COM DEMANDA SUPERIOR À CAPACIDADE DOS VEÍCULOS	107
FIGURA 6.2 - INTEGRANDO DOIS CLIENTES EM UM ROTEIRO COMPARTILHADO	108
FIGURA 6.3 - ALGORITMO COMPLETO DE ECONOMIAS (VERSÃO PARALELA)	110
FIGURA 6.4 - DESCRIÇÃO COMPLETA DO ALGORITMO AII	113
FIGURA 6.5 - DESCRIÇÃO COMPLETA DO ALGORITMO AHD	117
FIGURA 6.6 - ALGORITMO DE ELIMINAÇÃO E COMBINAÇÃO DE ROTAS	126
FIGURA 6.7 - ALGORITMO DE INSERÇÃO	127
FIGURA 6.8 - ALGORITMO DE ELIMINAÇÃO E INSERÇÃO PARA INSTÂNCIAS DE SOLOMON (1987)	144
FIGURA 6.9 - ALGORITMO DE INSERÇÃO PARA INSTÂNCIAS DE SOLOMON (1987)	144

## Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

