

PLANEJAMENTO E PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO NA INDÚSTRIA DE EMBALAGENS EM POLPA MOLDADA

Karim Yaneth Pérez Martínez

Universidade Federal de São Carlos - *Campus* Sorocaba
Rodovia João Leme dos Santos (SP-264), Km. 110, Bairro do Itinga – Sorocaba, SP
e-mail: karim@ufscar.br

Eli Angela Vitor Todo

Universidade Federal de São Carlos - *Campus* Sorocaba
Rodovia João Leme dos Santos (SP-264), Km. 110, Bairro do Itinga – Sorocaba, SP
e-mail: eli@ufscar.br

RESUMO

Abordou-se o planejamento e programação da produção na indústria de embalagens em polpa moldada, cujo processo de produção compreende diversas etapas que envolvem desde a produção da polpa, até a obtenção das embalagens. A obtenção dos produtos depende da utilização de ferramentais utilizados na etapa de moldagem, que contêm moldes para a produção de embalagens em diferentes formatos. Estes ferramentais são chamados de “padrões de moldagem”, os quais permitem a produção de um único produto, ou vários, de forma simultânea. Foi proposta uma formulação baseada no Problema de Dimensionamento de Lotes Capacitado (CLSP) para a representação do problema e determinação das principais decisões de planejamento: escolha dos padrões de moldagem a serem utilizados, tempo de produção de cada um deles em cada máquina, e a sequência em que devem ser programados. Os resultados de a abordagem proposta demonstram ser melhores, quando comparados com o planejamento de uma fábrica representativa do setor.

PALAVRAS – CHAVE. Planejamento e programação da produção, indústria de embalagens em polpa moldada, dimensionamento de lotes.

Área principal: IND-PO na indústria, AD&GP - PO na Administração & Gestão da Produção.

ABSTRACT

This paper is about planning and scheduling problem in molded pulp packages industry, whose process has several stages involving from pulp formation to getting packages. Getting packages depends on a utilization of some toolings in molding stage, which have molds for production of several packages with different formats. These toolings are called “molding patterns”, which can produce one single kind of product or several simultaneously. In order to represent the problem, a mathematical formulation based on Capacitated Lot Sizing Problem (CLSP) was used, which answer the main decision in the production system: which molding patten use, production time of molding pattern in each machine, and the way they have to be sequenced. Results about the proposed approach shows being better than the planning production of a plant that produce pulp molded packages.

KEYWORDS. Planning and scheduling, molded pulp packages industry, lot sizing and scheduling problem.

Main area: IND-OR in industry, AD & GP - OR in Administration & Production Management.

1. Introdução

As embalagens tem um papel fundamental na sociedade, não somente pela proteção que oferecem durante o transporte e manuseio de produtos ou alimentos, mas também como uma forma de preservá-los até o descarte. A produção de embalagens demanda decisões importantes tanto nos aspectos produtivo e econômico, quanto no aspecto ambiental, que sistematicamente envolvem um grande desafio nas atividades de planejamento nos níveis tático e operacional. No referente ao aspecto ambiental, visto que as embalagens tem um rápido descarte e geram grandes acúmulos de resíduos pós-consumo, estas devem ser projetadas de modo que: sejam aproveitados de forma eficiente os recursos disponíveis; a sua produção não empobreça o capital natural das próximas gerações; e, o seu processo de descarte pós-consumo seja fácil (PEREIRA; DA SILVA, 2010). Em relação ao aspecto econômico, em geral a produção de embalagens deve garantir uma margem mínima de lucratividade apesar de seu baixo valor no mercado, de modo que grandes volumes de produto devem ser produzidos de modo eficiente para manter este equilíbrio. Já no aspecto produtivo, o processo de produção de embalagens envolve características particulares relacionadas aos grandes volumes de demanda, produção e estoque, que dificultam as atividades de planejamento.

Neste contexto, este trabalho aborda as principais decisões envolvidas no planejamento e programação da produção na indústria de embalagens em polpa moldada. Os processos produtivo e decisório são caracterizados por meio do estudo de caso em uma fábrica de embalagens para acondicionamento de ovos e frutas na cidade de Sorocaba - SP. O problema envolve o dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção considerando linhas paralelas com diferentes padrões de moldagem que devem ser programadas para atender a demanda por produtos sem atrasos. O objetivo é estabelecer um plano de produção que minimiza os custos de preparação da linha, que são dependentes da sequência de produção, e os custos de manter estoques.

Este trabalho é organizado como segue. A seção 2 apresenta uma breve revisão de literatura, principalmente dos trabalhos que tratam os problemas de dimensionamento de lotes e programação da produção em diversos setores industriais. A seção 3 apresenta uma descrição do processo de produção na indústria de embalagens em polpa moldada, e em particular da fábrica objeto de estudo. Seguidamente, a seção 4 descreve os aspectos mais importantes no planejamento e programação da produção neste tipo de indústria. A seção 5 apresenta a formulação matemática proposta para representar as decisões neste tipo de indústria, assim como as considerações levadas em conta para a modelagem do problema. A seção 6 apresenta os resultados dos estudos computacionais realizados e as comparações em relação à fábrica objeto de estudo. Finalmente algumas conclusões e perspectivas de trabalhos futuros são apresentadas.

