

**Adriana Cesário de Faria
Alvim**

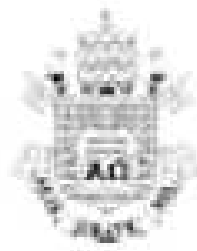
**Uma Heurística Híbrida de
Melhoria para o Problema de
Bin Packing e sua Aplicação
ao Problema de
Escalonamento de Tarefas**

TESE DE DOUTORADO

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

Rio de Janeiro
Junho de 2003

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Adriana Cesário de Faria Alvim

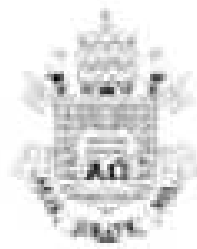
**Uma Heurística Híbrida de Melhoria para o
Problema de Bin Packing e sua Aplicação
ao Problema de Escalonamento de Tarefas**

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
Junho de 2003



Adriana Cesário de Faria Alvim

**Uma Heurística Híbrida de Melhoria para o
Problema de Bin Packing e sua Aplicação
ao Problema de Escalonamento de Tarefas**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Informática 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. Luiz Satoru Ochi

Departamento de Ciência da Computação — UFF

Prof. Nair Maria Maia de Abreu

COPPE — UFRJ

Prof. Nei Yoshihiro Soma

Engenharia Eletrônica e Computação — ITA

Prof. Nélio Domingues Pizzolato

Departamento de Engenharia Industrial — PUC-Rio

Prof. Ney Augusto Dumont

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico —
PUC-Rio

Rio de Janeiro, 13 de Junho de 2003

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

Adriana Cesário de Faria Alvim

Graduou-se em Comunicação Social na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Kursou mestrado em Informática na PUC-Rio. Durante parte do doutorado foi pesquisadora visitante no Laboratoire PRISM (Versailles, França).

Ficha Catalográfica

Alvim, Adriana C. F.

Uma Heurística Híbrida de Melhoria para o Problema de *Bin Packing* e sua Aplicação ao Problema de Escalonamento de Tarefas/ Adriana Cesário de Faria Alvim; orientador: Celso Carneiro Ribeiro. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Informática, 2003.

v., 135 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. Problema de Empacotamento Unidimensional. 3. Heurísticas. 4. Metaheurísticas. 5. Busca Tabu. 6. Otimização Combinatória. 7. Escalonamento de Tarefas em Processadores Paralelos I. Ribeiro, Celso C.. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Informática. III. Título.

CDD: 004

Dedico esta tese à minha amada família,
minha mãe Sandra (in memoriam), meu pai Pedro,
meus irmãos Isabela, Patrícia e Ricardo,
e à querida tia Sophia.

Agradecimentos

Ao Prof. Celso Carneiro Ribeiro, pela orientação simplesmente perfeita, que eu desejo seguir como exemplo. Agradeço também pela fundamental contribuição na minha formação acadêmica, desde o mestrado, e, ainda, pela amizade e carinho.

A Eduardo Uchoa, grande amigo, pela colaboração generosa e a sua doce família, Índia e Leon, que me recebeu inúmeras vezes em sua casa permitindo valiosas discussões.

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

A PUC–Rio, pelo apoio à conclusão do doutorado através da concessão de uma bolsa parcial de isenção.

Aos queridos amigos da PUC–Rio, pela camaradagem indispensável em um ambiente de estudo e trabalho.

Ao colega Humberto Longo, pela paciência e suporte em parte dos experimentos computacionais.

A todos os professores do Departamento de Informática da PUC–Rio, pelos ensinamentos e exemplo profissional.

Aos funcionários da secretaria, biblioteca e laboratório do Departamento de Informática, em especial, Deborah, Ruth, Rosane, Emanuelle, Rosangela e Cosme, pela boa vontade de sempre.

Às instituições CNPq e CAPES, pela credibilidade e apoio financeiro.

Ao Laboratório PRiSM, em Versalhes, França, pela oportunidade de desenvolver parte desta tese usando sua estrutura e principalmente à Profa. Catherine Roucairol e ao Prof. Van-Dat Cung que me acolheram em sua equipe. Também gostaria de agradecer ao companheirismo dos amigos Alberto Lerner e Paulo Boaventura durante a minha permanência na França.

