v. 01, n. 03 : pp.060-070, 2005
ISSN 1808-0448
D.O.I.: 10.3895/S1808-04482005000300007

Revista Gestão Industrial

A PROGRAMAÇÃO DE LOTES ECONÔMICOS DE PRODUÇÃO (ELSP) COM TEMPOS E CUSTOS DE *SETUP* DEPENDENTES DA SEQÜÊNCIA: UM ESTUDO DE CASO

THE ECONOMIC LOT SCHEDULING PROBLEM (ELSP) WITH SEQUENCE-DEPENDENT SETUP COSTS AND TIMES: A CASE STUDY.

Javier Gutiérrez Castro[1]; Nélio Domingues Pizzolato[2]
[1]Doutorando em Engenharia de Produção, Departamento de Engenharia de Produção, PUC-Rio, javiergc@rdc.puc-rio.br
[2]Ph. D. University of North Carolina, EUA, Professor Associado Departamento de Engenharia Industrial PUC-Rio, ndp@ind.puc-rio.br

Recebido para publicação em: 03/04/2005
Aceito para publicação em:21/08/2005

Resumo

O Problema da Programação de Lotes Econômicos (ELSP), é um problema comum em indústrias com processos produtivos em linha. O objetivo é determinar um seqüenciamento da produção que satisfaça a demanda, mas conjugando os menores custos de setup e de manutenção de estoques. O estudo de caso contemplado considera tempos e custos de setup dependentes da seqüência de produção. O trabalho aplica as abordagens tradicionais e outras envolvendo o problema do caixeiro viajante, de modo a estabelecer as seqüências e os volumes de produção para cada produto, obtendo custos próximos do ótimo.
Palavras chave: ELSP, *Setups* dependentes da seqüência, Problema do Caixeiro Viajante

1. Introdução

A produção em linha é um processo caracterizado pela fabricação de produtos em altos volumes para estocar e em grande medida padronizados. A capacidade instalada da linha é bem definida, com equipamentos especializados, sendo somente possível produzir um produto por vez, segundo uma seqüência definida de operações que, em princípio, não é possível alterar. Neste contexto, a programação da produção deve levar em conta a existência dos custos de *setup* e dos custos de manutenção de inventário. A técnica denominada "lote econômico de produção" permite calcular o tamanho de lote que minimiza o custo total por unidade, levando em conta que se quer diminuir tanto os custos de *setup* como os de manutenção de inventário; mas esta técnica calcula o lote econômico de maneira independente, sem considerar os demais produtos que também demandam a utilização da linha de produção.

O "Problema da Programação de Lotes Econômicos de Produção", do inglês *Economic Lot Scheduling Problem* (ELSP), segundo Elmaghraby (1978), nasce da necessidade de acomodar padrões de produção cíclicos baseados no Lote Econômico de Produção, calculados separadamente para cada item. Se for produzido um só produto, a linha estaria ocupada algum tempo e ficaria ociosa até esgotar o seu inventário. No entanto, quando dois ou mais itens competem pela atenção da linha de produção, o fenômeno da "interferência" acontecerá; isto significa que a linha será requerida para produzir dois itens ao mesmo tempo, o que é fisicamente impossível. O problema consiste, portanto, em acomodar os lotes econômicos de modo que se minimize o custo da programação na linha, satisfazendo sem atrasos a demanda do mercado.

2. O problema da programação de lotes econômicos de produção (ELSP)

O ELSP com demanda constante e capacidade fixa constitui a vertente mais tradicional deste modelo. Em relação a esse serão examinadas duas abordagens: a Programação Independente e a Programação de Rotação Pura. Outra vertente relevante para o presente estudo é o Problema do Caixeiro Viajante, para o caso dos tempos de *setup* dependentes da seqüência.

