

Javier Gutiérrez Castro

**O Problema da Programação de Lotes Econômicos de
Produção (ELSP) com Tempos e Custos de Setup
Dependentes da Sequência: Um Estudo de Caso**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Nélcio Domingues Pizzolato

Rio de Janeiro, fevereiro de 2004

Javier Gutiérrez Castro

**O Problema da Programação de Lotes Econômicos de
Produção (ELSP) com Tempos e Custos de *Setup*
Dependentes da Seqüência: Um Estudo de Caso.**

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

Nélio Domingues Pizzolato

Orientador
DEI PUC-Rio

Leonardo Junqueira Lustosa

DEI PUC-Rio

Eugenio Kahn Epprecht

DEI PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

DEI PUC-Rio, 16 de fevereiro de 2004

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

Javier Gutiérrez Castro

Graduou-se com honra ao mérito ocupando o primeiro lugar na Faculdade de Engenharia Industrial da Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa (Peru) em 1999. Devido ao seu ótimo desempenho, recebeu uma bolsa de estudos do "Hogar del Ingeniero" entre 1996 e 1999. Fez estágio e trabalhou em empresas no Peru, algumas de porte internacional tais como Repsol, Phelps Dodge e Coca-Cola. No Departamento de Engenharia Industrial da PUC, foi beneficiado por dois semestres consecutivos com a bolsa de desempenho do Departamento, devido aos seus méritos estudantis.

Ficha Catalográfica

Gutiérrez Castro, Javier

O Problema da programação de lotes econômicos de produção (ELSP) com tempos e custos de *setup* dependentes da seqüência : um estudo de caso / Javier Gutiérrez Castro ; orientador: Nélío Domingues Pizzolato. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Industrial, 2004.

129 f. ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia industrial – Teses. 2. Programação de lotes econômicos de produção. 3. Dependente da seqüência. 4. Indústrias de processo em linha. 5. Métodos heurísticos. 6. Problema do caixeiro viajante. I. Pizzolato, Nélío Domingues. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III. Título.

Dedico esta dissertação
a mis queridos padres Porfirio y Eugenia.
Mi gratitud eterna hacia ellos.

Agradecimentos

Ao Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio que de maneira acolhedora me permitiu ser parte dele.

Aos Professores do DEI, pelos seus valiosos ensinamentos.

Ao Professor Nélío Pizzolato pela sua importantíssima colaboração.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela ajuda financeira.

À cidade de Rio de Janeiro que me cobiçou como a um mais dos seus filhos.

Aos meus amigos Ana Paula e Eduardo Romero por sua amizade e por todos os seus gestos de atenção que tiveram para minha pessoa no tempo que morei em Rio; sua boa vontade e generosidade são inestimáveis.

Aos meus amigos do Mestrado 2002 com os quais passamos juntos momentos agradáveis que sempre guardarei na minha memória.

Aos Professores Lustosa e Epprecht pelas correções finais na escrita do texto.

Resumo

Gutierrez Castro, Javier. **O Problema da Programação de Lotes Econômicos de Produção (ELSP) com Tempos e Custos de Setup Dependentes da Sequência: Um Estudo de Caso.** DEI PUC-Rio, 2004. 129p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho analisa o Problema da Programação de Lotes Econômicos (ELSP) que, frequentemente, se apresenta em indústrias com processos produtivos em linha (onde a produção segue uma sequência especificada de operações). Tal linha deve manufaturar diferentes produtos, só sendo possível fabricar um produto por vez. Além disso, para o caso estudado, outra característica importante é que os tempos e custos de *setup* dependem da sequência de fabricação escolhida. O objetivo do problema é determinar uma sequência de produção que permita obter conjuntamente os menores custos de *setup* e de manter estoques, satisfazendo a demanda do mercado sem atrasos.

