

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Miguel Angel Fernández Pérez**

**Um método heurístico para o problema  
de escalonamento multiobjetivo em  
vários ambientes de máquinas**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-  
graduação em Engenharia de Produção do  
Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio.

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Fernanda Maria Pereira Raupp

Rio de Janeiro

Março de 2012



**Miguel Angel Fernández Pérez**

**Um método heurístico para o problema  
de escalonamento multiobjetivo em  
vários ambientes de máquinas**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-  
graduação em Engenharia de Produção da PUC-Rio.  
Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof<sup>a</sup>. Fernanda Maria Pereira Raupp**

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

**Prof<sup>a</sup>. Marcia Helena Costa Fampa**

Departamento de Ciência de Computação- IM/UFRJ

**Prof. Eduardo Uchoa Barboza**

Departamento de Engenharia de Produção – UFF

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 9 de Março de 2012

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

### **Miguel Angel Fernández Pérez**

Graduou-se em Engenharia Industrial na UNMSM (Universidad Nacional Mayor de San Marcos) de Lima, Perú, no ano 2007. Desempenhou cargos na área de planejamento e programação de produção em empresas.

#### Ficha Catalográfica

Fernández Pérez, Miguel Angel

Um método heurístico para o problema de escalonamento multiobjetivo em vários ambientes de máquinas / Miguel Angel Fernández Pérez ; orientadora: Fernanda Maria Pereira Raupp. – 2012. 109 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2012.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Flow shop problem. 3. Flexible job shop problem. 4. Integrated resource selection and operation sequences. 5. Advanced planning and scheduling. 6. Otimização multiobjetivo. 7. Não-dominância. 8. Método de Newton. I. Raupp, Fernanda Maria Pereira. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III. Título.

CDD: 658.5

## Agradecimentos

À minha orientadora, Professora Fernanda Maria Raupp, por ter aceitado orientar minha dissertação, pela confiança que deu em mim, pelos ensinamentos e contribuição durante a elaboração deste estudo.

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

Aos professores do Departamento de Engenharia Industrial, os quais ajudaram na minha formação acadêmica no Mestrado.

Aos meus amigos de Mestrado, meu amigo Maycol Falla, seu irmão Edson e sua mãe Sandra, os quais fizeram que minha estadia aqui no Rio muito agradável.

Finalmente, agradeço aos meus pais Guzmán e Dionicia, que sempre me apoiaram, aos meus irmãos Aldo e Arturo e a toda minha família.

## Resumo

Pérez, Miguel Angel Fernández; Raupp, Fernanda Maria Pereira (Orientadora). **Um método heurístico para o problema de escalonamento multiobjetivo em vários ambientes de máquinas.** Rio de Janeiro, 2012. 109p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Um problema de programação ou escalonamento de produção tem como finalidade determinar uma seqüência factível de processamento de um conjunto de operações e de um conjunto de recursos ao longo de um intervalo de tempo, visando otimizar uma ou mais medidas de desempenho, geralmente associadas ao fator tempo ou ao balanceamento de uso dos recursos. Nesse problema, podem existir ainda restrições de precedência entre as operações e de disponibilidade de recursos por operação. Tais operações formam parte das tarefas ou pedidos de clientes por bens ou serviços. Problemas de escalonamento podem ser difíceis, particularmente, porque o tempo é um limitante para se buscar a melhor seqüência entre as seqüências factíveis possíveis. Porém, encontrar boas soluções para problemas complexos de otimização em um intervalo de tempo aceitável é crucial em sistemas produtivos competitivos, onde os problemas de escalonamento são comumente encontrados. A dissertação tem como foco o desenvolvimento de um novo método computacional para resolver problemas de escalonamento nos ambientes de operações: *flow shop*, *flexible job shop*, *integrated resource selection and operation sequences* e *advanced planning and scheduling*. Inspirado no método de Newton para problemas de otimização contínua multiobjetivo de Fliege *et al.* (2008), o método proposto é adaptado a cada ambiente de operação. Exemplos e experimentos numéricos com o método proposto são apresentados para cada ambiente de operações, assim como são realizadas comparações com algoritmos existentes.

## Palavras Chave

Flow shop problem; Flexible job shop problem; Integrated resource selection and operation sequences; Advanced planning and scheduling; Otimização multiobjetivo; Não-dominância; Método de Newton.