2.1. A programação independente (IS)

A Programação Independente (*Independent Solution* - IS) primeiro calcula o lote econômico de produção de cada produto individualmente. Caso seja viável a programação destes lotes sem que aconteçam interferências, ter-se-á a solução ótima.
Elmaghraby (1978) calcula o custo total desta programação por meio da seguinte relação:

$$C^{IS} = \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{A_i}{T_i^{IS}} + \frac{h_i r_i (1-\rho_i) T_i^{IS}}{2} \right)$$

Onde, o subscrito **i** indica o índice dos produtos (i = 1,2,...N), r_i é a taxa de demanda (unidades de produto /unidade de tempo), $\rho_i = (r_i/p_i)$ é o fator de utilização ou fração do tempo dedicado para produção (sem considerar *setups*), p_i é a taxa de produção (unidades de produto /unidade de tempo) da operação que constitui o gargalo na linha, A_i é o custo de preparação de um lote ($) ou custo de *setup*, h_i é o custo de manutenção de estoque ($/(unidades *x* unidade de tempo) e T_i (T_i^{IS} para este caso) é o tempo de ciclo ou o espaço de tempo entre dois inícios de corridas de produção de um determinado produto, calculado conforme o modelo do lote econômico de produção. Assim:

$$T_i^* = \sqrt{\frac{2A_i}{h_i r_i (1-\rho_i)}} \qquad T_i^{MIN} = \frac{s_i}{1-\rho_i}$$

Onde s_i é o tempo de preparação de um lote ou tempo de *setup*. O T_i^* ignora o tempo de *setup*, mas pode-se dar o caso de não se conseguir ajustar neste tempo de ciclo o tempo de *setup*. Então, calcula-se T_i^{MIN}. Desse modo, o tempo de ciclo para cada produto é definido como $T_i^{IS} = \max \{T_i^* , T_i^{MIN}\}$. A programação independente será factível se atender à seguinte condição necessária, mas não suficiente:

$$\sum_i (s_i / T_i + \rho_i) \le 1$$

Significa que o tempo de produção disponível deve ser longo o suficiente para acomodar os tempos de preparação (s_i) de todos os produtos, além dos tempos de produção efetiva.

Adicionalmente, podem-se calcular parâmetros tais como:

$\tau_i = \rho_i \cdot T_i$;tempo de corrida de produção ou tempo que demora produzir um lote,

$\sigma_i = [s_i + \tau_i]$;tempo de processamento total de um lote, e,

$q_i = [r_i \cdot T_i]$ ou $[p_i \cdot \tau_i]$;tamanho do lote produzido.

O C^{IS} é um **limite inferior** para o custo médio total mínimo de qualquer programação. O problema sugere que quanto maior a quantidade de produtos que se tem para programar, maior é a probabilidade de que esta se torne infactível.

2.2 A programação de rotação pura (RC)

A Programação de Rotação Pura (*Rotation Cycle*- RC), supõe que cada produto é produzido uma vez só em cada ciclo. Neste caso, os tempos de ciclo para cada produto vão ser comuns. Assim, $T_1 = T_2 = ... = T_N = T^{RC}$ e para calcular o custo T^{RC} da programação, substitui-se T^{RC} na equação de custo total apresentada. A Programação de Rotação Pura é sempre factível, e determina o **limite superior** em custos de qualquer outra programação factível. Com respeito do tempo de ciclo T^{RC}, calculam-se:

$$T^* = \sqrt{2\sum_1^N A_i / [\sum_1^N h_i r_i (1-\rho_i)]} \qquad T^{MIN} = \sum_{i=1}^N s_i / [1 - \sum_{i=1}^N \rho_i]$$

Se T* não é suficientemente longo para incluir nele os tempos de preparação dos produtos, calcula-se T^{MIN}. Desse modo, $T^{RC} = \max \{T^*, T^{MIN}\}$, que segura a completa factibilidade.

3. O ELSP quando os tempos e custos de *setup* dependem da seqüência de produção

Este tipo de ELSP considera que os *setups* (tempos e/ou custos) variam em função da seqüência de produção escolhida. De acordo com Dobson (1992), existem exemplos na prática que podem ser vistos como subclasses deste tipo de problema, como o caso de produtos que se classifiquem em famílias, onde existem custos maiores para mudar de uma família para outra, e um custo menor para mudanças de produtos dentro da mesma família.

Para esses casos, a solução matemática é extremamente complexa. Maxwell (1964) e Dobson (1992) apresentam formulações matemáticas que tentam fornecer a solução ótima, mas o número de combinatórias possíveis para ordenação dos produtos, e para a determinação do número de corridas de produção apropriadas para um período de tempo, faz que o esforço computacional seja imenso. Mesmo assim, essas formulações têm suas deficiências, já que podem encontrar um tempo de ciclo total que não seja útil para fins de planejamento da produção. Um tempo de ciclo, por exemplo, de 112 dias para produzir os produtos e satisfazer a demanda ao longo desse período não seria gerencialmente desejável. Diante da pouca praticidade das formulações matemáticas, recorre-se aos métodos heurísticos, capazes de gerar boas soluções, embora não comprovadamente ótimas.

