

**Isabel Cristina Mello Rosseti**

**Estratégias seqüenciais e  
paralelas de GRASP com  
reconexão por caminhos para  
o problema de síntese de  
redes a 2-caminhos**

**TESE DE DOUTORADO**

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

Rio de Janeiro  
Julho de 2003



**Isabel Cristina Mello Rosseti**

**Estratégias seqüenciais e paralelas de  
GRASP com reconexão por caminhos para  
o problema de síntese de redes a  
2-caminhos**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em In-  
formática do Departamento de Informática da PUC-Rio  
como parte dos requisitos parciais para obtenção do título  
de Doutor em Informática

Orientador: Prof. Celso Carneiro Ribeiro

Rio de Janeiro  
Julho de 2003



**Isabel Cristina Mello Rosseti**

**Estratégias seqüenciais e paralelas de  
GRASP com reconexão por caminhos para  
o problema de síntese de redes a  
2-caminhos**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em In-  
formática do Departamento de Informática do Centro  
Técnico Científico da PUC-Rio como parte dos requisitos  
parciais para obtenção do título de Doutor em Informática.  
Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Celso Carneiro Ribeiro**

Orientador

Departamento de Informática — PUC-Rio

**Prof. Lilian Markenzon**

Núcleo de Computação Eletrônica — UFRJ

**Prof. Lúcia Maria de Assumpção Drummond**

Departamento de Ciência da Computação — UFF

**Prof. Luiz Satoru Ochi**

Departamento de Ciência da Computação — UFF

**Prof. Mauricio Resende**

Algorithms and Optimization Research Department –  
AT&T Labs Research

**Prof. Noemi Rodriguez**

Departamento de Informática — PUC-Rio

**Prof. Ney Augusto Dumont**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico —  
PUC-Rio

Rio de Janeiro, 24 de Julho de 2003

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

### **Isabel Cristina Mello Rosseti**

Graduou-se em Engenharia de Computação na Universidade Federal do Espírito Santo. Cursou mestrado em Informática na PUC-Rio.

#### Ficha Catalográfica

Rosseti, I.

Estratégias seqüenciais e paralelas de GRASP com reconexão por caminhos para o problema de síntese de redes a 2-caminhos/ Isabel Cristina Mello Rosseti; orientador: Celso Carneiro Ribeiro. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Informática, 2003.

v., 121 f: il. ; 29,7 cm

1. Tese (doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Informática.

Inclui referências bibliográficas.

1. Informática – Teses. 2. Reconexão por caminhos. 3. GRASP. 4. Paralelismo. I. Ribeiro, C.C.. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Informática. III. Título.

CDD: 004

Ao meu avô materno Vitório e a minha sobrinha Victória pela alegria que eles têm (e que me dão) de estarem vivos, e a todos os meus amigos, do Rio de Janeiro e de outros estados, por sempre me tirarem do “sério”.

## Agradecimentos

Ao meu orientador, professor Celso Carneiro Ribeiro, pela sua excelente orientação. Muito obrigada pelos seus conselhos, por acreditar em mim, por sempre me incentivar e por me permitir partilhar alguns de seus conhecimentos.

Aos membros da banca, pelas críticas e sugestões bastante interessantes.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

Aos funcionários da PUC-Rio, especialmente aos do Laboratório, aos da Biblioteca e aos da Secretaria do Departamento de Informática, por todo o suporte prestado ao longo destes 8 anos de uma ótima e já saudosa convivência.

Ao professor Sérgio Lifschitz, pelo apoio à conclusão do doutorado através de uma bolsa temporária no Laboratório de Paralelismo do Departamento de Informática.

Aos meus “sobrinhos emprestados” (isto é, os filhos dos meus amigos), pelos divertidos momentos que nós passamos juntos.

## Resumo

Rosseti, I.; Ribeiro, C.C.. **Estratégias seqüenciais e paralelas de GRASP com reconexão por caminhos para o problema de síntese de redes a 2-caminhos**. Rio de Janeiro, 2003. 121 p. Tese de Doutorado — Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Seja  $G = (V, E)$  um grafo não-orientado com custos não-negativos em suas arestas e  $D$  um conjunto de pares origem-destino. Um 2-caminho entre os nós  $(s, t)$  é um caminho de  $s$  a  $t$  formado por, no máximo, 2 arestas. O problema de síntese de redes com 2-caminhos (2PNDP) consiste em encontrar um subconjunto de arestas com custo mínimo que contenha um 2-caminho entre as extremidades de cada par origem-destino pertencente a  $D$ . Aplicações deste problema encontram-se no projeto de redes de comunicação, onde caminhos com poucas arestas são desejáveis para garantir alta confiabilidade e pequenos atrasos.

