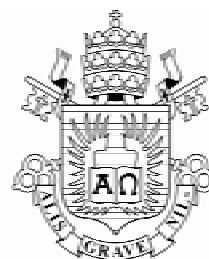


PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**André Vargas Abs da Cruz**

**Otimização de Planejamento com Restrições de  
Precedência usando Algoritmos Genéticos e Co-Evolução  
Cooperativa**

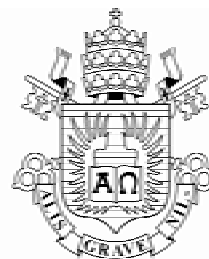
**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia  
Elétrica da PUC-Rio como requisito  
parcial para obtenção do grau de  
Mestre em Engenharia Elétrica

Orientadores: Prof. Marco Aurélio C. Pacheco  
Prof<sup>a</sup>. Marley M. B. R. Vellasco

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2003

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**André Vargas Abs da Cruz**

**Otimização de Planejamentos com Restrições de  
Precedência usando Algoritmos Genéticos e Co-Evolução  
Cooperativa**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

**Marco Aurélio C. Pacheco**

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

**Marley M. B. R. Vellasco**

Orientadora

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2003

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

### **André Vargas Abs da Cruz**

Graduou-se em Engenharia de Computação pela PUC-  
Rio em 1998

#### Ficha Catalográfica

Cruz, André Vargas Abs da

Otimização de planejamento com restrições de precedência usando algoritmos genéticos e co-evolução cooperativa / André Vargas Abs da Cruz; orientadores: Marco Aurélio C. Pacheco, Marley M. B. R. Vellasco. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2003.

[12], 65 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Algoritmos genéticos. 3. Co-evolução. 4. Otimização. 5. Planejamento. 6. Restrições de precedência. I. Pacheco, Marco Aurélio C. II. Vellasco, Marley M. B. R. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

Para meus pais, Ignacio e Regina.

## Agradecimentos

Ao CNPq, à FAPERJ e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Marco Aurélio C. Pacheco e Prof<sup>ª</sup>. Dra. Marley M. B. R. Vellasco, pelo estímulo e parceria na realização deste trabalho.

Aos meus pais, pela educação e apoio.

A Luciana, pelo carinho e compreensão.

Aos meus colegas da PUC-Rio e do ICA: Carlos Augusto Louzada Costa, Carlos Eduardo Erbesdobler, Carlos Hall, Cecília Camacho, Edison Tito, Juan Lazo, Karla Figueiredo, Laércio Brito, Luciana Falleti, Vinícius Vieira, Yvan Tupac.

Aos meus familiares e amigos que de uma forma ou de outra me estimularam e ajudaram.

## Resumo

Cruz, André Vargas Abs; Pacheco, Marco Aurélio Cavalcante; Vellasco, Marley Maria Rebuzzi. **Otimização de Planejamentos com Restrição de Precedência usando Algoritmos Genéticos e Co-Evolução Cooperativa**. Rio de Janeiro, 2003. 77p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta dissertação investiga o uso de Algoritmos Genéticos e de Co-Evolução Cooperativa na otimização de problemas de planejamento com restrições de precedência. Neste tipo de problema algumas ou todas as tarefas têm restrições que implicam na necessidade de planejá-las ou executá-las antes ou depois de outras. Por esta razão, o uso de modelos evolucionários convencionais como, por exemplo, os baseados em ordem pode gerar soluções inválidas, não penalizáveis, que precisam ser descartadas, comprometendo assim o desempenho do algoritmo. O objetivo do trabalho foi, portanto, estudar formas de representação de soluções para este tipo de problema capazes de gerar somente soluções válidas, bem como avaliar o desempenho dos modelos propostos. O trabalho consistiu de 3 etapas principais: um estudo sobre problemas de otimização de planejamento com algoritmos genéticos; a definição de novos modelos usando algoritmos genéticos e co-evolução cooperativa para otimização de problemas de planejamento com restrições de precedência e a implementação de uma ferramenta para estudo de caso.