3.1. Solução usando o problema do caixeiro viajante (PCV)

O PCV é um problema da teoria das redes que consiste em, partindo de um vértice, visitar todos os demais e retornar ao vértice origem, percorrendo a menor distância possível. No caso mais geral do PCV, a matriz de distâncias entre todos os pontos da rede não é simétrica, indicando que os caminhos de ida e de volta não têm o mesmo comprimento.

Trazendo esse modelo para o caso da programação de produtos, segundo a abordagem de Maxwell (1964), considera-se a matriz N x N com elementos S_{ij}, onde N representa a quantidade total de produtos, e S_{ij} é o tempo necessário de *setup* para mudar ao produto j se o produto i fosse produzido imediatamente antes. Dadas estas condições, pode-se formar um ciclo com os N produtos tomando os seus respectivos S_{ij} como comprimento de arcos.

Para resolver o problema do caixeiro viajante, existem inúmeras técnicas (consultar Lawler et al. (1987)). Por outro lado, não se deve esquecer do custo de *setup* K_{ij} (custo de mudar ao produto j tendo produzido previamente i). É necessário observar se a seqüência que minimiza o custo total (empregando técnicas do caixeiro viajante) é a mesma que minimiza os tempos de *setup* S_{ij}. Não existe nenhuma razão justificável para supor que ambas as seqüências devam ser iguais.

Há duas formas de obter uma solução ao problema de sequenciamento usando o caixeiro viajante: uma é considerar uma rotação pura, ora por custos ora por tempos de *setup* (o que for mais relevante para o caso em particular) e determina-se a seqüência que minimiza o *setup* total. Outra maneira consiste em estabelecer um número finito de corridas de produção, podendo um produto ser programado mais de uma vez no ciclo, e depois, determina-se a seqüência das corridas que minimiza o *setup* total. Naturalmente, na matriz S_{ij} ou K_{ij}, deve-se impossibilitar programar duas corridas consecutivas de um mesmo produto.

A solução por caixeiro viajante exige conhecer previamente as corridas de produção para cada produto, havendo para isto outras técnicas. Note-se que essa metodologia não especifica quanto produzir em cada corrida, salvo se, depois de estabelecida a seqüência, se empregue uma outra técnica, tal como a de Delporte e Thomas (1977). Daí que a solução pelo caixeiro viajante é muito limitada por si mesma e precisa se apoiar em outras técnicas.

3.2. Conceitos importantes na aplicação dos métodos heurísticos de ELSP

Período Base

O Modelo de Rotação Pura supõe um tempo de ciclo total, de modo que se permita acomodar nele a produção de cada item exatamente uma vez no ciclo. Segundo Bomberger (1966), um procedimento diferente (e às vezes mais efetivo) de solução para o ELSP consiste em admitir diferentes tempos de ciclo para os diferentes itens, mas tomando em consideração que cada T_i deve ser um múltiplo inteiro de um "período base" (W) o qual deve ser longo o suficiente para acomodar o tempo de *setup* e o tempo de corrida de produção de todos os produtos.

Os multiplicadores potência-de-dois

De acordo com Haessler (1979), o período base definido por Bomberger (1966) deve ser suficientemente longo para acomodar o tempo de processamento total de todos os produtos. Sendo os tempos de ciclo $T_i = g_iW$, onde g_i pertence ao conjunto de inteiros {1,2,3,4...}, e W representa a duração do período base, ao restringir os valores de g_i ao conjunto {1,2,4,8,...} reduze-se enormemente as interferências entre as corridas. Fazendo uma generalização deste conceito, pode-se dizer que os tempos de ciclo dos produtos i provêm do conjunto k^0W, k^1W, k^2W, ...,k^nW. Têm-se então os multiplicadores $\{k^0, k^1, k^2, ..., k^n\}$ e que Haessler (1979) atribui a **k** o valor 2. Isto vem a ser conhecido como a regra de restringir os tempos de ciclo a "multiplicadores potência-de-dois".

Maxwell e Singh (1983) mostram que ajustar os tempos de ciclo desta maneira traz resultados muito próximos do ótimo.