É factível, na teoria, encontrar matematicamente uma solução ótima para o problema, mas sua obtenção se torna impraticável pelas numerosíssimas possibilidades e muitas variáveis a considerar. Por tal motivo, recorre-se ao uso de métodos heurísticos. Neste trabalho analisam-se os dados fornecidos por uma empresa de refrigerantes, que possui um processo em linha, e se estabelecem as sequências e os volumes de produção para cada produto, obtendo custos próximos do ótimo. O método que se propõe não só é útil para o caso específico, senão também pode ser adaptado a indústrias que guardem características semelhantes.

Palavras-chave

Programação de Lotes Econômicos de Produção; Programação Dependente da Sequência; Indústrias de Processo em Linha; Métodos Heurísticos; Problema do Caixeiro Viajante.

Abstract

Gutierrez Castro, Javier. **The Economic Lot Scheduling Problem (ELSP) with Sequence-Dependent Setup Costs and Times: A Case Study**. DEI PUC-Rio, 2004. 129p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Industrial, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This essay analyzes the Economic Lot Scheduling Problem (ELSP), usually found in industries with line production processes (production follows a specified sequence of operations). Such line must manufacture different products, and it is only possible to manufacture a single product at a time. Besides, for the case studied another important characteristic exists namely, the time and setup cost depend on the chosen production sequence. The objective of the problem is to determine a production sequence that minimizes setup and inventory carrying costs, satisfying the market demand without delays.

It is feasible, in theory, to find a mathematically optimal solution for the problem, but in reality it becomes impracticable due to the very large number of possibilities and the many variables to consider. For this reason, one must resort to heuristic methods. In this work, the data provided by a soft drinks manufacturer is analyzed, generating sequences and production volumes for each product, obtaining costs close to the optimum. The proposed method applies to the specific case study, and it is likely to be adaptable to a large number of industries with similar characteristics.

Keywords

Economic Production Lot Scheduling; Sequence Dependent Scheduling; Line Process Industries; Heuristic Methods; Traveling Salesman Problem.

Sumário

1 Introdução	13
1.1. Preliminares	13
1.2. Exposição do Problema	14
1.3. Justificativa do Estudo	14
1.4. Objetivos da Pesquisa	15
1.5. Estrutura da Dissertação	15
2 Considerações Teóricas	16
2.1. Generalidades sobre a produção industrial	16
2.2. A Programação e o Seqüenciamento	17
2.3. A programação da produção numa indústria com processo em linha	18
2.3.1. Lote Econômico de Produção	19
2.3.2. O Problema da Programação dos Lotes Econômicos de Produção (ELSP)	21
2.4. O ELSP quando os tempos e custos de <i>setup</i> dependem da seqüência de produção escolhida	30
2.4.1. As primeiras tentativas de solução	30
2.4.2. A Formulação Matemática do Problema	32
2.4.3. A utilização de Métodos Heurísticos	36
2.4.4. Conceitos desenvolvidos para a aplicação dos métodos heurísticos na solução do Problema	38
2.4.5. O Problema do Caixeiro Viajante	45
3 Formulação da Metodologia	54
3.1. Resumo das Principais Heurísticas de Solução	54
3.1.1. Resumo do Trabalho de Maxwell	54
3.1.2. Resumo do Trabalho de Singh & Foster	55
3.1.3. Resumo do trabalho de Gregory Dobson	56
3.1.4. Resumo do Trabalho de McGee & Pyke	58
3.1.5. Escolha da Metodologia que servirá como base principal	59
3.2. Descrição do método heurístico de solução	60
3.2.1. Formulação do Problema	61
3.2.2. Descrição da Heurística	62
3.2.3. Apresentação do Algoritmo	64