O estudo sobre os problemas de otimização de planejamentos com algoritmos genéticos envolveu o levantamento de representações, dificuldades e características deste tipo de problema e, mais especificamente, de representações baseadas em ordem.

A modelagem do algoritmo genético consistiu fundamentalmente na definição de uma representação dos cromossomas e da função de avaliação que levasse em conta a existência de restrições de precedência (tarefas que devem ser planejadas/executadas antes de outras).

A construção do modelo co-evolucionário por sua vez consistiu em definir uma nova população, com uma outra representação, que se responsabilizasse pela distribuição dos recursos para execução das tarefas, responsabilidade esta que, no

modelo com algoritmos genéticos convencionais, era tratada de forma simples por um conjunto de heurísticas.

Finalmente, desenvolveu-se uma ferramenta para implementar estes modelos e tratar de um estudo de caso complexo que oferecesse as características necessárias para testar a qualidade das representações e avaliar os resultados. O estudo de caso escolhido foi a otimização do planejamento da descarga, armazenamento e embarque de minério de ferro de modo a minimizar o tempo de estadia dos navios em um porto fictício.

Foram realizados vários testes que demonstraram a capacidade dos modelos desenvolvidos em gerar soluções viáveis, sem a necessidade de heurísticas de correção, e os resultados obtidos foram comparados com os de um processo de busca aleatória. Em todos os casos, os resultados obtidos pelos modelos foram sempre superiores aos obtidos pela busca aleatória. No caso do modelo de representação com uma única população obteve-se resultados até 41% melhores do que com os obtidos por uma busca aleatória. No caso do modelo de representação com co-evolução o resultado ficou 33% melhor que a busca aleatória com tratamento de solução idêntico ao da solução co-evolucionária. Os resultados da co-evolução comparados com o algoritmo genético com uma única espécie foram 29% melhores.

## **Palavras-chave**

Algoritmos genéticos; co-evolução; otimização; planejamento; restrições de precedência

## Abstract

Cruz, André Vargas Abs; Pacheco, Marco Aurélio Cavalcante; Vellasco, Marley Maria Rebuzzi. **Schedule Optimization with Precedence Constraints using Genetic Algorithms and Cooperative Co-Evolution**. Rio de Janeiro, 2003. 77p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work investigates the use of Genetic Algorithms and Cooperative Co-Evolution in optimization of scheduling problems with precedence constraints. In this kind of problem some or all tasks have constraints that imply planning or executing them before or after others. For this reason, the use of order-based conventional evolutionary models may generate invalid solutions, which cannot be penalized, needing to be discarded and therefore compromising the algorithm performance. The main goal was therefore to study models for this kind of problem that are capable of generating only valid solutions. The work was divided in 3 main steps: a survey on scheduling optimization problems using genetic algorithms; definition of two models based on genetic algorithms and cooperative co-evolution for optimizing scheduling problems with precedence constraints; and the implementation of a tool for a case study.

The study on scheduling optimization problems with genetic algorithms consisted in gathering information about representations and characteristics of this kind of problem and, more specifically, about order-based representations.

The genetic algorithm modeling consisted basically in defining a chromosome representation and an evaluation function that took into account the existence of precedence constraints (tasks that must be scheduled or executed before others).

The co-evolutionary model consisted in defining a new population, with another representation scheme, which was responsible for distributing resources for tasks execution. On the conventional genetic algorithm model, this role was played by a simple set of heuristics.

Finally, a tool was developed for implementing those models and treating a complex case study which offered the needed characteristics for testing representation performance and evaluating results. The chosen case study was the



optimization of iron ore dumping, stocking and ship loading on a fictitious harbor, targeting minimization of ships waiting time.