A regra de "iniciar em zero"

A regra de "iniciar em zero" obriga que a produção de um item só possa ocorrer no momento exato quando seu inventário atinja o valor zero. Na literatura há indicações de que é difícil construir exemplos sensatos onde a regra de "iniciar em zero" não forneça uma solução bem próxima da ótima. O modelo de Delporte e Thomas (1977) demanda que sejam conhecidos o Tempo de Ciclo Total "T" e que previamente seja definida uma seqüência de produção para as $m^{ésimas}$ corridas estabelecidas (m = 1,2,...,M). Este modelo é feito por meio de uma otimização com uma função de minimização quadrática e restrições lineares, onde participam variáveis tais como t_m (a duração da corrida de produção no período m), s_m (o tempo de *setup* entre os períodos m e m+1), e y_m (o tempo ocioso entre os períodos de produção m e m+1). Os tempos de duração das corridas não precisam ser iguais, e, permitir a existência de tempos ociosos, pode ser de muita utilidade na prática, para salvar possíveis imprevistos.

4. Descrição do método heurístico de solução proposto

Existem inúmeros trabalhos que tentam resolver o problema de ELSP com tempos e custos de *setup* dependentes da seqüência. Singh e Foster (1987) propõem uma heurística que contempla um período base determinado em função de um horizonte de planejamento adequado ao tipo de empresa segundo as considerações da administração, garantindo desta maneira que o tempo entre repetições sucessivas seja exatamente igual àquele horizonte. A maior vantagem que apresenta esta heurística é dar liberdade à seqüência de produção para poder escolher tamanhos de lotes não iguais para um mesmo produto ao longo do ciclo, mediante um reajuste dos tempos de corridas de produção com a regra de "Iniciar em Zero". Mas Singh e Foster (1987) não levam em conta a possibilidade de incluir tempos ociosos dentro do ciclo. Os tempos ociosos podem servir como um colchão para lidar com prováveis desajustes na execução do programa. De outro lado, Dobson (1992) apresenta uma formulação matemática parecida à de Maxwell (1964), mas em vista da impossibilidade de solução por métodos exatos, ele testa uma heurística bastante eficiente, mas que carece de uma definição clara na determinação do tempo de ciclo (T). Assim, esta metodologia pode encontrar uma solução muito boa com um tamanho de ciclo bastante grande, mas que, para fins de planejamento poderia não ser muito útil. Já McGee e Pyke (1996) formulam uma metodologia que lida com o problema quando é possível agrupar os produtos em famílias.

O método de Singh e Foster (1987) é orientado em função do período de planejamento mais apropriado às conveniências da programação, determinando assim seqüências de produção realistas, e, além disso, estima os custos anuais de *setup* e de manutenção de inventário. A heurística que se propõe está fortemente baseada neste método, ao qual se adaptaram algumas vantagens de outras metodologias, tais como permitir a inclusão de tempos ociosos, e uma maneira mais efetiva para a determinação da seqüência final de produção, de acordo com o método de Haessler (1979).

Esta programação se repete, em uma única máquina, a cada H períodos, onde, as taxas de produção e de demanda são constantes, os custos de *setup* são dependentes da seqüência, mas os tempos de *setup* inicialmente se consideram constantes (uma média dos diversos valores que poderia tomar); atrasos na produção e perdas de vendas não são permitidos.

Definem-se as seguintes variáveis: N : número de produtos, i={1,2,3...N}; S_i : tempo de *setup*, K_{ij} : custo de *setup* do produto "j" tendo previamente produzido "i"; T_i : tempo entre dois inícios de *setups* consecutivos do produto "i""; C_i : custo total por unidade de tempo do produto "i"; H: horizonte de planejamento (determinado pela empresa).

O Algoritmo de solução, amplamente descrito em Gutierrez (2004), consta de três estágios. O primeiro estágio da heurística determina o número de *setups* requeridos por cada produto no horizonte de planejamento H. O segundo estágio procura distribuir os *setups* e formar seqüências parciais e logo uma seqüência de produção final a ser adotada, de uma maneira similar à realizada por Haessler (1979). Finalmente, no terceiro estágio, se ajustam as durações das corridas de produção seguindo a regra de "Iniciar em Zero", como o faz Delporte e Thomas (1977).