2. Revisão de literatura

De forma geral, o problema de dimensionamento de lotes e programação da produção responde efetivamente às questões do que, quando e quanto produzir de um produto, assim como a determinação dos níveis de estoque e recursos necessários, visando à otimização de recursos, geralmente à minimização dos custos totais envolvidos (KARIMI; GHOMI; WILSON, 2003). Historicamente, o estudo dos problemas de dimensionamento de lotes surgiu com a modelagem clássica da quantidade econômica de pedido (EOQ - *Economic Order Quantity*), apresentado originalmente Ford Withman Harris em 1913 (DREXL; KIMMS, 1997; ERLKOTTER, 1990). A partir de então vários modelos surgiram para abordar as decisões de dimensionamento de lotes, e posteriormente incorporar decisões de sequenciamento de forma integrada. Entre as formulações clássicas do problema integrado de dimensionamento de lotes e programação da produção encontram-se: o Problema de Dimensionamento de Lotes Discreto - DLSP (FLEISCHMANN, 1990; GICQUEL; MINOUX; DALLERY, 2009); o Problema de Dimensionamento com Setup Contínuos - CSLP (DREXL; KIMMS, 1997); o Problema de Dimensionamento de Lotes Proporcional - PLSP (DREXL; HAASE, 1995); o Problema de Dimensionamento de Lotes Capacitado - CLSP (KARIMI; GHOMI; WILSON, 2003); e o Problema de Dimensionamento de Lotes Geral - GLSP (FLEISCHMANN; MEYR, 1997). Estas formulações representam as decisões envolvidas no dimensionamento de lotes e programação da

produção, podendo ser estendíveis para alguns considerar também alguns elementos em particular, como por exemplo tempos e custos de setup dependentes da sequência, *backlogging*, *setup carryover*, perda de vendas, entre outros elementos.

Várias formulações clássicas e diferentes métodos aproximados tem sido utilizados para abordar os problemas de dimensionamento de lotes e programação da produção em diversos setores industriais. Na indústria de fumo, por exemplo, Pattloch, Schmidt e Kovalyov (2001) propõem uma formulação matemática e quatro heurísticas para abordar o problema neste tipo de indústria, visando à minimização dos custos de troca envolvidos na produção de múltiplos produtos em um sistema de múltiplas máquinas paralelas idênticas. Os seus resultados apresentam um plano de produção aproximadamente entre 20% e 40% melhor do utilizado na empresa estudada.

Na indústria têxtil, Silva e Magalhaes (2006) abordam o dimensionamento de lotes e programação da produção em uma companhia que produz fibras acrílicas para a indústria têxtil. Este problema considera um sistema de máquinas paralelas e apresenta uma particularidade original relacionada com os tempos de preparação, a qual consiste em permitir trocas entre lotes do mesmo tipo de produto por causa do desgaste das ferramentas. Para resolver o problema os autores desenvolvem um algoritmo que utiliza regras clássicas de sequenciamento para o problema em particular, que resulta em uma melhoria dos planos de produção habituais da empresa, de modo que incorre-se em um número menor de trocas e atrasos na entrega dos produtos.

Na indústria de iogurtes, Marinelli, Nenni e Sforza (2007) abordam as decisões de dimensionamento e sequenciamento de lotes em um sistema de produção de dois níveis, através de um modelo híbrido baseado nas formulações do CLSP e CSLP para os estágios de armazenagem e processamento, respectivamente. Várias relaxações do modelo proposto e uma heurística de dois estágios também são apresentadas, as quais resolvem o problema de forma efetiva.

Na indústria de bebidas Toledo et al. (2007) abordam o problema de dimensionamento de lotes e programação da produção em uma fábrica de refrigerantes. As decisões envolvidas neste sistema de produção envolvem o dimensionamento e a programação dos xaropes em dois níveis: no primeiro nível é definido quanto e quando determinado xarope será armazenado em cada um dos tanques; no segundo nível é definido quanto e quando determinado produto será colocado em produção nas linhas de engarrafamento. O modelo apresentado utiliza elementos das formulações do GLSP e do Problema Contínuo de Dimensionamento de Lotes (PCDL), que envolve um amplo conjunto de variáveis e parâmetros que tornam a formulação complexa, e a sua resolução em forma exata viável apenas para um conjunto de instâncias de pequeno porte. Em vista dos resultados desta pesquisa, vários métodos aproximados foram explorados para este problema na indústria de bebidas, tais como estratégias de relaxação e decomposição (FERREIRA et al., 2008), técnicas evolucionárias, algoritmos genéticos com múltiplas populações (TOLEDO et al., 2009), algoritmos de Busca Tabu (TOLEDO; ARANTES; FRANÇA, 2011), e, mais recentemente abordagens combinadas de um algoritmo genético com múltiplas populações e uma heurística *'threshold accepting'*, e algoritmos de Busca Tabu combinada com algoritmos genéticos multi-populacional (TOLEDO et al., 2012). Ferreira, Morabito e Rangel (2009) também apresentam diferentes abordagens para a resolução dos problemas de dimensionamento de lotes e programação da produção no mesmo setor industrial.