A metaheurística GRASP é um processo multipartida para resolver problemas combinatórios, cujas iterações consistem de duas fases, uma fase de construção e outra de busca local. O algoritmo retorna a melhor solução encontrada depois de um número determinado de iterações. Aplica-se a técnica de reconexão por caminhos ao final de cada iteração GRASP para melhorar a qualidade das soluções.

Implementações paralelas de metaheurísticas são muito robustas. A maior parte das implementações paralelas da metaheurística GRASP segue uma estratégia do tipo independente, baseada na distribuição balanceada das iterações pelos processadores. No caso de estratégias colaborativas, os processadores trocam e compartilham informações coletadas ao longo da trajetória que cada um deles investiga.

Nesta tese são desenvolvidas heurísticas seqüenciais e paralelas para 2PNDP. São analisadas variantes e combinações de GRASP e reconexão por caminhos, comparando-se os resultados obtidos pelos algoritmos desenvolvidos com aqueles obtidos por outros algoritmos descritos na literatura. Heurísticas GRASP paralelas com reconexão por caminhos são avaliadas e comparadas para verificar qual o papel que a colaboração entre os processadores desempenha na qualidade das soluções e nos tempos de processamento. Procura-se também estudar a melhor maneira de desenvolver implementações paralelas, para se utilizar da melhor forma possível os recursos computacionais e reduzir conflitos de memória e comunicação.

### Palavras-chave

Síntese de redes a 2-caminhos; metaheurísticas; GRASP; reconexão por caminhos; paralelismo.

## Abstract

Rosseti, I.; Ribeiro, C.C.. **Sequential and parallel strategies of GRASP with path-relinking for the 2-path network design problem**. Rio de Janeiro, 2003. 121 p. PhD. Thesis — Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Let  $G = (V, E)$  be a connected undirected graph, where  $V$  is the set of nodes and  $E$  denotes the set of edges. A 2-path between nodes  $(s, t)$  is a sequence of at most two edges connecting them. Given a non-negative weight function associated with edges of  $G$  and a set  $D$  of origin-destination pairs of nodes, the 2-path network design problem (2PNDP) consists in finding a minimum weighted subset of edges containing a 2-path between the extremities of every origin-destination pair in  $D$ . Applications can be found in the design of communication networks, in which paths with few edges are sought to enforce high reliability and small delays.

The GRASP metaheuristic is a multistart process, in which each iteration consists of two phases: construction and local search. The best solution found after a fixed number of iterations is returned. Path-relinking is applied as an attempt to improve the solutions found at the end of each GRASP iteration.

Parallel implementations of metaheuristics are very robust. Typical parallelizations of GRASP correspond to multiple-walk independent-thread strategies, based on the balanced distribution of the iterations over the processors. In the case of multiple-walk cooperative-thread strategies, the processors exchange and share information collected along the trajectories that they investigate.

In this thesis, sequential and parallel heuristics are developed for 2PNDP. Variants and combinations of GRASP with path-relinking are analysed by comparing the results of the proposed algorithms with those obtained by others algorithms described in the literature. Parallel GRASP with path-relinking heuristics are compared to investigate the influence of the cooperation among processors in terms of solution quality and processing time. We also explore different strategies to optimize the parallel implementations, to make better use of the computational resources and to reduce communication and memory conflicts.

## Keywords

2-path network design problem; metaheuristics; GRASP; path-relinking; parallelism.



## Conteúdo

1	Apresentação do Problema	14
1.1	O Problema de Síntese de Redes a $k$ -caminhos	14
1.1.1	Formulações de 2PNDP	15
1.1.2	Algoritmos	16
1.1.3	Resultados Computacionais	17
1.2	Variantes e Extensões	18
1.2.1	Problema de Síntese de Redes a $k$ -caminhos com Restrições de Fluxo	19
1.2.2	Problema da Árvore Geradora Mínima com $k$ -caminhos	19
1.2.3	Problema da Árvore de Steiner com $k$ -caminhos	20
1.3	Objetivos e Organização da Tese	22
2	Heurística GRASP	23
2.1	Introdução	23
2.2	Principais Componentes	25
2.2.1	Construção da Lista Restrita de Candidatos	26
2.2.2	Mecanismos Alternativos Usados na Fase Construtiva	28
2.2.2.1	GRASP Reativo	29
2.2.2.2	Perturbação dos Custos	29
2.2.2.3	Funções de Tendência	31
2.2.2.4	Memória e Aprendizado	32
2.2.2.5	Princípio da Otimalidade Progressiva	33
2.2.3	Reconexão por Caminhos	33
2.2.4	Extensões	37
2.2.4.1	Filtragem	37
2.2.4.2	Busca Local	38
2.2.4.3	Hibridizações	40
2.2.4.4	Tempo de Corte de Execução	40
2.3	GRASP para 2PNDP	41
2.3.1	Fase de Construção	42
2.3.2	Fase de Busca Local	43
2.3.2.1	Busca Local por Ordem Circular	44
2.3.2.2	Busca Local Tabu	45
2.3.3	Reconexão por Caminhos	46
2.4	Considerações Finais	49
3	Resultados Computacionais	51
3.1	Geração dos Problemas Teste	52
3.2	Comparação entre as Diferentes Versões da Heurística GRASP	52
3.3	Comparação de GPRm com o Algoritmo Guloso	59
3.4	GRASP com Reconexão por Caminhos e Busca Local Tabu	64
3.5	Comentários Finais	66