5. Aplicação a um estudo de caso

A seguir apresenta-se o estudo de caso onde será testada a metodologia de solução proposta. O problema provém de uma empresa produtora de refrigerantes, a qual forneceu a informação pertinente. A pedido da empresa, seu nome não será divulgado, assim como qualquer outra informação que conduza à sua identificação.

Este tipo de indústria se caracteriza justamente por engarrafar as bebidas em uma linha onde a seqüência de operações é fixada e não é possível pular alguma operação ou trocar a ordem. A previsão da demanda neste tipo de indústrias representa todo um desafio, sobretudo porque esta se vê continuamente influenciada pelas ações da concorrência, da própria companhia, e por fatores sazonais. Para um longo prazo não é possível elaborar uma programação que não sofrerá modificações na sua execução. É necessário então programar para um curto prazo e manter um controle constante e fazer as alterações pertinentes de uma maneira dinâmica. Estipulou-se o curto prazo igual a uma semana (H=6 dias de trabalho); este seria um período apropriado no qual as previsões da demanda poderiam ser razoavelmente estimadas, e que permitiria da mesma forma realizar possíveis ajustes nas quantidades a produzir.

A Tabela 1 apresenta os dados que foram recolhidos, e que serão de utilidade para dar início ao algoritmo. A unidade de tempo que se utiliza é o dia; (um dia consta de 12 horas de trabalho); a unidade dos produtos está dada em caixas físicas de bebida, abreviada pela sigla "cf"; a unidade monetária está representada pela sigla internacional "$"; e a taxa de produção "p_i" foi tomada da máquina denominada "enchedora", que é o gargalo da linha (ela determina o ritmo de saída dos produtos). Trabalha-se seis dias pela semana.

A Tabela 2 exibe a Matriz K_{ij} de custos de *setup*. É importante lembrar que os tempos de *setup* são considerados inicialmente como uma média.

Tabela 1 - Dados de entrada ao algoritmo

Produto	**r_i (cf / dia)**	**p_i (cf / dia)**	**S_i (dias)**	**h_i [$/(cf . dia)]**	**ρ_i r_i / p_i**	**$1-\rho_i$**	**r_ih_i**
AF1-0237	2799	10500	0,06389	0,41983	0,2666	0,7334	1175,10
AF1-0296	158	9600	0,06111	0,52381	0,0165	0,9835	82,76
AF1-1000	1563	18000	0,06389	0,44286	0,0868	0,9132	692,19
AF2-0296	1776	9600	0,06528	0,51523	0,1850	0,8150	915,05
AF2-1000	98	18000	0,06528	0,43560	0,0054	0,9946	42,69
AF3-0237	878	10500	0,06806	0,41295	0,0836	0,9164	362,57
AF3-1000	144	18000	0,06806	0,43560	0,0080	0,9920	62,73
BP1-0296	1033	9600	0,07083	0,43365	0,1076	0,8924	447,96
TOTAIS	**8449**	**103800**	**0,52640**	**3,61953**	**0,75953**	**7,2405**	
H =	**6**	**dias**	(Horizonte de planejamento)				

Tabela 2 - Matriz K_{ij} de custos de *setup* ($)

		P1	**P2**	**P3**	**P4**	**P5**	**P6**	**P7**	**P8**
COD	**A "j" / DE "i"**	AF1-0237	AF1-0296	AF1-1000	AF2-0296	AF2-1000	AF3-0237	AF3-1000	BP1-0296
P1	AF1-0237	----	276	368	460	460	460	460	552
P2	AF1-0296	276	----	276	460	460	460	460	552
P3	AF1-1000	368	276	----	460	460	460	460	552
P4	AF2-0296	414	414	414	----	276	414	414	414
P5	AF2-1000	414	414	414	276	----	414	414	414
P6	AF3-0237	414	414	414	414	414	----	368	414
P7	AF3-1000	414	414	414	414	414	368	----	414
P8	BP1-0296	644	644	644	552	552	552	552	----

Os dados mostrados nas Tabelas 1 e 2 permitirão também analisar formas alternativas de solução. Poderiam-se calcular os limites superior e inferior das programações factíveis através da Programação Independente e a Programação de Rotação Pura, respectivamente. Para o primeiro caso, visto que é necessário ter tempos e custos de *setup* constantes, tomar-se-ão os mínimos valores destes. Já na Rotação Pura, deve-se estabelecer primeiramente (por caixeiro viajante) a seqüência dos oito diferentes produtos que minimize o custo total de *setup*; estabelecer a seqüência permite designar apropriadamente os respectivos tempos e custos de *setup* para cada produto; adicionalmente estipula-se o tempo de ciclo comum igual ao "H".

