



Alexandre Rocha Duarte

**Atribuição de árbitros em competições
esportivas: Algoritmos e aplicações mono e
multi-critério**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Informática
do Departamento de Informática da PUC-Rio como requisito
parcial para obtenção do título de Doutor em Informática

Orientador: Prof. Celso Carneiro Ribeiro

Rio de Janeiro
Setembro de 2008



Alexandre Rocha Duarte

**Atribuição de árbitros em competições
esportivas: Algoritmos e aplicações mono e
multi-critério**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Informática do Departamento de Informática do Centro Técnico Científico da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Informática. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Celso Carneiro Ribeiro

Orientador
Instituto de Computação — UFF

Prof. Jayme Luiz Szwarcfiter

Departamento de Ciência da Computação — UFRJ

Prof. Luciana Salete Buriol

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação — UFRGS

Prof. Sérgio Lifschitz

Departamento de Informática — PUC-Rio

Prof. Simone de Lima Martins

Instituto de Computação — UFF

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico — PUC-Rio

Rio de Janeiro, 05 de Setembro de 2008

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

Alexandre Rocha Duarte

Graduou-se em Ciência da Computação na Universidade Federal de Viçosa-MG. Durante sua graduação, foi bolsista do CNPq em trabalho de iniciação científica no departamento de administração da UFV. Durante o mestrado, na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, foi bolsista CAPES e desenvolveu um trabalho de aplicação de técnicas de otimização combinatória à resolução de um problema de correspondência de grafos. No doutorado, também bolsista da CAPES, trabalhou com problemas de otimização em esportes na PUC-Rio.

Ficha Catalográfica

Duarte, Alexandre Rocha

Atribuição de árbitros em competições esportivas: Algoritmos e aplicações mono e multi-critério / Alexandre Rocha Duarte; orientador: Celso Carneiro Ribeiro. — 2008.

130 f: il. ; 30 cm

Tese (Doutorado em Informática) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia

1. Informática – Teses. 2. Otimização Multi-critério. 3. Otimização em Esportes. 4. Metaheurísticas. 5. Programação Linear Inteira. 6. Problemas de Atribuição. I. Ribeiro, Celso Carneiro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Informática. III. Título.

CDD: 004

À Deus, por tornar real algo que, em diversos momentos, pareceu impossível.

Agradecimentos

Agradeço ao professor Celso Carneiro Ribeiro pela oportunidade, excelente orientação e amizade durante a realização deste trabalho.

Ao amigo Sebastián Urrutia por toda ajuda e pelo tempo dispensado durante boa parte do desenvolvimento desta pesquisa.

Ao amigo Thiago Noronha pela companhia nos diversos momentos de aflição mútua e a todos os colegas do departamento de Informática pela amizade que deixa saudades.

Ao Departamento de Informática da PUC-Rio pela oportunidade de realizar este trabalho de pós-graduação e a todos os professores e funcionários que sempre foram prestativos em todas as vezes que precisei.

À Bárbara, pelo amor, carinho, companheirismo e pela força, que foi fundamental em todos os momentos.

Aos meus pais Roberto e Ednorah e meus irmãos Daniel e Juliana, que apesar da distância, sempre estiveram presentes me incentivando e apoiando na realização deste sonho.

Aos pais da Bárbara, Jesus e Teresa, pelo constante apoio.

À CAPES pelo apoio financeiro através da bolsa de doutorado.

Resumo

Duarte, Alexandre Rocha; Ribeiro, Celso Carneiro. **Atribuição de árbitros em competições esportivas: Algoritmos e aplicações mono e multi-critério.** Rio de Janeiro, 2008. 130p. Tese de Doutorado — Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A otimização em esportes é uma área que reúne diversas aplicações relacionadas ao planejamento e gestão de atividades esportivas. Diversas técnicas de otimização combinatória têm sido aplicadas, por exemplo, à construção de tabelas de torneios e à análise do desempenho de equipes em competições. Um problema que surge no contexto da organização de competições esportivas consiste na determinação de quais árbitros atuarão em cada partida de um determinado torneio. Diversas regras devem ser observadas no processo de atribuição de árbitros, que em geral envolve também a consideração de vários objetivos. Esta tese tem como objetivo principal apresentar um estudo sobre um problema de atribuição de árbitros, comum a várias ligas esportivas amadoras. Demonstra-se que a versão de decisão do problema estudado é um problema NP-completo. Considera-se inicialmente duas variantes mono-objetivo do PAA, que diferem uma da outra pela função objetivo adotada. Propõe-se modelos de programação linear inteira que permitem uma abordagem exata para a resolução de instâncias de pequeno e médio portes. Com o intuito de tratar instâncias de tamanho real, propõe-se também abordagens aproximadas de resolução baseadas na metaheurística *Iterated Local Search* (ILS). Uma vez que o PAA tem origem em aplicações reais, ligadas a processos de tomada de decisões, é natural que envolva a consideração de diversos objetivos, muitas vezes em conflito. Tal fato motivou a investigação do uso de técnicas de otimização multi-critério que possam ser utilizadas na construção de um sistema de suporte a decisão e aplicadas a uma variante bi-objetivo do PAA, que considera simultaneamente as duas funções objetivo utilizadas nas variantes mono-objetivo estudadas. Abordagens de resolução exata e aproximada para esta variante bi-objetivo são propostas e seus resultados discutidos.