Da mesma forma, na literatura relacionada encontram-se várias aplicações dos problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes aplicados em diversos setores industriais como na indústria de vidro (ALMADA-LOBO; OLIVEIRA; CARRAVILLA, 2008), na indústria de nutrição animal (TOSO; MORABITO; CLARK, 2009; CLARK; MORABITO; TOSO, 2010), na indústria química (TRANSCHEL et al., 2011), e no setor de fundições (ARAUJO; ARENALES; CLARK, 2007; LUCHE; MORABITO, 2005).

Neste contexto, este trabalho apresenta também uma aplicação dos problemas de dimensionamento de lotes e programação da produção na indústria de embalagens em polpa moldada. Nesta configuração produtiva, a produção das diferentes embalagens é realizada através

da utilização de padrões de moldagem, portanto, as decisões de planejamento e programação da produção são representadas com o dimensionamento e sequenciamento de lotes de processo, e não de lotes de produtos. A próxima seção descreve o sistema de produção e a utilização de padrões de moldagem para a produção das diferentes embalagens.

3. Processo de produção de embalagens moldadas.

Como mencionado anteriormente, este trabalho aborda as decisões de planejamento e programação da produção na indústria de embalagens em polpa moldada, especificamente na produção de estojos moldados para acondicionamento de ovos. O processo de produção destas embalagens consta de várias etapas como ilustrado na Figura 1. Apesar do processo de produção possuir várias etapas, este pode ser considerado como um processo mono estágio, em vista da continuidade do material desde a primeira até a última etapa sem estoques intermediários.

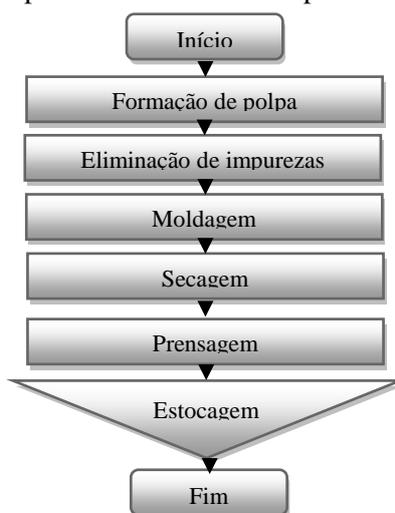


Figura 1. Fluxograma do processo de produção de estojos em polpa moldada para acondicionamento de ovos.

O processo de produção começa com a etapa de formação de polpa. Nesta primeira etapa, as matérias primas formadas principalmente por pasta mecânica e aparas de diferentes tipos de papel (sulfite, rascunho, caderno, jornal, entre outras), são misturadas com água e outros agentes químicos no equipamento apropriado (*Hydra Pulper*), de modo que a polpa seja formada nas condições desejadas. Depois desta etapa, a massa formada passa por um sistema de peneiras vibratórias que eliminam as impurezas mais grosseiras da polpa. Seguidamente, a massa passa para um tanque de armazenagem que supre a etapa de moldagem, que é considerada uma das mais importantes do processo completo.

Na etapa de moldagem, a polpa formada segue para uma máquina que trabalha com dois rotores sincronizados que dão formato à embalagem através de operações de pressão e sucção do excesso de água. Estes rotores tem acoplados ferramentais que contém moldes para a produção dos diferentes itens nos diferentes formatos, os quais chamamos de 'padrões de moldagem' ou 'padrões de conformação'. Cada padrão de moldagem pode conter moldes de um, dois ou até três formatos diferentes de embalagens. A Figura 2 apresenta uma ilustração dos rotores sincronizados e os padrões de conformação utilizados na etapa de moldagem. Note que o padrão da Figura 2 contém moldes para dois formatos diferentes de embalagens, sendo quatro moldes para estojos de seis ovos e um molde para estojos de dezoito ovos.

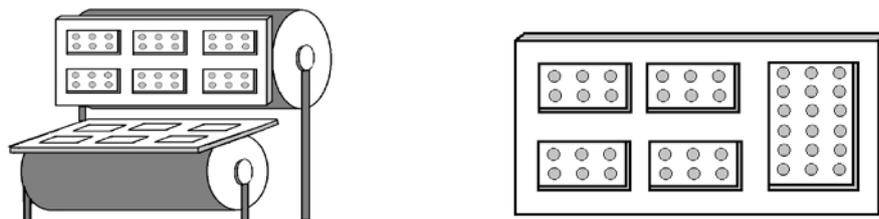


Figura 2. Rotores sincronizados e padrões de conformação utilizados na etapa de moldagem.