## Abstract

Pérez, Miguel Angel Fernández; Raupp, Fernanda Maria Pereira (Advisor). **A heuristic method for multiobjective scheduling problem in various machine environments.** Rio de Janeiro, 2012. 109p. M.Sc. Dissertation – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The production scheduling problem aims to determine a feasible sequence operation processes and resources over a period of time to optimize one or more measures of performance, usually associated with the time factor or balancing the use of resources. In this problem, precedence constraints between operations and availability of resources per operation may exist. Such operations are part of the tasks or customer orders for products or services. Scheduling problems can be difficult, particularly because time is a limiting factor to get the best sequence among possible feasible sequences. However, finding good solutions for complex optimization problems in an acceptable amount time is crucial in competitive production systems, where the scheduling problems are usually found. The dissertation is focused on the development of a new computational method for solving scheduling problems in the operations environments: *flow shop*, *flexible job shop*, *integrated resource selection and operation sequences* and *advanced planning and scheduling*. Inspired by Newton's method for continuous multiobjective optimization problems of Fliege *et al.* (2008), the proposed method is adapted to each operating environment. Examples and numerical experiments with the proposed method are presented for each operating environment, showing some comparisons with existing algorithms, as well.

## Keywords

Flow shop problem; Flexible job shop problem; Integrated resource selection and operation sequences; Advanced planning and scheduling; Multiobjective optimization; Non-dominance; Newton's method.

## Sumário

1	Introdução	12
1.1	Contextualização do Problema	12
1.2	Objetivo	13
1.3	Relevância do Estudo	13
1.4	Estrutura da Dissertação	14
2	Problemas de Escalonamento	15
2.1	Escalonamento de Tarefas Flow Shop	16
2.1.1	Descrição do problema	17
2.1.2	Formulação do problema	18
2.1.3	Representação de soluções	19
2.1.4	Geração de vizinhança para seqüências	20
2.2	Escalonamento de Tarefas Jobs Shop Flexível	21
2.2.1	Descrição do problema	22
2.2.2	Formulação do problema	23
2.2.3	Representação de soluções	25
2.2.4	Geração de vizinhança para máquinas	28
2.2.5	Geração de vizinhança para seqüências	28
2.3	Integrated Resource Selection and Operation Sequences Problem	29
2.3.1	Descrição do problema	30
2.3.2	Formulação do problema	34
2.3.3	Representação de soluções	38
2.3.4	Geração de vizinhança para máquinas	40
2.3.5	Geração de vizinhança para seqüências	40
2.4	Advanced Planning and Scheduling Problems	41
2.4.1	Descrição do problema	45
2.4.2	Formulação do problema	49
2.4.3	Representação de soluções	53
2.4.4	Geração de vizinhança para máquinas	55
2.4.5	Geração de vizinhança para seqüências	55
3	Problemas de Otimização Multiobjetivo	57
3.1	Otimização Multiobjetivo	57
4	Métodos Existentes	61

4.1	Algoritmo Genético	61
4.1.1	Cruzamento	62
4.1.2	Mutação	63
4.2	Particle Swarm Optimization Algorithm	64
4.3	Busca Tabu	65
4.4	Simulated Annealing Algorithm	66
4.5	Método de Newton multiobjetivo	67
4.5.1	Direção de Newton	67
4.5.2	Algoritmo de Newton Multiobjetivo	67
5	Método Heurístico Proposto	71
5.1	Método proposto para o FSP	71
5.1.1	Estrutura principal	71
5.1.2	Melhorar seqüência de tarefas bi-objetivo	73
5.2	Método proposto para o fJSP, iRS/OS e APS	75
5.2.1	Estrutura principal	75
5.2.2	Melhorar alocação de máquinas	76
5.2.2.1	Melhorar alocação de máquinas bi-objetivo	77
5.2.2.2	Melhorar alocação de máquinas tri-objetivo	78
5.2.3	Melhorar seqüência de operações – Procedimento proposto auxiliar	82
6	Experimentos numéricos	85
6.1	Experimentos numéricos para o FSP	85
6.2	Experimentos numéricos para o fJSP	91
6.3	Experimentos numéricos para o iRS/OS	95
6.4	Experimentos numéricos para o APS	97
7	Conclusões	99
8	Referências Bibliográficas	100
9	Anexos	108

