Pontifícia Universidade Católica
do Rio de Janeiro

David Sotelo Pinheiro da Silva

On the Permutation Flow Shop Scheduling Problem

TESE DE DOUTORADO

Thesis presented to the Postgraduate Program in Informatics of the Departamento de Informática, PUC-Rio as partial fulfillment of the requirements for the degree of Doutor em Informática.

Advisor: Prof. Marcus Vinicius Soledade Poggi de Aragão

Rio de Janeiro
May 2010

Pontifícia Universidade Católica
do Rio de Janeiro

David Sotelo Pinheiro da Silva

On the Permutation Flow Shop Scheduling Problem

Thesis presented to the Postgraduate Program in Informatics of the Departamento de Informática do Centro Técnico Científico da PUC-Rio, as partial fulfillment of the requirements for the degree of Doutor.

Prof. Marcus Vinicius Soledade Poggi de Aragão
Advisor
Departmento de Informática — PUC–Rio

Prof. Eduardo Sany Laber
Departmento de Informática — PUC–Rio

Prof. Edward Hermann Haeusler
Departmento de Informática — PUC–Rio

Prof. Jayme Luiz Szwarcfiter
COPPE/UFRJ

Prof. Valmir Carneiro Barbosa
COPPE/UFRJ

Prof. Fábio Protti
Instituto de Computação — UFF

Prof. Paulo Eustáquio Duarte Pinto
Instituto de Matemática e Estatística — UERJ

Prof. José Eugenio Leal
Coordinator of the Centro Técnico Científico da PUC–Rio

Rio de Janeiro , 06/05/2010

David Sotelo Pinheiro da Silva

David Sotelo Pinheiro da Silva obtained a BSc in Computer Science from Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) and a MSc in Computer and Systems Engineering from Universidade Federal do Rio de Janeiro(COPPE–UFRJ). In 2008, David received the Google Academic Award as the best PhD student from the Computer Science Department at PUC-Rio.

Bibliographic Data

Silva, David Sotelo Pinheiro da

On the Permutation Flow Shop Scheduling Problem / David Sotelo Pinheiro da Silva; advisor: Marcus Vinicius Soledade Poggi de Aragão. — 2010.

80 f: il. (color); 30 cm

Tese (Doutorado em Informática) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

Inclui bibliografia.

1. Informática – Teses. 2. Escalonamento permutation flow shop. 3. Algoritmos aproximativos. 4. Subsequências monótonas. 5. Grafos de intervalo. 6. Cobertura por cliques. 7. Heurística NEH. I. Poggi de Aragão, Marcus Vinicius Soledade. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departmento de Informática. III. Título.

CDD: 004

To Bianca, Julia and Lilo.

Acknowledgments

First of all I would like to thank my lovely wife Bianca Sotelo for her infinite support during these almost five years of doctorate. Undoubtedly, this journey has only succeeded thanks to your presence, encouragement, relief and patience. Having you by my side, pushing me up even when things get wrong, is the best gift I could expect from life. Sweetie, I love you.

Thanks to my parents Selma and Jorge Luiz, and to my sister Rebecca for their encouragement during this period and for always supporting my intellectual development. When your family gives you excellent examples of altruism and dedication, things get a lot easier. I love you all.

Getting the opportunity of having Marcus Poggi as my advisor was definitely my best shot. Hard work. Assistance. Friendship. I could not expect more. Marcus, thank you for the excellent technical support, strong guidance and for showing me that even working with high expectations it is always possible to establish a friendly and respectful relationship.

PUC-Rio was definitely the best place I have been during all my student life. It is very nice to be on a fruitful environment that gives you all necessary resources and support for developing high-level research on computer science. I would like to thank, in particular, Regina, Alex and Sandra from the Departamento de Informática staff for its excellent support on academic issues.

Talking about friendship, the company and contributions of coleagues and friends at PUC-Rio were very important to me. Thanks, in particular to: Sanjay Jena, Marco Molinaro, Rafael Martinelli, Carlos Crestana, Eduardo Cardoso, Thuener Silva and Daniel Fleischman.

Finally, I would like to thank my little princess Julia, the joy of my life, who came at the end of this process to give a new sense to everything. You are so beautiful, smart and full of life. I love you from the bottom of my heart, my twinkie little star.