Continuando o processo de produção, depois da moldagem o material passa pela etapa de secagem. Nesta etapa o material é submetido a temperaturas que variam entre 180°C e 240°C aproximadamente, durante um tempo entre 10 e 15 minutos, dependendo do estado do material. Depois da secagem, o material processado passa pela etapa de prensagem, que dá um melhor acabamento e resistência às embalagens. Após a prensagem, os estojos produzidos são empacotados e dispostos em paletes para serem estocados até a data de entrega combinada com os clientes, ou até serem requeridos pelo processo de impressão para a personalização dos mesmos.

4. Planejamento e programação da produção na indústria de embalagens moldadas.

De forma geral, as atividades de planejamento e programação da produção neste tipo de indústria lidam com a produção de grandes volumes de produtos, considerando o baixo preço que estas embalagens têm no mercado. Estas atividades visam ao atendimento total da demanda, de modo que os custos de preparação das linhas e os custos de estocagem sejam minimizados.

Uma das particularidades mais importantes no sistema de produção de embalagens em polpa moldada, e determinante para as atividades de planejamento e programação da produção, é a etapa de moldagem. A produção dos diferentes itens depende diretamente dos padrões de moldagem utilizados na produção, os quais possuem taxas de produção diferentes em relação a cada item (unidades/hora). Cada padrão de moldagem pode conter moldes para um, dois e até três formatos de embalagens, o que permite a produção de itens diferentes de forma simultânea. Da mesma forma, um item em particular pode ser produzido a partir de vários padrões de moldagem.

A escolha dos padrões de moldagem tem efeito tanto nos custos relacionados às trocas entre os diferentes padrões, quanto nos custos e níveis de estoque. Os tempos e custos de preparação das linhas de produção são dependentes da sequência, e acontecem toda vez que é requerida uma troca de cor, uma troca entre os padrões de moldagem, ou ambas as possibilidades de forma simultânea. Os tempos de preparação das linhas podem variar entre 30 minutos e 2 horas para trocas de cor, e entre 10 e 48 horas para troca de padrões de moldagem. Além do tempo requerido, as operações de preparação das linhas incorrem em um custo de mão de obra especializada proveniente da equipe de manutenção e do pessoal de produção, além do custo de oportunidade relacionado com a parada das linhas para a realização destas atividades.

Em relação aos custos e níveis de estoque, grandes níveis de estoque podem ser gerados visto que a utilização de determinados padrões de moldagem pode gerar a produção de itens com alta demanda e simultaneamente a produção de itens de baixa demanda. Desta forma, tendendo a minimizar o excesso de estoque de itens de baixa demanda e garantir a disponibilidade de itens de alta demanda, para cada item são definidos níveis mínimo e máximo de estoque desejáveis.

Neste contexto, o planejamento e programação da produção neste tipo de indústria consistem em determinar quais os padrões de moldagem a serem utilizados, quanto tempo cada um destes padrões de moldagem devem ser programados em cada linha de produção, e a sequência em que os padrões devem ser programados, de modo que toda a demanda seja atendida e os custos de estocagem, preparação e desvio dos níveis de estoque desejáveis sejam minimizados.

5. Modelagem do problema

Para abordar as decisões de planejamento e programação da produção na indústria de embalagens em polpa moldada é proposta uma formulação baseada no Problema de Dimensionamento de Lotes Capacitado (CLSP) reformulado por Almada-Lobo et al. (2007).

No modelo são representadas as decisões relacionadas com a designação de padrões de moldagem em cada linha de produção, o tempo de produção de cada um deles, e a sequência em que devem ser programados. Para a produção das embalagens tem-se disponível um sistema de linhas paralelas idênticas, além de um conjunto conhecido de padrões de moldagem com conformação e taxa de produção diferentes, onde cada linha de produção dispõe de todos os padrões em qualquer instante de tempo.

Assume-se também que cada período de produção representa uma semana do horizonte de planejamento. Os tempos e custos de preparação entre os padrões de moldagem são dependentes da sequência e obedecem à desigualdade triangular. Adicionalmente, considera-se também que o estado de preparação das linhas permanece de um período para outro (*setup carryover*). Todas estas considerações devem ser respeitadas de modo que a totalidade da demanda seja atendida, e os custos totais sejam minimizados.

O modelo baseado no CLSP compreende o seguinte conjunto de índices, parâmetros e variáveis, e pode ser apresentado da seguinte forma.