Ao meu grande amigo Madiagne Diallo, pelos conselhos profissionais e ajuda nas traduções para a língua francesa.

A todos que me acompanharam, em diversos lugares, em um copo de cerveja.

Resumo

Alvim, Adriana C. F.; Ribeiro, Celso C.. **Uma Heurística Híbrida de Melhoria para o Problema de *Bin Packing* e sua Aplicação ao Problema de Escalonamento de Tarefas.** Rio de Janeiro, 2003. 135p. Tese de Doutorado — Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A principal contribuição desta tese consiste no desenvolvimento de uma heurística híbrida, robusta e eficiente, para o problema de empacotamento unidimensional. A heurística proposta utiliza os seguintes componentes: limites inferiores e superiores do número de caixas; reduções; abordagem dual para a obtenção de soluções iniciais; heurísticas para redistribuição dos pesos das caixas baseadas em dominância, equilíbrio e desequilíbrio de peso; e busca tabu. O outro objetivo desta tese é a aplicação desta heurística para a solução do problema de escalonamento em processadores paralelos idênticos. São apresentados resultados computacionais obtidos sobre centenas de problemas testes da literatura.

Palavras-chave

problema de empacotamento unidimensional, heurísticas, metaheurísticas, busca tabu, otimização combinatória, escalonamento de tarefas em processadores paralelos.

Abstract

Alvim, Adriana C. F.; Ribeiro, Celso C.. **A Hybrid Improvement Heuristic for the Bin Packing Problem and its Application to the Problem of Task Scheduling**. Rio de Janeiro, 2003. 135p. PhD. Thesis — Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

We propose in this work a hybrid improvement procedure for the bin packing problem. This heuristic has several components: lower and upper bounds; reductions; construction of initial solutions by reference to the dual problem; heuristics for load redistribution based on dominance, differencing, and unbalancing; and tabu search. We also investigate the application of this hybrid heuristic to the problem of task scheduling on identical parallel processors. Computational results on hundreds of benchmark test problems are presented.

Keywords

bin packing problem, heuristics, metaheuristics, tabu search, combinatorial optimization, task scheduling on multiprocessors.

Conteúdo

1	Introdução	12
2	O Problema de <i>Bin Packing</i>	14
2.1	Definição do Problema	14
2.2	Revisão Bibliográfica	15
2.2.1	Algoritmos Exatos	15
2.2.2	Algoritmos de Aproximação	18
2.2.3	Outras Heurísticas	21
2.2.4	Limites e Reduções	23
2.2.4.1	Limite Inferior L_1	24
2.2.4.2	Limite Inferior L_2 de Martello e Toth	24
2.2.4.3	Critério de Dominância e Redução	26
2.2.4.4	Limite Inferior L_3 de Martello e Toth	29
2.2.4.5	Limite Inferior $L_*^{(p)}$ de Fekete e Schepers	30
2.2.4.6	Novo Limite Inferior L_\emptyset	34
3	Heurística Híbrida de Melhoria para BP	39
3.1	Fase de Construção	40
3.1.1	Dual Best-Fit Decreasing (DBFD)	40
3.1.2	Dual Worst Sum-Fit Decreasing (DWSFD)	41
3.1.3	Dual Best 3-Fit Decreasing (DB3FD)	43
3.1.4	Dual Worst-Fit Decreasing (DWFd)	45
3.2	Fase de Redistribuição	46
3.2.1	Estratégia de Equilíbrio de Peso	47
3.2.1.1	O Método de Diferenciação de Karmarkar e Karp	47
3.2.1.2	Versão Randomizada do Método de Diferenciação	49
3.2.1.3	Descrição da Estratégia de Equilíbrio de Peso	50
3.2.2	Estratégia de Desequilíbrio de Peso	52
3.2.3	Regra de Dominância de Objetos	54
3.2.4	Descrição do Algoritmo de Redistribuição	55
3.3	Fase de Melhoria	56
3.4	Experimentos Computacionais	66
3.4.1	Parâmetros	67
3.4.2	Problemas Testes	68
3.4.3	Estudo das Fases de HI_BP	70
3.4.4	Comparação com Outros Métodos	72
3.4.5	Robustez	73
3.4.6	Considerações	76
4	O Problema de Escalonamento em Processadores Paralelos Idênticos ($P C_{\max}$)	79