A aplicação do algoritmo proposto fornece uma solução dada por uma seqüência de corridas de produção para o período de planejamento, exibido na Tabela 3.

Por outra parte também se analisa uma solução alternativa que consiste em ordenar as 20 corridas de produção (obtidas da aplicação do algoritmo proposto) segundo a seqüência que ofereça o menor custo total de *setup* (seguindo a lógica do caixeiro viajante); a duração das corridas se obtém aplicando a regra de iniciar em zero.

A Tabela 4 exibe os resultados das quatro alternativas de solução avaliadas (consulte-se Gutierrez (2004) para detalhes sobre os procedimentos). Desta tabela, pode-se destacar, que, tomando como base o resultado de Custo Total por dia obtido pela Programação IS (a qual é infactível de programar), observa-se que a solução do Algoritmo Proposto é tão só 37% mais custoso. Comparado com os 110% e os 179% das outras duas alternativas, se percebe a grande diferença que existe quanto aos benefícios que se conseguem com o emprego do Algoritmo Proposto, para o caso em particular.

6. Conclusões

Este trabalho abordou um problema relevante existente em praticamente todas as empresas engarrafadoras de refrigerantes e em muitas outras que guardam características similares. O problema é, na prática, muito complexo e, por esse motivo, não há possibilidade de ter uma solução exata e geral. Daí a vantagem do emprego dos métodos de solução heurísticos.

O fato de o caso estudado apresentar tempos e custos de *setup* dependentes da seqüência de produção faz com que a "Programação de Solução Independente (IS)" e a "Programação de Rotação Pura (RC)" (duas técnicas simples) não sejam úteis, só serviram para ter uma idéia de que tão próximo dos limitantes inferior e superior para o custo, a solução determinada pelo algoritmo proposto se encontrava. O algoritmo de Singh e Foster (1987) foi adaptado, acrescentando as vantagens de outras metodologias. As principais contribuições foram a inclusão do método de Haessler (1979) no seqüenciamento final dos produtos; e permitir a existência de tempos ociosos, empregando a metodologia de Delporte e Thomas (1977).

Tabela 3 - Seqüência final e os seus parâmetros, aplicando o algoritmo proposto

	t_m	y_m	s_m(*)	$q_m=t_m \cdot p_i$	$T_m = q_m/r_i$	CME (**)
Produto	**dias**	**dias**	**dias**		**dias**	
P1	0,391362	0,02383	0,0694	4109,30	1,4681	928,825
P4	0,281563	0	0,0625	2703,00	1,5220	863,730
P8	0,162999	0	0,0833	1564,79	1,5148	458,649

P7	0,024017	0	0,0556	432,30	3,0021	280,398
P6	0,251028	0	0,0625	2635,79	3,0020	1497,172
P1	0,394687	0	0,0694	4144,21	1,4806	944,675
P5	0,032667	0	0,0417	588,00	6,0000	764,209
P4	0,274407	0	0,0625	2634,31	1,4833	820,388
P8	0,165026	0	0,0972	1584,25	1,5336	470,124
P3	0,255902	0,0315	0,0556	4606,23	2,9470	2744,850
P1	0,40548	0,0662	0,0694	4257,54	1,5211	997,049
P4	0,324762	0	0,0625	3117,72	1,7555	1149,102

Cont. ...

Cont. Tabela 3

P8	0,116634	0	0,0833	1119,68	1,0839	234,832
P7	0,023983	0	0,0556	431,70	2,9979	279,619
P6	0,250684	0	0,0625	2632,19	2,9979	1493,077
P1	0,407893	0	0,0833	4282,88	1,5301	1008,951
P8	0,200964	0	0,0833	1929,25	1,8676	697,180
P4	0,229264	0,01568	0,0625	2200,93	1,2393	572,664
P3	0,265096	0	0,0417	4771,74	3,0529	2945,644
P2	0,09875	0	0,0417	948,00	6,0000	1465,186
TOTAIS	**4,5572**	**0,1373**	**1,3056**	**50694**		**20616,32**
* s_m é o tempo de *setup* que corresponde à seqüência (já não são tempos constantes)						
** CME = Custo de Manter Estoque: T_m^2(1-ρ_i)($r_i h_i$)/2						