Índices

i, j	Padrões de moldagem ou padrões de conformação $i = 1, \dots, N$
k	Tipos de itens $k = 1, \dots, K$
l	Linhas de produção $l = 1, \dots, L$
t	Períodos de tempo $t = 1, \dots, T$

Parâmetros

N	Número de padrões de moldagem disponíveis
K	Número de itens
M	Linhas de produção disponíveis
T	Períodos de tempo no horizonte de planejamento
I_{k0}	Nível de estoque do item k ao início do horizonte de planejamento
$I_{k(min)}$	Nível de estoque mínimo desejado para o item k
$I_{k(max)}$	Nível de estoque máximo desejado para o item k
h_k	Custo de estocar uma unidade do item k por período
e_k^+	Penalidade por unidade de estoque do item k acima do nível máximo
e_k^-	Penalidade por unidade de estoque do item k abaixo nível mínimo
d_{kt}	Demanda do item k no período t
Q_{lt}	Capacidade da linha l no período t (horas)
p_{ki}	Taxa de produção do padrão i com relação ao item k (unidades/hora)
st_{ij}	Tempo de preparação para a troca do padrão de moldagem i para o padrão j
c_{ij}	Custo de preparação envolvido na troca do padrão de moldagem i para o padrão j
M_{lit}	Limitante superior associado a cada padrão de moldagem, em cada linha, e para cada período de tempo.

Variáveis

x_{lit}	Horas de produção da linha l sob a configuração do padrão i no período t
I_{kt}	Unidades do item k estocadas ao final do período t
E_{kt}^+	Unidades do item k acima do nível de estoque máximo desejado
E_{kt}^-	Unidades do item k embaixo do nível de estoque mínimo desejado
y_{lit}	Indica se a linha l está configurada para o padrão i no início do período t ($y_{lit} = 1$), ou não ($y_{lit} = 0$)
z_{lijt}	Indicase na linha l há troca do padrão i para o padrão j no durante o período t ($z_{lijt} = 1$), ou não ($z_{lijt} = 0$)

v_{lit} Variável auxiliar para a eliminação de ciclos desconexos dentro da sequência de programação dos padrões

$$\text{Minimizar } \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K h_k I_{kt} + \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N c_{ij} z_{lijt} + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K (e_k^+ E_{kt}^+ + e_k^- E_{kt}^-) \quad (1)$$

$$I_{kt} = I_{k(t-1)} + \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^N p_{ki} x_{lit} - d_{kt} \quad \forall t = 1, \dots, T; k = 1, \dots, K \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N x_{lit} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N s_{ij} z_{lijt} \leq Q_{lt} \quad \forall t = 1, \dots, T; l = 1, \dots, L \quad (3)$$

$$x_{lit} \leq M_{lit} \left(y_{lit} + \sum_{j=1: j \neq i}^N z_{ljit} \right) \quad \forall t = 1, \dots, T; l = 1, \dots, L; i = 1, \dots, N \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N y_{lit} = 1 \quad \forall t = 1, \dots, T; l = 1, \dots, L \quad (5)$$

$$y_{lit} + \sum_{j=1: j \neq i}^N z_{ljit} = y_{li(t+1)} + \sum_{j=1: j \neq i}^N z_{lijt} \quad \forall t = 1, \dots, T; l = 1, \dots, L; i = 1, \dots, N \quad (6)$$

$$v_{lit} + N z_{lijt} - (N-1) - N y_{lit} \leq v_{ljt} \quad \forall t = 1, \dots, T; l = 1, \dots, L; i, j = 1, \dots, N / i \neq j \quad (7)$$

$$I_{kt} + E_{kt}^- - E_{kt}^+ \geq I_{k(\min)} \quad \forall k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T \quad (8)$$

$$I_{kt} + E_{kt}^- - E_{kt}^+ \leq I_{k(\max)} \quad \forall k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T \quad (9)$$

$$I_{kt}, x_{lit}, v_{lit}, E_{kt}^+, E_{kt}^- \geq 0; y_{lit}, z_{lijt} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j = 1, \dots, N; l = 1, \dots, L; k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T \quad (10)$$

A função objetivo (1) visa à minimização dos custos totais, considerando os custos de estocagem, os custos de preparação dependentes da sequência, e penalizações associadas aos desvios dos níveis mínimo e máximo de estoque desejados. As equações (2) correspondem às restrições de balanceamento de estoques e atendimento à demanda. Diferente das formulações clássicas para o problema de dimensionamento de lotes, as unidades produzidas não são apresentadas de forma explícita nestas restrições. No entanto, o volume produzido de cada item é diretamente relacionado com as horas de utilização de cada padrão em cada linha, e a taxa de produção de cada padrão de moldagem.