4	Estratégias de Paralelização	<b>67</b>
4.1	Revisão Bibliográfica	68
4.2	Estratégia GRASP Seqüencial com Reconexão por Caminhos Bidirecional	71
4.3	Estratégia Paralela Independente	72
4.4	Estratégia Paralela Colaborativa Centralizada	73
4.4.1	Mestre Gerenciando o Conjunto de Soluções de Elite	75
4.4.2	Diminuição no Número de Soluções Enviadas ao Mestre	76
4.4.2.1	Redução do Número de Soluções Enviadas	76
4.4.2.2	Verificação do Custo antes do Envio da Solução	78
4.4.3	Mestre com Dois Processos	79
4.4.4	Mestre Fazendo Iterações em um Único Processo	80
4.5	Estratégia Paralela Colaborativa Distribuída	80
4.6	Resultados Computacionais	81
4.6.1	Comparação da Estratégia Colaborativa Básica com a Independente	83
4.6.2	Comparação de Estratégias Colaborativas Diminuindo o Número de Soluções Enviadas	84
4.6.3	Estudo do Envio do Custo e da Solução Separadamente	84
4.6.3.1	Análise das Estratégias Colaborativas com o Envio de Três Soluções	87
4.6.3.2	Análise das Estratégias Colaborativas com o Envio de Duas Soluções	87
4.6.3.3	Análise das Estratégias Colaborativas com o Envio de Uma Solução	89
4.6.4	Comparação das Melhores Estratégias Colaborativas com a Independente	90
4.6.5	Comparação entre a Estratégia Independente e a Colaborativa com Envio de Três Custos e Três Soluções Separadamente	92
4.7	Considerações Finais	102
5	Conclusões e Extensões	<b>107</b>

## Lista de Figuras

1.1	Exemplo de 2-estrela.	15
1.2	Pseudo-código do algoritmo guloso [25].	18
2.1	Pseudo-código da versão básica da metaheurística GRASP.	25
2.2	Pseudo-código da fase de construção.	26
2.3	Pseudo-código da fase de busca local.	26
2.4	Refinamento do pseudo-código da fase de construção.	28
2.5	Pseudo-código da heurística GRASP com intensificação por reconexão por caminhos para um problema de minimização	36
2.6	Pseudo-código do procedimento de reconexão por caminhos para um problema de minimização baseado em estratégias encontradas na literatura.	37
2.7	Pseudo-código da heurística GRASP com intensificação por reconexão por caminhos com tempo de corte de execução para um problema de minimização	42
2.8	Pseudo-código da fase de construção para 2PNDP.	43
2.9	Pseudo-código da busca local por ordem circular para 2PNDP.	45
2.10	Pseudo-código da busca local tabu para 2PNDP.	47
2.11	Pseudo-código do método misto de reconexão por caminhos para 2PNDP.	49
3.1	Comparação entre as variantes de GRASP e reconexão por caminhos para a instância de 80 nós com o valor do alvo igual a 591.	56
3.2	Comparação entre as variantes de GRASP e reconexão por caminhos para a instância de 80 nós com o valor do alvo igual a 588.	56
3.3	Comparação entre as variantes de GRASP e reconexão por caminhos para a instância de 80 nós com o valor do alvo igual a 585.	57
3.4	Comparação entre as variantes de GRASP e reconexão por caminhos para a instância de 90 nós com o valor do alvo igual a 673.	57
3.5	Comparação entre as variantes de GRASP e reconexão por caminhos para a instância de 90 nós com o valor do alvo igual a 671.	58
3.6	Comparação entre as variantes de GRASP e reconexão por caminhos para a instância de 90 nós com o valor do alvo igual a 669.	58
3.7	Comportamento da estratégia G para a instância de 80 nós, variando os valores do alvo.	59
3.8	Comparação entre as variantes de GRASP e reconexão por caminhos com o procedimento de busca local tabu para a instância de 80 nós com o valor do alvo igual a 588.	65