Palavras-chave

Otimização Multi-critério. Otimização em Esportes. Metaheurísticas. Programação Linear Inteira. Problemas de Atribuição.

Abstract

Duarte, Alexandre Rocha; Ribeiro, Celso Carneiro. **Referee assignment in sport tournaments: Mono and multi-criterium algorithms and applications.** Rio de Janeiro, 2008. 130p. PhD Thesis — Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Optimization in sports is a field of increasing interest. Combinatorial optimization techniques have been applied e.g. to game scheduling and playoff elimination. A problem that arises in competition management is the assignment of referees to games already scheduled. There are a number of rules and objectives that should be taken into account when referees are assigned to games. We address two mono-objective versions of a Referee Assignment Problem (RAP) common to many amateur leagues of sports such as soccer, baseball, and basketball. The problem is formulated by integer programming and its decision version is proved to be NP-complete. To tackle real-life large instances of the RAP, we propose a three-phase heuristic approach based on a constructive procedure, a repair heuristic to make solutions feasible, and a local search heuristic to improve feasible solutions, based on the metaheuristic iterated local search. Numerical results on realistic instances are presented and discussed. This work also investigates the solution of a bi-objective version of the RAP, which combines both objective functions used in the mono-objective versions. Exact and heuristic approaches are proposed to solve this bi-objective version and its computational results are discussed.

Keywords

Multi-criterium optimization. Sports optimization. Metaheuristics. Integer linear programming. Assignment problems.

Sumário

1	Introdução	14
2	O problema de atribuição de árbitros	17
2.1	Descrição do problema	17
2.2	Revisão da literatura	20
2.3	Formulação do PAA básico	23
2.4	Complexidade	24
2.5	Modelos de programação inteira	26
2.5.1	Modelo com número polinomial de variáveis	26
2.5.2	Modelos com número exponencial de variáveis	27
2.6	Resultados obtidos pelos modelos de programação inteira	31
2.6.1	Instâncias teste	31
2.6.2	Resultados numéricos	32
2.7	Conclusões	37
3	Heurísticas para o PAA básico	38
3.1	Heurísticas construtivas	39
3.1.1	Heurística construtiva que prioriza a viabilidade	39
3.1.2	Heurísticas construtivas que priorizam a função objetivo	44
3.2	Esquema baseado na metaheurística ILS	45
3.2.1	Busca local e vizinhanças	46
3.2.2	Busca local como um problema de programação linear inteira	47
3.2.3	Heurística reparadora	49
3.2.4	Heurística aprimorante	50
3.3	Heurística de três fases	52
3.4	Resultados computacionais	53
3.4.1	Algoritmos construtivos	53
3.4.2	Função de custo linear vs. quadrática	59
3.4.3	Heurística híbrida com modelo de PI	60
3.4.4	Contribuição das componentes da heurística	63
3.4.5	Abordagem exata vs. aproximada	64
3.5	Conclusões	67
4	Variantes e extensões	69
4.1	Restrições adicionais	70
4.2	Funções objetivo alternativas	71
4.3	Objetivo: minimizar tempos de espera	72
4.3.1	Resolução exata do PAA-minTE	73
4.3.2	Heurísticas para o PAA-minTE	74
4.4	Resultados computacionais	79
4.4.1	Heurísticas construtivas	79
4.4.2	Heurística híbrida com modelo de PI	83
4.4.3	Contribuição das componentes da heurística	85
4.4.4	Abordagem exata vs. aproximada	86