As restrições (3) se referem ao consumo de capacidade em cada linha e em cada período do horizonte de planejamento. Note que a capacidade de cada linha é reduzida pelas horas de produção de cada padrão de moldagem utilizado, e os tempos de preparação que são dependentes da sequência. As restrições (4) estabelecem que, para cada período de tempo e cada linha de produção, o padrão i só pode ser utilizado se a linha foi preparada para ele no início do período, ou houve uma preparação a partir de qualquer outro padrão j para o padrão i , nesse período. Note que as horas de produção de cada padrão em cada linha e para cada período, tem associado um limitante superior, o qual pode ser obtido a partir da expressão (11), considerando que *backlogging* não são permitidos.

$$M_{lit} = \min \left\{ Q_{lt}, \max_{k: p_{ki} \neq 0} \frac{\sum_{h=t}^T d_{kh}}{p_{ki}} \right\} \quad \forall l = 1, \dots, L; i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (11)$$

As equações (11) indicam que cada padrão de moldagem i na linha l no período t , pode ser utilizado no máximo, o mínimo entre a capacidade da linha nesse período, e o tempo requerido para o atendimento da demanda dos períodos de tempo restantes para os itens que podem ser obtidos através do padrão i .

As restrições (5) garantem que cada linha de produção deve estar preparada para um único padrão de moldagem, ao início de cada período de tempo.

As desigualdades (6) definem o sequenciamento dos padrões de moldagem, permitindo a utilização de vários padrões em cada período. Observe que estas equações estabelecem a relação entre os estados iniciais de preparação da linha e as trocas ao longo de cada período. Através destas desigualdades se estabelece que: se uma linha está preparada para o padrão i no início do período, necessariamente deve existir uma troca para qualquer padrão $j \neq i$, ou o estado de preparação permanece até o início do período seguinte ($y_{li(t+1)} = 1$). Da mesma forma, se há troca do padrão j para o padrão i no período t , necessariamente deve existir uma nova troca do padrão i para qualquer outro $j \neq i$, ou o estado de preparação se mantém para o próximo período.

As restrições (6) permitem a utilização de vários padrões de moldagem e conseqüentemente várias trocas em cada linha e em cada período de tempo, no entanto, estas restrições permitem soluções que podem apresentar ciclos desconexos no sequenciamento dos padrões em cada linha. Desta forma, as restrições (7) são impostas a fim de obter uma solução factível e um plano de produção coerente. Note que estas restrições utilizam as variáveis auxiliares v_{lit} para a eliminação de ciclos desconexos nas soluções, de modo que uma solução factível pode ser representada como uma única seqüência ou um único ciclo. A modelagem destas restrições são similares às chamadas "restrições fracas" de eliminação de sub rotas nos problemas do caixeiro viajante (TSP), e são apresentadas como propostas em Almada-Lobo et al. (2007), sendo adaptadas para o problema em estudo. As equações (8) e (9) contabilizam as unidades acima do nível máximo de estoque desejado, e as unidades abaixo do nível mínimo de estoque desejado.

Finalmente as expressões (10) definem o domínio das variáveis. Note que o número de horas de produção de cada padrão de moldagem é considerado como uma variável positiva, apesar de que isto não garante que o volume produzido de cada item seja uma quantidade inteira, no entanto, esta é uma aproximação aceitável no sistema de produção estudado devido aos grandes volumes de produção e os níveis mínimos de estoque definidos.

6. Estudos computacionais

Com o objetivo de verificar a adequação do modelo proposto para representar as decisões de planejamento e programação da produção na indústria de embalagens em polpa moldada, são apresentados os resultados de um exemplar em particular que representa a situação do sistema de produção real. Neste exemplar é considerado um horizonte de planejamento de 4 semanas, de modo a atender a demanda de 14 itens diferentes, os quais podem ser produzidos através de 19 padrões de moldagem, e os tempos de preparação dependentes da seqüência variam entre 0,5 e 48 horas. O sistema funciona 24 horas por dia, 7 dias por semana, com exceção do tempo que leva a execução das atividades de manutenção programadas.

O modelo apresentado na seção anterior foi testado para este exemplar e comparado com o plano de produção definido pela fábrica em estudo. Considerando que o plano de produção da fábrica apresenta atrasos em relação às previsões de demanda, o modelo anterior foi adaptado de forma a permitir *backlogging*. Para isto, além dos parâmetros e variáveis já definidas, considera-se também custo unitário de atraso de cada item g_k , e uma nova variável positiva I_{kt}^+ , que representa as unidades atrasadas do item k ao final do período t . Desta forma, a função objetivo e as restrições de balanceamento de estoque são alteradas, conforme expressões (12) e (13), e o modelo CLSP com *backlogging* consiste nas expressões (12)-(13), (2)-(10) e (14).

$$\text{Minimizar } \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K (h_k I_{kt} + g_k I_{kt}^-) + \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N c_{ij} z_{lijt} + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K (e_k^+ E_{kt}^+ + e_k^- E_{kt}^-) \quad (12)$$

$$I_{kt} - I_{kt}^- = I_{k(t-1)} - I_{k(t-1)}^- + \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^N p_{ki} x_{lit} - d_{kt} \quad \forall t = 1, \dots, T; k = 1, \dots, K \quad (13)$$

$$I_{kt}^- \geq 0 \quad \forall k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T \quad (14)$$

Para a implementação dos modelos foi utilizado a linguagem GAMS (*General Algebraic Modeling System*) versão 22.6, e *osolver* CPLEX 11 para a resolução dos mesmos, em um computador com processador *Intel Core i72.20* GHz. e memória RAM instalada de 16Gb.