Tests were done in order to demonstrate the ability of the developed models in generating viable solutions without the need of corrective heuristics and the results were compared to the results obtained through exhaustive search. In all cases, the models' results were better than the exhaustive search ones. In the case where the representation used a single population the results obtained were up to 41% better than the ones with the exhaustive search. The co-evolutionary results outperformed the co-evolutionary search with the same solution representation by 33%. Compared to the single specie genetic algorithm, the co-evolutionary model outperformed it by 29%.

## **Keywords**

Genetic algorithms; co-evolution; optimization; scheduling; precedence constraints

## Sumário

1	Introdução	13
1.1	Motivação	13
1.2	Objetivos do Trabalho	14
1.3	Descrição do Trabalho	14
1.4	Organização da Dissertação	17
2	Problemas de Planejamento	18
2.1	Descrição do Problema	18
2.2	Planejamento de Uso de Recursos em Portos de Embarque de Minério	19
2.2.1	Funcionamento do Porto de Tubarão	19
2.3	Modelagem de Soluções por Algoritmo Genético	27
3	Algoritmos Genéticos e Co-Evolução	30
3.1	Representação de Problemas Baseados em Ordem	30
3.1.1	Problema do Caixeiro Viajante	30
3.1.2	Problema do Caixeiro Viajante com Restrições de Precedência	38
3.2	Co-Evolução	39
3.2.1	Co-Evolução Cooperativa	39
3.2.2	Métodos de Interação entre as Populações	43
4	Modelos Propostos para Otimização de Planejamentos com Restrições de Precedência	46
4.1	Representação com Algoritmos Genéticos	46
4.2	Representação com Algoritmos Co-Evolucionários Cooperativos	51
5	Estudo de Caso	56
5.1	Planejamento de um Porto Fictício	56
5.2	Resultados	65
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	73
7	Referências Bibliográficas	75

## Lista de Figuras

Figura 1 – Visão geral do porto	21
Figura 2 – Seqüência de Planejamento	26
Figura 3 – Algoritmo inver-over	37
Figura 4 – Gráfico da equação	40
Figura 5 – Gráfico para x igual a 40	41
Figura 6 – Gráfico para x igual a -40	41
Figura 7 – Modelo co-evolucionário genérico	43
Figura 8 – Exemplo de grafo definindo precedências	47
Figura 9 – Algoritmo para gerar um planejamento válido a partir de uma lista de prioridades	48
Figura 10 – Grafo após o planejamento de uma tarefa	48
Figura 11 – Grafo após o planejamento de duas tarefas	49
Figura 12 – Algoritmo para selecionar o recurso para execução da tarefa	51
Figura 13 – Modelo co-evolucionário para planejamento	52
Figura 14 – Cromossoma representando os recursos para cada tarefa	53
Figura 15 – Algoritmo decodificador	54
Figura 16 – Atuação do crossover e da mutação sobre o cromossoma	55
Figura 17 – Algoritmo completo de otimização	58
Figura 18 – Diagrama do porto fictício	59
Figura 19 – Exemplo de grafo com um navio que pode atracar em diversos píeres	62
Figura 20 – Grafo com navio que pode atracar em diversos píeres após atracação	63
Figura 21 – Trecho do arquivo de configuração	65
Figura 22 – Resultados com o algoritmo genético com uma espécie e fila de 35 navios	66
Figura 23 – Resultados com algoritmo genético com uma espécie e fila de 20 navios	67
Figura 24 – Comparação dos resultados da busca aleatória e da co-evolução	68
Figura 25 – Trecho do arquivo de saída contendo o planejamento	69
Figura 26 – Comparação dos resultados obtidos	71

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Lista de recursos do porto	20
Tabela 2 – Lista de adjacências	35
Tabela 3 – Lista de prioridades para um grafo com 7 tarefas	47
Tabela 4 – Cromossoma com 7 tarefas	50
Tabela 5 – Seções do arquivo de configuração do sistema	64
Tabela 6 – Comparação percentual dos resultados	69
Tabela 7 – Tempo de execução dos diversos modelos	70