4.4.5	Comparação entre as funções objetivo	90
4.5	Conclusões	91
5	Abordagem bi-objetivo para o PAA	92
5.1	Otimização multi-objetivo	92
5.1.1	Noções preliminares	93
5.1.2	Resolução de problemas combinatórios multi-objetivo	95
5.2	Heurísticas para o bi-PAA	98
5.2.1	Heurísticas de três fases para o bi-PAA	99
5.2.2	Algoritmo Heuristica_biPAA	101
5.2.3	Reconexão por caminhos	103
5.2.4	Estrutura de <i>QuadTrees</i>	106
5.3	Resultados computacionais	106
5.3.1	Critérios para determinação dos pesos	107
5.3.2	Comparação das heurísticas de três fases	111
5.3.3	Reconexão por caminhos	114
5.3.4	Abordagem exata vs. aproximada	116
5.4	Conclusões	120
6	Conclusões	122
	Referências Bibliográficas	124

Lista de figuras

3.1	Instância I_1 com 65 localidades e padrão P_0 (alvo: 364)	57
3.2	Instância I_1 com 65 localidades e padrão P_1 (alvo: 837)	57
3.3	Instância I_1 com 85 localidades e padrão P_0 (alvo: 514)	58
3.4	65 localidades e padrão P_0 (alvo: 364).	62
3.5	65 localidades e padrão P_1 (alvo: 837).	63
3.6	85 localidades e padrão P_0 (alvo: 514).	63
4.1	Instância I_1 com 65 localidades e padrão P_0 (Alvo: 570)	82
4.2	Instância I_1 com 65 localidades e padrão P_1 (Alvo: 589)	82
4.3	Instância I_1 com 85 localidades e padrão P_0 (Alvo: 846)	83
4.4	Instância I_1 com 65 localidades e padrão P_0 (Alvo: 570)	84
4.5	Instância I_1 com 65 localidades e padrão P_1 (Alvo: 589)	84
4.6	Instância I_1 com 85 localidades e padrão P_0 (Alvo: 846)	85
5.1	Exemplo de fronteira de Pareto.	94
5.2	Instância com 65 localidades e padrão P_0 , 16 direções de busca.	108
5.3	Instância com 65 localidades e padrão P_0 , 32 direções de busca.	108
5.4	Instância com 65 localidades e padrão P_1 , 16 direções de busca.	109
5.5	Instância com 65 localidades e padrão P_1 , 32 direções de busca.	109
5.6	Instância com 85 localidades e padrão P_0 , 16 direções de busca.	110
5.7	Instância com 85 localidades e padrão P_0 , 32 direções de busca.	110
5.8	65 localidades e padrão P_0 , 32 direções de busca.	111
5.9	65 localidades e padrão P_1 , 32 direções de busca.	112
5.10	85 localidades e padrão P_0 , 32 direções de busca.	112
5.11	65 localidades e padrão P_0 , 64 direções de busca.	113
5.12	65 localidades e padrão P_1 , 64 direções de busca.	113
5.13	65 localidades e padrão P_1 , heurística 3fases-biObj + MIP_II.	114
5.14	65 localidades e padrão P_0 , 32 direções de busca, com e sem reconexão por caminhos.	115
5.15	65 localidades e padrão P_1 , 32 direções de busca, com e sem reconexão por caminhos.	115
5.16	85 localidades e padrão P_0 , 32 direções de busca, com e sem reconexão por caminhos.	116
5.17	65 localidades e padrão P_0 , 64 direções de busca, com e sem reconexão por caminhos.	116
5.18	65 localidades e padrão P_1 , 64 direções de busca, com e sem reconexão por caminhos.	117
5.19	65 localidades e padrão P_1 , 3fases-biObj + MIP_II + PR.	117
5.20	Instância com 50 partidas, 100 árbitros, 6 localidades e padrão P_0 , 32 direções de busca.	118
5.21	Instância com 50 partidas, 100 árbitros, 6 localidades e padrão P_0 , 64 direções de busca.	118
5.22	Instância com 60 partidas, 120 árbitros, 6 localidades e padrão P_0 , 32 direções de busca.	119