Os planos de produção resultantes dos modelos sem consideração de *backlogging*, e considerando *backlogging* são apresentados na Figura 3 e Figura 4, correspondentemente. Estes planos apresentam as horas de produção que cada padrão de moldagem é utilizado em cada linha, assim como o tempo dedicado às operações de preparação necessárias para as trocas entre padrões, além do tempo dedicado às atividades de manutenção programadas nesse horizonte de planejamento.

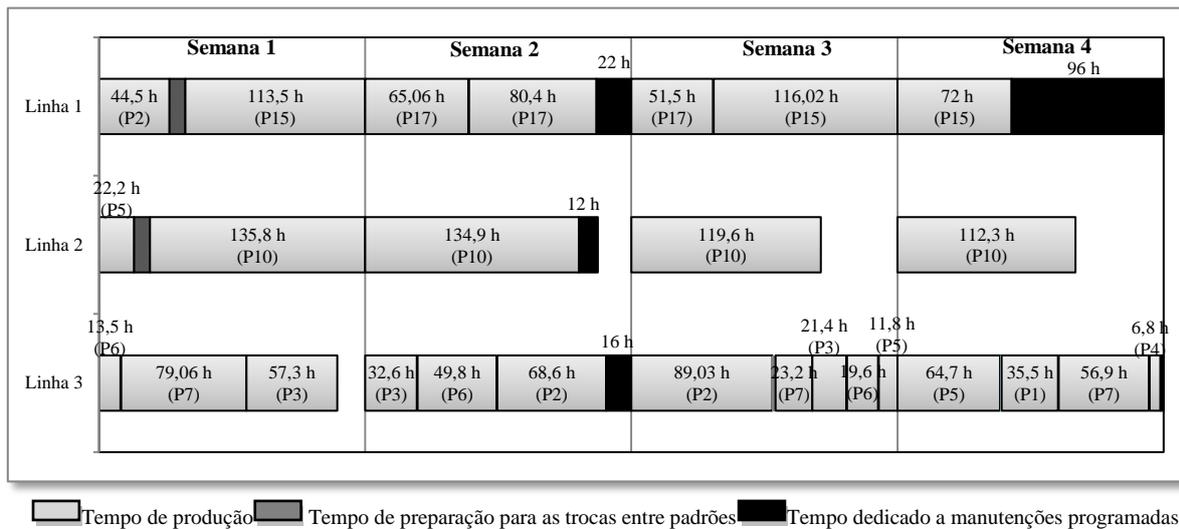


Figura 3. Plano de produção resultante do modelo baseado no CLSP sem *backlogging*.

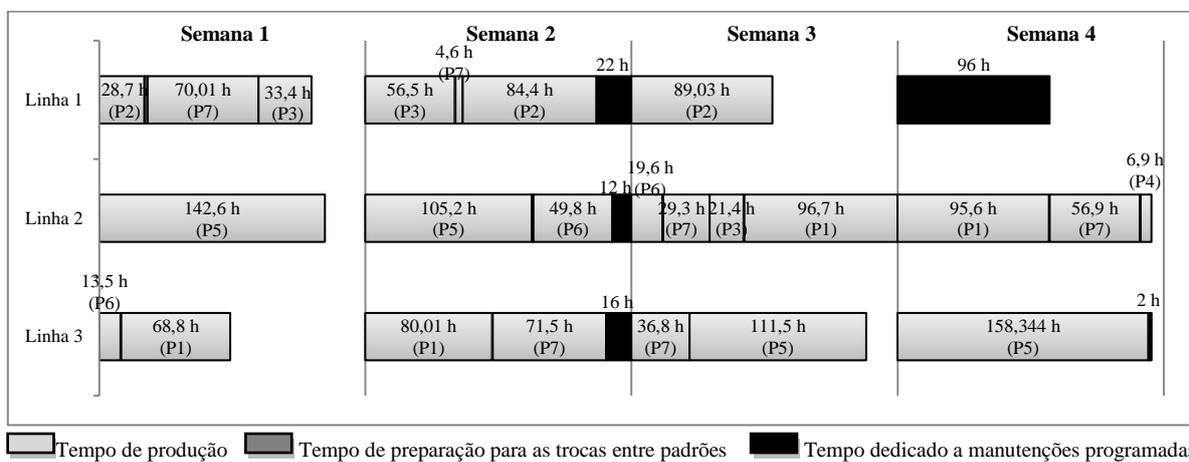


Figura 4. Plano de produção resultante do modelo baseado no CLSP com *backlogging*.

Note que o plano da Figura 4 resultante do modelo com *backlogging* em comparação com o plano resultante do modelo sem consideração de *backlogging* ilustrado na Figura 3, parece aproveitar de uma melhor forma a capacidade do sistema de produção. No entanto, como ilustrado na Tabela 1, os dois modelos apresentam um melhor aproveitamento da capacidade em comparação com o plano da produção da fábrica, no sentido de que os requerimentos de demanda são atendidos e a produção é programada de modo a incorrer em um menor consumo de capacidade.

