



Gustavo Simão Rodrigues

**O Problema do Sequenciamento em Uma Única Máquina,
com Tempos de Preparação Dependentes da Sequência e
Penalidades por Antecipação e Atraso: Estudo de Caso
de um Processo de Fabricação por Usinagem**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Produção da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Nélio Domingues Pizzolato

Rio de Janeiro
Janeiro de 2012



Gustavo Simão Rodrigues

**O Problema do Sequenciamento em Uma Única Máquina,
com Tempos de Preparação Dependentes da Sequência e
Penalidades por Antecipação e Atraso: Estudo de Caso de
um Processo de Fabricação por Usinagem**

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. Nélio Domingues Pizzolato

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. Mauro Guedes Ferreira Mosqueira Gomes

Departamento de Ciência e Tecnologia – Exército

Prof. Paulo Roberto Tavares Dalcol

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 25 de janeiro de 2012

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

Gustavo Simão Rodrigues

Graduou-se em Engenharia Mecânica e de Automóveis pelo Instituto Militar de Engenharia em 2002. Tem experiência na área de Processos de Fabricação e Delineamento de Processos de Usinagem, aplicando efetivamente todos os conhecimentos em Engenharia do Produto e Engenharia do Processo na fabricação de Armamento Pesado para o Exército Brasileiro.

Ficha Catalográfica

Rodrigues, Gustavo Simão

O problema do sequenciamento em uma única máquina, com tempos de preparação dependentes da sequência e penalidades por antecipação e atraso: estudo de caso de um processo de fabricação por usinagem / Gustavo Simão Rodrigues ; orientador: Nélio Domingues. – 2012.

120 f. il. (color.) ; 30 cm

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

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Programação e sequenciamento da produção. 3. Tempos de preparação dependentes da sequência. 4. Problema do caixeiro viajante. 5. Penalidades por antecipação e atraso. I. Pizzolato, Nélio Domingues. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III. Título.

CDD: 658.5

Aos meus pais, por toda dedicação e confiança. Essa dissertação, assim como tudo de bom em minha vida, é fruto do amor incondicional de pai e mãe.

Agradecimentos

Ao Exército Brasileiro, em especial ao Coronel Mauro Guedes Ferreira Mosqueira Gomes, por ter permitido que eu realizasse o curso em tempo integral.

Ao Departamento de Engenharia Industrial, que me recebeu e permitiu que dele eu fizesse parte por dois anos.

Ao meu orientador, professor Nélio Domingues Pizzolato, que me tranquilizou e guiou minha pesquisa, fornecendo os meios e auxiliando de maneira impecável na confecção da Dissertação.

A todos os amigos que de uma forma ou outra colaboraram para a realização desse sonho.

Resumo

Rodrigues, Gustavo Simão; Pizzolato, Nélio Domingues. **O Problema do Sequenciamento em Uma Única Máquina, com Tempos de Preparação Dependentes da Sequência e Penalidades por Antecipação e Atraso: Estudo de Caso de um Processo de Fabricação por Usinagem.** Rio de Janeiro, 2012. 120 p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A dissertação estuda o problema do sequenciamento de uma única máquina com tempos de preparação dependentes da sequência da produção e penalidades por antecipação e atraso. Ilustra um método com uma aplicação a um exemplo de processo de fabricação por usinagem. Dessa forma, pretende-se reunir as metodologias de resolução e os trabalhos existentes na literatura sobre o Problema do Sequenciamento e aplicar ao caso específico de um dos Processos de Fabricação mais comuns existentes na indústria.

Palavras-chave

Engenharia Industrial; Programação e Sequenciamento da Produção; Tempos de Preparação Dependentes da Sequência; Problema do Caixeiro Viajante; Penalidades por Antecipação e Atraso.