3.3. Apresentação e Descrição do Estudo de Caso	67
3.3.1. As linhas de produção	67
3.3.2. Descrição do processo produtivo na Linha	69
3.3.3. Sabores e Formatos	73
3.3.4. Demanda dos Produtos	74
3.3.5. Taxa de Produção	77
3.3.6. Os Tempos de <i>Setup</i>	78
3.3.7. Os custos de <i>Setup</i>	81
3.3.8. Custo de Manutenção de Estoque	85
3.3.9. O Horizonte de Planejamento	86
4 Solução ao Problema	87
4.1. Estabelecendo os limites da Solução	87
4.1.1. Cálculo do Limite inferior	87
4.1.2. Cálculo do Limite Superior	89
4.2. Aplicação do Método Heurístico de Solução	91
4.2.1. Aplicação do Algoritmo	92
4.2.2. Análise de uma solução alternativa	105
4.3. Análise dos Resultados	108
4.4. A proposta para a programação da produção	109
4.4.1. Programação Teórica	109
4.4.2. Programação Real	111
4.4.3. Custos Para a Programação Real Exemplificada	117
5 Conclusões	119
6 Sugestões	121
7 Referências Bibliográficas	123
8 Apêndice: Otimização usando a Regra de “Iniciar em Zero”	126

Lista de figuras

Figura 2.1 – Customização vs. Volume, nos tipos de processos	16
Figura 2.2 - Custos Unitários de <i>Setup</i> vs. Custos Unitários de Manter Estoque	20
Figura 2.3 - Classificação dos tipos de ELSP	23
Figura 2.4 - Tempos existentes em cada Período “m” no ciclo 2 – 1 – 2 – 3 – 1.	43
Figura 2.5 - Método do Intercâmbio de dois Arcos para melhorar a viagem inicial	51
Figura 4.1 - Seqüência com o menor Custo de <i>Setup</i>	89
Figura 4.2 - Seqüência para os 21 nós com o menor Custo <i>Setup</i>	95

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Distâncias para o percurso entre quatro lojas em uma cidade	49
Tabela 3.1 - Velocidades da Linha 1 – Enchedora Meyer 60/10	69
Tabela 3.2 - Formação dos Pallets	70
Tabela 3.3 - Tempo e Velocidade do Lavado	71
Tabela 3.4 - Sabores e Formatos da Linha 1	73
Tabela 3.5 - Demanda Diária Média nos Meses Pico, e a Taxa de Demanda	76
Tabela 3.6 - Cálculo das Taxas de Produção	78
Tabela 3.7 - Tempos de Mudanças de Sabores (minutos)	80
Tabela 3.8 - Tempos de Mudanças de Formatos (minutos)	80
Tabela 3.9 - Tempos de Mudança na Linha (minutos) – Tempo de <i>Setup</i>	81
Tabela 3.10 - Cálculo do Lucro Médio Ponderado (S/. por minuto)	83
Tabela 3.11 - Custo de Mudança na Linha entre os Produtos (S/.: Soles Peruanos) – Matriz Kij de Custos de <i>Setup</i>	84
Tabela 3.12 - Custo de manutenção de estoque	86
Tabela 4.1 - Dados a serem processados pela Programação IS	88
Tabela 4.2 - Resultados da Programação Independente	88
Tabela 4.3 - Dados a serem processados pela Programação RC	90
Tabela 4.4 - Resultados da Programação de Rotação Pura	90
Tabela 4.5 - Dados de Entrada ao Algoritmo	91
Tabela 4.6 - Matriz Kij de Custos de <i>Setup</i> (S/.)	92
Tabela 4.7 - Seqüência Final e os seus parâmetros	104
Tabela 4.8 - Custos e Tempos de <i>Setup</i> da seqüência gerada no Passo 3	106
Tabela 4.9 - Cálculo de Novos Parâmetros para uma Solução Alternativa	107
Tabela 4.10 - Resultados dos Métodos de Solução	108
Tabela 4.11 - Programa de Produção Teórico para o Horizonte de Planejamento	110
Tabela 4.12 - Variações da Taxa de Demanda (com 90% de probabilidade)	112
Tabela 4.13 - Demanda Simulada para o Horizonte de Planejamento	112
Tabela 4.14 - Demandas Totais Semanais Reais vs. Teóricas	113
Tabela 4.15 - Programa de Produção Real para o Horizonte de Planejamento	114
Tabela 4.16 - Custos para a Programação Real	118

Lista de quadros

Quadro 3.1 - Níveis de Desejabilidade em uma mudança de sabor	79
Quadro 3.2 - Níveis de Desejabilidade em uma mudança de formato	79