3.9	Comparação entre as variantes de GRASP e reconexão por caminhos com o procedimento de busca local tabu para a instância de 90 nós com o valor do alvo igual a 671.	65
4.1	Pseudo-código da heurística GRASP seqüencial com reconexão por caminhos bidirecional.	72
4.2	Pseudo-código da heurística GRASP paralela independente com reconexão por caminhos bidirecional executada em cada processador.	74
4.3	Pseudo-código da estratégia paralela colaborativa com reconexão bidirecional por caminhos com o mestre gerenciando o conjunto de soluções de elite.	77
4.4	Pseudo-código da estratégia paralela distribuída com reconexão por caminhos bidirecional.	82
4.5	Comparação entre as estratégias colaborativa e independente usando 2 processadores.	85
4.6	Comparação entre as estratégias colaborativa e independente usando 4 processadores.	85
4.7	Comparação entre as estratégias colaborativa e independente usando 8 processadores.	86
4.8	Comparação entre as estratégias colaborativas variando o número de soluções enviadas ao mestre.	86
4.9	Comparação entre as estratégias colaborativas com envio de três soluções a cada iteração, com custos e soluções enviadas separadamente.	88
4.10	Comparação entre as estratégias colaborativas com envio de duas soluções a cada iteração, com custos e soluções enviadas separadamente.	88
4.11	Comparação entre as estratégias colaborativas com envio de uma solução a cada iteração.	91
4.12	Comparação entre as estratégias colaborativas em que o processador mestre trabalha.	91
4.13	Comparação entre as melhores estratégias colaborativas e a independente.	93
4.14	Comparação entre a estratégia colaborativa com envio de três custos e três soluções separadamente e a estratégia independente usando 2 processadores.	93
4.15	Comparação entre a estratégia colaborativa com envio de três custos e três soluções separadamente e a estratégia independente usando 4 processadores.	94
4.16	Comparação entre a estratégia colaborativa com envio de três custos e três soluções separadamente e a estratégia independente usando 8 processadores.	94
4.17	Comparação entre a estratégia colaborativa com envio de três custos e três soluções separadamente e a estratégia independente usando 16 processadores.	95

4.18	Comparação entre a estratégia colaborativa com envio de três custos e três soluções separadamente e a estratégia independente usando 32 processadores.	95
4.19	Variação do número de processadores para a estratégia independente.	96
4.20	Variação do número de processadores para a estratégia colaborativa com envio de três custos e três soluções separadamente.	96
4.21	Acelerações das estratégias independente e colaborativa com envio de três custos e três soluções separadamente.	98
4.22	Médias dos tempos de 10 execuções das estratégias independente e colaborativa com envio de três custos e três soluções separadamente com 3200 iterações.	98
4.23	Comparação dos tempos das 200 execuções das estratégias independente e colaborativa com envio de três custos e três soluções separadamente usando 2 processadores.	104
4.24	Comparação dos tempos das 200 execuções das estratégias independente e colaborativa com envio de três custos e três soluções separadamente usando 16 processadores.	104
4.25	Comparação entre as melhores estratégias colaborativas e a independente sobre a instância de 80 nós.	105
4.26	Variação do número de processadores para a estratégia independente usando um <i>cluster</i> de 32 processadores Pentium IV 1.7 GHz com 256 Mbytes.	106
4.27	Variação do número de processadores para a estratégia colaborativa com envio de três custos e três soluções separadamente <i>cluster</i> de 32 processadores Pentium IV 1.7 GHz com 256 Mbytes.	106

## Lista de Tabelas

3.1	Resultados obtidos com dez execuções das cinco variantes com tempo de processamento pré-fixado.	54
3.2	Resultados da execução do algoritmo guloso de Dahl e Johannessen.	63
3.3	Resultados da execução da heurística GRASP com reconexão por caminhos.	63
4.1	Tempos médios em segundos de 10 execuções das estratégias independente e colaborativa com envio de três custos e três soluções separadamente com 3200 iterações.	97
4.2	Médias das soluções de 10 execuções das estratégias independente e colaborativa com envio de três custos e três soluções separadamente com 3200 iterações.	99
4.3	Tempos das 200 execuções da estratégia independente para 16 processadores.	100
4.4	Tempos das 200 execuções da estratégia colaborativa para 16 processadores.	101