Tabela 4 - Resultados dos métodos de solução

	Programação IS	Programação RC	Algoritmo Proposto	Solução PCV
Período de Planejamento (H)	Indefinido	6 dias	6 dias	6 dias
% Tempo Ocioso	0	0	2,29 %	3,79%
Custo Total de Inventário ($)	Ignora H	56840,322	20616,32	36920,15
Custo Total de *Setup* ($)	Ignora H	3036	8648	8050
Custo Total no Período H ($)	Ignora H	59876,322	29264,32	44970,16
Custo Total por dia ($)	**3570,94**	**9979,387**	**4877,387**	**7495,027**
% Adicional no Custo tomando como base a Programação IS	**--**	**179%**	**37%**	**110%**

Com a comparação de custos feita entre as quatro metodologias apresentadas na Tabela 4, fica claro que o algoritmo proposto para a programação da produção é realmente muito eficiente. No problema estudado o custo da solução obtida só é superior em 37% ao custo da programação “IS”; resultado bastante bom, tendo em vista que a Programação “IS” não é factível e foi calculada com os menores custos e tempos de *setup* que cada produto poderia apresentar. Comparando esta com a Programação RC e a Solução PCV, as diferenças são extremamente notórias.

É claro que, ao levar à prática este programa será talvez necessário realizar pequenos ajustes diários na produção (sempre se está sujeito à incerteza), mas manter uma seqüência relativamente estável resulta vantajoso para o Planejamento da Produção que precisa de uma informação consolidada no início de cada período de planejamento (H) para poder programar as quantidades de recursos e os momentos em que devem de ficar disponíveis para a linha de produção. A programação pode ser diferente a cada H períodos, visto que os valores dos parâmetros considerados poderiam mudar, mas dentro do período H não é necessário nem recomendável alterar a ordem, salvo ocorram situações de extrema relevância.

Abstract

This essay analyzes the Economic Lot Scheduling Problem (ELSP), usually found in industries with line production processes (production follows a specified sequence of operations). The objective of the problem is to determine a production sequence that minimizes setup and inventory carrying costs, satisfying the market demand without delays. For the case studied, the time and setup cost depend on the chosen production sequence. In this work, tradicional approachs and others involving Traveling Salesman Problem are analized, generating sequences and production volumes for each product, obtaining costs close to the optimum.
Key words: Economic Production Lot Scheduling; Sequence Dependent Setups; Traveling Salesman Problem

Referências

BOMBERGER, E. E. A dynamic programming approach to a lot size scheduling problem. **Management Science**, v. 12, n. 11, 1966.

DELPORTE, C. M.; THOMAS, L. J. Lot sizing and sequencing for n products on one facility. **Management Science**, v. 23, n. 10, 1977.

DOBSON, G. The cyclic lot scheduling problem with sequence-dependent setups. **Operations Research**, v. 40, n. 4, 1992.

ELMAGHRABY, S. E. The Economic Lot Scheduling Problem (ELSP): review and extensions. **Management Science**, v. 24, n. 6, 1978.

GUTIERREZ, J. **O Problema da Programação de Lotes Econômicos de Produção (ELSP) com tempos e custos de *setup* dependentes da seqüência**: um estudo de caso. Dissertação (Mestrado), PUC-Rio, Departamento de Engenharia Industrial. Rio de Janeiro, 2004.

HAESSLER, R. W. An improved extended basic period procedure for solving the Economic Lot Scheduling Problem. **IIE Transactions**, v. 11, n. 4, 1979.

LAWLER, E.; LENSTRA, J.; RINNOOY KAN, H.; SHMOYS, D. **The traveling salesman problem**. New York: John Wiley e Sons, 1987.

MAXWELL, W. The scheduling of economic lot sizes. **Naval Research Logistic**, v. 11, n. 2-3, 1964.

MAXWELL, W. L.; Singh, H. The effect of restricting cycle times in the Economic Lot Scheduling Problem. **IIE Transactions**, v. 15, n. 3, 1983.

McGEE V. E.; PYKE D. F. Periodic production scheduling at a fastener manufacturer. **International Journal of Production Economics**, v. 46-47, p. 65-87, 1996.

SINGH, H.; FOSTER, J. B. Production scheduling with sequence dependent setup costs. **IIE Transactions**, v. 19, n. 1, 1987.