4.1	Definição do Problema	79
4.2	Revisão Bibliográfica	80
4.2.1	Relação de Dualidade	87
4.2.2	Limites e Estrutura da Solução	89
5	Heurística Híbrida de Melhoria Modificada para $P C_{\max}$	96
5.1	As Três Fases: Construção, Redistribuição e Melhoria	96
5.2	Experimentos Computacionais	99
5.2.1	Problemas Testes	101
5.2.2	Resultados Computacionais	101
5.2.3	Estudo do Impacto de Diferentes Métodos de Busca para a Heurística HI_PCmax	102
5.2.4	Estudo das Diferentes Fases da Heurística HI_PCmax	104
5.2.5	Comparação com Outros Métodos da Literatura	107
6	Conclusões	118
A	Exemplos da aplicação do limite L_{θ} a instâncias de BP	130
B	Algoritmo 1/5-dual-BP para BP	134

Lista de Figuras

2.1	Pseudo-código do procedimento de redução MTRP	28
2.2	Zonas de ganho e de perda para a função $u^{(k)}$	32
2.3	Zonas de ganho e de perda para a função $U^{(\alpha)}$	33
3.1	Pseudo-código da heurística construtiva DBFD	41
3.2	Pseudo-código da heurística construtiva DWSFD	42
3.3	Pseudo-código da heurística construtiva DB3FD	44
3.4	Pseudo-código da heurística construtiva DWFD	46
3.5	Ilustração do procedimento DM de Karmarkar e Karp	48
3.6	Pseudo-código da estratégia de equilíbrio de peso	52
3.7	Pseudo-código da estratégia de desequilíbrio de peso	53
3.8	Pseudo-código da regra de dominância de objeto	55
3.9	Pseudo-código da fase de redistribuição	57
3.10	Pseudo-código do procedimento de seleção de movimento	62
3.11	Pseudo-código do procedimento de melhoria para reduzir invariabilidade	63
3.12	Pseudo-código do procedimento C+R+M_BP	64
3.13	Pseudo-código da heurística híbrida para o problema de <i>bin packing</i> HI_BP	66
4.1	Pseudo-código do algoritmo AHS	89
5.1	Pseudo-código da heurística híbrida modificada HI_PCmax	100
B.1	Pseudo-código do algoritmo 1/5-dual-BP	136

Lista de Tabelas

2.1	Exemplo do limite $L_*^{(p)}(I)$	34
3.1	Tipos de movimentos	59
3.2	Resultados do experimento que analisa a importância das fases de HI_BP	71
3.3	HI_BP versus Perturbation MBS' + VNS	74
3.4	Instâncias do GRUPO-II para as quais HI_BP melhorou as melhores soluções conhecidas.	75
3.5	Estatísticas de cinco execuções de HI_BP, cada uma delas com uma diferente semente	77
4.1	Dados da instância usada como exemplo para o cálculo do limite L_θ	94
5.1	Estudo dos diferentes métodos de busca para HI_PCmax	103
5.2	Estudo da importância das três fases de HI_PCmax	105
5.3	Estatísticas das fases, heurísticas e número de iterações de uma execução de HI_PCmax	108
5.4	Estatísticas, grupo uniforme, intervalo [1,100]	111
5.5	Estatísticas, grupo uniforme, intervalo [1,1000]	112
5.6	Estatísticas, grupo uniforme, intervalo [1,10000]	113
5.7	Estatísticas, grupo não-uniforme, intervalo [1, 100]	114
5.8	Estatísticas, grupo não-uniforme, intervalo [1, 1000]	115
5.9	Estatísticas, grupo não-uniforme, intervalo [1, 10000]	116
5.10	Comparação dos métodos HI_PCmax e B&B	117