Abstract

Rodrigues, Gustavo Simão; Pizzolato, Nélío Domingues (Advisor). **Single Machine Scheduling Problem with Sequence Dependent Setup Times, with Earliness and Tardiness Penalties: A Case Study in a Machining Process.** Rio de Janeiro, 2012. 120 p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

The dissertation studies the single machine scheduling problem with sequence dependent setup times, with earliness and tardiness penalties, applied to an example of Machining Process Manufacturing. Thus, it is intended to collect the methodologies of resolution and main studies in the literature about the Problem of Sequencing and apply to the specific case of one of the most common manufacturing processes existing in the industry.

Keywords

Industrial Engineering; Production Scheduling and Sequencing; Sequence Dependent Setup Times; Travelling Salesman Problem; Earliness and Tardiness Penalties; Machining Process Manufacturing.

Sumário

1. Introdução	14
1.1. Contexto Histórico	14
1.2. Motivação	15
1.3. Objetivos Gerais	16
1.3.1. Objetivos Específicos	17
1.4. Estrutura da Dissertação	18
2. O Problema de Programação na Produção	20
2.1. Terminologia de Programação e Sequenciamento	22
3. O Problema do Sequenciamento em uma Única Máquina	25
3.1. Definição de Atributos	27
3.2. Medidas de Desempenho	29
3.2.1. Medidas de Desempenho Regulares	30
3.2.2. Medidas de Desempenho Não Regulares	31
3.3. Problemas Sem Datas Prometidas	33
3.3.1. Minimizando o Tempo de Fluxo Médio	36
3.3.2. Minimizando a Média Ponderada do Tempo de Fluxo Médio	36
3.4. Problemas com Datas Prometidas	36
3.4.1. Critério de Atraso	36
3.4.2. Minimizando o número de trabalhos Atrasados	39
3.4.3. Minimizando a Média dos Trabalhos Atrasados	39
4. O <i>Makespan</i> com Tempos de Preparação de Máquina Dependentes da Sequência	40
4.1. O Problema do Caixeiro Viajante	40
4.2. Algoritmo para um TSP	47
5. Penalidades por Antecipação e Atraso	53
5.1. O Tempo Total de Antecipação e Atraso	53

5.2. O Modelo E/T	55
5.3. Minimizando o Desvio Total Absoluto de uma Data Prometida Comum	57
5.4. Penalidades Diferentes para Antecipação e Atraso	63
5.5. Penalidades por Antecipação e Atraso Dependentes do Trabalho	65
5.6. Datas Prometidas Distintas	67
6. Modelagem Matemática para Solução por Método Exato	69
6.1. O Problema Estudado	69
6.2. Modelo	71
7. Resultados	75
7.1. Resultados para 3 Trabalhos	76
7.2. Resultados para 5 Trabalhos	78
7.3. Resultado para 9 Trabalhos	83
7.4. Resultado para 4 e 5 Trabalhos	85
7.5. Resultados para 19 Trabalhos	90
7.6. Resultado para 5 Trabalhos com a Data Prometida Comum	95
7.7. Resultado para 19 Trabalhos sem Data Prometida	98
8. Conclusões e Sugestões	102
8.1. Conclusão	102
8.2. Limitações do Modelo	103
8.3. Sugestões para Trabalhos Futuros	105
9. Referências Bibliográficas	106
Apêndice A: Levantamento dos dados	111
A.1. Dados dos Tempos de Processamento (t_j)	111
A.2. Dados dos Tempos de Preparação de Máquina(S_{ij})	115
A.3. Penalidades por Antecipação e Atraso (α_j, β_j)	118
A.4. Data Prometida (d_j)	119