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Tempos de processamento de uma instância fJSP com 3 tarefas e 4 máquinas	26
Tabela 2 – Plano de manufatura do exemplo iRS/OS	32
Tabela 3 – Tempo de processamento das operações em máquinas diferentes do exemplo iRS/OS	33
Tabela 4 – Tempo de transporte entre máquinas diferentes do exemplo iRS/OS	34
Tabela 5 – Plano de manufatura do exemplo APS	47
Tabela 6 – Tempo de processamento das operações em máquinas diferentes do APS	48
Tabela 7 – Tempo de transporte entre máquinas diferentes do exemplo APS	48
Tabela 8 – Resultados computacionais para a instância TA31: 50×5	86
Tabela 9 – Resultados computacionais para a instância TA41: 50×10	87
Tabela 10 – Resultados computacionais para a instância TA51: 50×20	88
Tabela 11 – Resultados computacionais para a instância TA61: 100×5	89
Tabela 12 – Resultados computacionais para a instância TA71: 100×10	90
Tabela 13 – Resultados computacionais para a instância 4×5	92
Tabela 14 – Resultados computacionais para a instância 10×7	93
Tabela 15 – Resultados computacionais para a instância 8×8	93
Tabela 16 – Resultados computacionais para a instância 10×10	94
Tabela 17 – Resultados computacionais para a instância 15×10	94
Tabela 18 – Resultados computacionais para a instância 5×21×5	96
Tabela 19 – Resultados computacionais para a instância 7×30×5	96
Tabela 20 – Resultados computacionais para a instância 10×43×5	97
Tabela 21 – Resultados computacionais para a instância 4×17×2×6	98

## Lista de Figuras

Figura 1 – Problemas comuns em um IMS	16
Figura 2 – Exemplo do FSP para $K = 5$ e $N = 4$	19
Figura 3 – Representação gráfica da alocação de máquinas do exemplo fJSP	27
Figura 4 – Diagrama de Gantt do exemplo fJSP	28
Figura 5 – Extensões ao problema iRS/OS	31
Figura 6 – Exemplo de um problema iRS/OS	32
Figura 7 – Restrições de precedência do exemplo iRS/OS	33
Figura 8 – Gráfico de precedência em uma mesma máquina	37
Figura 9 – Gráfico de restrições de precedência em uma mesma planta	37
Figura 10 – Representação gráfica da alocação de máquinas do exemplo iRS/OS	39
Figura 11 – Diagrama de Gantt do exemplo iRS/OS	40
Figura 12 – Relação entre os problemas APS e MSC	44
Figura 13 – Extensões ao problema APS	45
Figura 14 – Exemplo de um problema APS	46
Figura 15 – Restrições de precedência do exemplo APS	47
Figura 16 – Gráfico de precedência em uma mesma máquina	52
Figura 17 – Gráfico de precedência em uma mesma planta	52
Figura 18 – Gráfico de precedência entre diferentes plantas	53
Figura 19 – Representação gráfica da alocação de máquinas do exemplo APS	54
Figura 20 – Diagrama de Gantt do exemplo APS	55
Figura 21 – Representação do conceito de dominância no espaço dos objetivos	58
Figura 22 – Gráfico das funções $f$ e $g$ do exemplo POM	60
Figura 23 – <i>Frenteira de Pareto</i> do exemplo POM	60
Figura 24 – Fluxograma do algoritmo genético básico	62
Figura 25 – Exemplo de cruzamento simples	63
Figura 26 – Exemplo de mutação por troca de duas posições	64

Figura 27 – Exemplo de mutação por troca de máquinas	64
Figura 28 – Região no espaço dos valores dos objetivos para o exemplo	69
Figura 29 – Aplicação do método de Newton para o exemplo	69
Figura 30 – Aproximação da <i>fronteira de Pareto</i> para o exemplo	70
Figura 31 – Aproximação da <i>fronteira de Pareto</i> para a instância TA31: 50×5	86
Figura 32 – Aproximação da <i>fronteira de Pareto</i> para a instância TA41: 50×10	87
Figura 33 – Aproximação da <i>fronteira de Pareto</i> para a instância TA51: 50×20	89
Figura 34 – Aproximação da <i>fronteira de Pareto</i> para a instância TA61: 100×5	90
Figura 35 – Aproximação da <i>fronteira de Pareto</i> para a instância TA71: 100×10	91