Resumo

Silva, David Sotelo Pinheiro da; Poggi de Aragão, Marcus Vinicius Soledade. **Sobre o Problema de Escalonamento Permutation Flow Shop**. Rio de Janeiro, 2010. 80p. Tese de Doutorado — Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Nos últimos cinquenta anos, o Problema de Escalonamento do tipo Permutation Flow Shop com minimização de makespan (PFS) tem se mostrado um problema central e intensamente estudado pela comunidade de otimização combinatória, conhecido por sua intratabilidade, relacionada tanto a aspectos teóricos quanto computacionais. Neste trabalho, três contribuições principais foram obtidas para o problema PFS.

A primeira contribuição consiste em um algoritmo aproximativo para o problema PFS com n tarefas e m máquinas. Este algoritmo apresenta um fator de aproximacão de $O(\sqrt{n+m})$ e pode ser executado em tempo linear. Este é o melhor fator de aproximacão já obtido para o problema PFS no caso em que $n = \Theta(m)$. Além disso, uma nova conexão é estabelecida entre problemas em subsequências monótonas e o PFS, resultando em uma extensão do teorema de Erdös-Szekeres para subsequências monótononas com pesos.

O segundo resultado é um algoritmo mais rápido para o problema PFS com n tarefas e 2 máquinas (2-PFS). Nós fornecemos um algoritmo com complexidade $O(n \log k)$ que determina solucões ótimas para o problema 2-PFS, onde $k \leq n$ é o número mínimo de cliques necessárias para cobrir os vértices de um grafo de intervalo correspondente. Até onde nosso conhecimento permite afirmar, este é o primeiro avanço obtido no que se diz respeito à complexidade de tempo $O(n \log n)$ do algoritmo clássico de Johnson.

A terceira contribuição deste trabalho é uma nova família de heurísticas determinísticas competitivas para o problema PFS. Quatro novas heurísticas são apresentadas como extensões da heurística clássica NEH. Tais heurísticas são baseadas em técnicas de poda na árvore de enumeração implícita do problema PFS. Resultados computacionais atestam que os novos métodos propostos figuram entre os mais efetivos para o problema PFS.

Palavras–chave

Escalonamento permutation flow shop. Algoritmos aproximativos. Subsequências monótonas. Grafos de intervalo. Cobertura por cliques. Heurística NEH.

Abstract

Silva, David Sotelo Pinheiro da; Poggi de Aragão, Marcus Vinicius Soledade. **On the Permutation Flow Shop Scheduling Problem**. Rio de Janeiro, 2010. 80p. DSc Thesis — Departmento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In the last fifty years, the Permutation Flow Shop Scheduling Problem with makespan minimization (PFS) has been a central and well-studied problem in combinatorial optimization community, known by its intractability from theoretical and computational aspects. In this work, three major contributions were obtained for the PFS problem.

The first one is an approximation algorithm for the PFS problem with n jobs and m machines. This algorithm achieves an approximation guarantee of $O(\sqrt{n+m})$ and runs in linear time. This is the best performance ratio already obtained for the PFS problem in the case of $n = \Theta(m)$. Furthermore, a novel connection between PFS and monotone subsequence problems is established, resulting on an extension of the Erdös-Szekeres theorem to weighted monotone subsequences.

The second result is a faster algorithm for the PFS with n jobs and two machines (2-PFS). We give an $O(n \log k)$ algorithm that determines optimal solutions for the 2-PFS problem, where $k \leq n$ is the minimum number of cliques necessary to cover the nodes of an underlying interval graph. From the best of our knowledge, this is the first improvement upon the $O(n \log n)$ time complexity of the classical algorithm from Johnson.

The third contribution of this work is a new family of competitive deterministic heuristic for the PFS problem. Four new heuristics are introduced as extensions of the classical NEH heuristic. Such heuristics are based on pruning techniques on the implicit enumeration tree of the PFS problem. Computational results attest that the new proposed methods stand among the most effectives for the PFS problem.

Keywords

Permutation flow shop scheduling. Approximation algorithms. Monotone subsequences. Interval graphs. Clique covering. NEH heuristic.

Contents

List of Figures