Lista de figuras

Figura 1 – Sistema MRP	18
Figura 2 – Fluxo de informações em um sistema de fabricação	22
Figura 3 - Programação e Sequenciamento	23
Figura 4 – Gráfico do Atraso (L_j) x Tempo de Conclusão (C_j).	28
Figura 5 – Gráfico (T_j) x (C_j).	29
Figura 6 – Gráfico da Função $J(t)$	34
Figura 7 – Outra alternativa da Função $J(t)$	35
Figura 8 – Troca de pares de trabalhos adjacentes	38
Figura 9 – Mapas de Permutação	41
Figura 10 – Custo de ir de j para k ($s \rightarrow \emptyset$ (j) = k)	42
Figura 11 – Mudança do custo devido à troca $l(j,k)$	44
Figura 12 – Troca $l(2,3)$ antes da troca $l(1,2)$	47
Figura 13 – Troca $l(1,2)$ antes da troca $l(2,3)$	47
Figura 14 – Perfil “V” do sequenciamento ótimo	59
Figura 15 – Resumo para resolução do problema com 3 trabalhos	77
Figura 16 – Resultados para 3 trabalhos	78
Figura 17 – Gráfico de Gantt para 3 trabalhos	79
Figura 18 – Resumo para resolução do problema com 5 trabalhos	81
Figura 19 – Resultados para 5 trabalhos	81
Figura 20 – Gráfico de Gantt para 5 trabalhos	82
Figura 21 – Resumo para resolução do problema com 9 trabalhos	84
Figura 22 – Resultados para 9 trabalhos	85
Figura 23 – Gráfico de Gantt para 9 trabalhos	86
Figura 24 – Análise para 4 trabalhos a partir de 9	87
Figura 25 – Análise para 5 trabalhos a partir de 9	88
Figura 26 – Gráfico de Gantt para 4 trabalhos a partir de 9	89
Figura 27 – Gráfico de Gantt para 5 trabalhos a partir de 9	89
Figura 28 - Resumo para resolução do problema com 19 trabalhos	90
Figura 29 – Gráfico de Gantt para 8 trabalhos com $d_i = 600$	91
Figura 30 – Inícios e desvios para 8 trabalhos com $d_i = 600$	91

Figura 31 – Resultado para 9 trabalhos com $d_i = 100, 150, 250$	92
Figura 32 – Resultados para 9 trabalhos	92
Figura 33 - Resumo para resolução do problema com 11 trabalhos	94
Figura 34 – Resultados para 11 trabalhos	95
Figura 35 – Gráfico de Gantt para 11 trabalhos	96
Figura 36 – Resultados para 5 trabalhos e data prometida comum	97
Figura 37 – Gráfico de Gantt para 5 trabalhos e $d_j = d$	97
Figura 38 – Gráfico $(t_j) \times (d_j)$	98
Figura 39 – Melhor rota para 3 trabalhos	99
Figura 40 – Melhor rota para 19 trabalhos	100
Figura 41 – Exemplo de Folha de Processo	114
Figura 42 – Lista de Materiais (Bill Of Materials-BOM)	119

Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros iniciais para o TSP	49
Tabela 2 – Parâmetros reordenados para o mapeamento $\emptyset^*(j)$	49
Tabela 3 – Divisão dos grupos	50
Tabela 4 – Parâmetros para 3 trabalhos	76
Tabela 5 – Tempo de Preparação de Máquina para 3 trabalhos	76
Tabela 6 – Parâmetros para 5 trabalhos	78
Tabela 7 – Tempo de Preparação de Máquina para 5 trabalhos	80
Tabela 8 – Parâmetros para 9 trabalhos	83
Tabela 9 – Tempo de Preparação de Máquina para 9 trabalhos	83
Tabela 10 – Dados para 5 trabalhos e data prometida comum	95
Tabela 11 – Velocidades de corte recomendadas para cada peça	112
Tabela 12 – Tempos de processamento (t_j)	113
Tabela 13 – Características de preparação de máquina	116
Tabela 14 – Tempos de Preparação de Máquina (S_{ij})	117
Tabela 15 – Penalidades por Antecipação e Atraso	118
Tabela 16 – Datas Prometidas (d_j)	120

Lista de quadros

Quadro 1 – Algoritmo para um TSP

48

“Combati o bom combate.”

2 Timóteo 4:7