5.23	Instância com 60 partidas, 120 árbitros, 6 localidades e padrão P_0 , 64 direções de busca.	119
5.24	Instância com 60 partidas, 120 árbitros, 6 localidades e padrão P_1 , 32 direções de busca.	120
5.25	Instância com 50 partidas, 100 árbitros, 6 localidades e padrão P_0 , heurística 3fases-bi0bj + MIP_II + PR.	120
5.26	Instância com 60 partidas, 120 árbitros, 6 localidades e padrão P_0 , heurística 3fases-bi0bj + MIP_II + PR.	121

Lista de tabelas

2.1	Combinações para as dimensões das instâncias.	32
2.2	Instâncias com 40 partidas e 80 árbitros.	32
2.3	Instâncias com 50 partidas e 100 árbitros.	33
2.4	Instâncias com 60 partidas e 120 árbitros.	33
2.5	Instâncias com 80 partidas e 160 árbitros.	34
2.6	Instâncias com 40 partidas e 80 árbitros.	35
2.7	Instâncias com 50 partidas e 100 árbitros.	35
2.8	Instâncias com 60 partidas e 120 árbitros.	36
2.9	Instâncias com 80 partidas e 160 árbitros.	36
3.1	Níveis mínimos de qualificação.	42
3.2	Cálculo de c^2 .	43
3.3	Instâncias com 65 localidades e padrão P_0 .	54
3.4	Instâncias com 65 localidades e padrão P_1 .	55
3.5	Instâncias com 85 localidades e padrão P_0 .	56
3.6	Comparação entre as funções de custo linear e quadrática. $ D $ é o valor absoluto da diferença, para cada árbitro, entre os números de partidas desejado e o observado. As colunas do meio e da direita trazem as quantidades de árbitros na solução que apresentam a diferença exibida na coluna da esquerda para as funções objetivo linear e quadrática, respectivamente.	60
3.7	Tempos médios da variante 3fases_II + CEV + MIP para 100 iterações relativos somente à resolução do modelo de programação inteira que substitui o procedimento de busca local após cada perturbação da ILS.	61
3.8	Contribuição dos componentes da heurística 3fases_II+CEO_II + MIP (65 localidades e padrão P_0).	64
3.9	Contribuição dos componentes da heurística 3fases_II+CEO_II + MIP (65 localidades e padrão P_1).	64
3.10	Contribuição dos componentes da heurística 3fases_II+CEO_II + MIP (85 localidades e padrão P_0).	65
3.11	Instâncias com 80 partidas e 160 árbitros, com o tempo para a heurística limitado em 180s.	66
3.12	Instâncias com 100 partidas e 200 árbitros, com o tempo para a heurística limitado em 240s.	66
3.13	Instâncias com 120 partidas e 240 árbitros, com o tempo para a heurística limitado em 360s.	67
4.1	Instâncias com 40 partidas e 80 árbitros.	74
4.2	Instâncias com 50 partidas e 100 árbitros.	74
4.3	Instâncias com 60 partidas e 120 árbitros.	75
4.4	Instâncias com 80 partidas e 160 árbitros.	75
4.5	Instâncias com 65 localidades e padrão P_0 .	80
4.6	Instâncias com 65 localidades e padrão P_1 .	80
4.7	Instâncias com 85 localidades e padrão P_0 .	81

4.8	Contribuição dos componentes da heurística 3fases-minTE+CEO-minTE+ MIP_II (65 localidades e padrão P_0).	86
4.9	Contribuição dos componentes da heurística 3fases-minTE+CEO-minTE+ MIP_II (65 localidades e padrão P_1).	86
4.10	Contribuição dos componentes da heurística 3fases-minTE+CEO-minTE+ MIP_II (85 localidades e padrão P_0).	86
4.11	Instâncias com 80 partidas e 160 árbitros, com o tempo para a heurística limitado em 180 segundos.	87
4.12	Instâncias com 100 partidas e 200 árbitros, com o tempo para a heurística limitado em 240 segundos.	88
4.13	Instâncias com 120 partidas e 240 árbitros, com o tempo para a heurística limitado em 360 segundos.	89
4.14	Instâncias com 80 partidas e 160 árbitros, com o tempo para a heurística limitado em 360 segundos.	89
4.15	Instâncias com 100 partidas e 200 árbitros, com o tempo para a heurística limitado em 480 segundos.	90
4.16	Instâncias com 120 partidas e 240 árbitros, com o tempo para a heurística limitado em 720 segundos.	90
4.17	Comparação do tempo total de espera para as soluções encontradas pelas heurísticas 3fases + CEO_II e 3fases-minTE + CEO-minTE.	91