Linhas de produção	Modelo sem consideração de <i>backlogging</i>	Modelo com consideração de <i>backlogging</i>	Plano de produção da fábrica
Linha 1	100%	66,6%	100%
Linha 2	81%	95%	100%
Linha 3	97,3%	82,8%	100%
Total do sistema	92,36%	82,3%	100%

Tabela 1. Aproveitamento da capacidade resultante dos modelos propostos e o plano de produção da fábrica.

Quanto ao tempo de execução dos modelos, foi especificado um tempo limite de 3 horas, resultando que o modelo com *backlogging* encontra a solução ótima depois de aproximadamente 8,2 minutos de execução, enquanto o modelo sem *backlogging* não consegue provar otimalidade ao término do tempo estabelecido. A solução encontrada pelo primeiro modelo (sem consideração de *backlogging*) apresenta um *gap* de 7,17% em relação ao melhor limitante, incorrendo em um custo total de 37853,16 u.m., entretanto a solução ótima encontrada pelo segundo modelo incorre em um custo de aproximadamente 33594,49 u.m. A Tabela 2 apresenta uma comparação entre os custos relacionados à solução de cada modelo proposto, e o plano de produção da fábrica.

Custos	Modelo sem consideração de <i>backlogging</i>	Modelo com consideração de <i>backlogging</i>	Plano de produção da fábrica
Custo de preparação das linhas	21.706,80 (57,34%)	3.294,30 (9,81%)	71.200,98 (56,11%)
Custo de estocagem	10.504,05 (27,75%)	7.801,35 (23,22%)	15.774,23 (12,43%)
Custo relacionado às unidades acima do nível máximo desejado de estoque	3.763,24 (9,94%)	2.576,54 (7,67%)	9.870,18 (7,78%)
Custo relacionado às unidades abaixo do nível desejado de estoque.	1.879,07 (4,96%)	4.692,19 (13,97%)	4.873,83 (3,84%)
Custo de <i>backlogging</i>	-	15.230,21 (45,34%)	25.182,47 (19,84%)
Custo total	37.853,16 (100%)	33.594,49 (100%)	126.901,68 (100%)

Tabela 2. Comparação dos custos resultante dos modelos propostos e o plano de produção da fábrica.

Note que os planos de produção gerados a partir dos modelos propostos incorrem em um custo total significativamente menor que o custo total do plano de produção definido pela fábrica. Observe também que, ainda sem possibilidades de atraso no atendimento da demanda, o primeiro modelo fornece uma solução cujos custos totais representam aproximadamente 29,82% do custo total do plano da fábrica. Por outro lado, o plano de produção resultante do segundo modelo reduz os custos de atraso em aproximadamente 39,52%, e os custos totais representam 26,47% dos custos totais incorridos no plano de produção da fábrica.

A Tabela 2 mostra também que, no modelo sem consideração de atrasos e no plano de produção da fábrica, a maior proporção dos custos totais deve-se aos custos de preparação dependentes da sequência (57,34% e 56,11% dos custos totais, respectivamente). Já no modelo com consideração de atraso na demanda, a maior proporção dos custos totais deve-se aos custos de atraso (aproximadamente 45,34%), entretanto os custos de preparação das linhas incorrem unicamente em 9,81% dos custos totais.

A Tabela 3 compara o volume de produção, o volume em estoque, as unidades atrasadas, e os desvios com relação aos níveis de estoque desejáveis ao longo do horizonte de planejamento. Apesar das unidades apresentadas em cada um destes elementos envolverem itens diferentes, o volume total simplifica as comparações entre os diferentes planos de produção. Note que o plano de produção obtido através do primeiro modelo gera um volume de produção maior que o plano de produção obtido pelo segundo modelo, no entanto, este volume não difere muito do total produzido segundo o plano da fábrica (aproximadamente 4,99% a mais).

	Modelo sem consideração de <i>backlogging</i>	Modelo com consideração de <i>backlogging</i>	Plano de produção da fábrica
Volume total produzido	14.933.298	13.457.825	14.222.758
Volume total em estoque	10.361.471,8	7.695.462	15.560.122
Unidades acima do nível máximo desejado de estoque	1.856.081,9	1.270.782	4.868.104
Unidades abaixo do nível máximo desejado de estoque	463.391,5	1.157.125	1.201.919
<i>Backlogging</i>	-	1.730.706	2.861.644

Tabela 3. Comparação de volumes de produção, estoque e atrasos (em unidades) entre os modelos propostos e o plano de produção da fábrica.

Observe na Tabela 3 que o segundo modelo gera um plano que incorre em um menor volume de produtos em estoque ao longo do horizonte de planejamento. Isto é refletido também nos custos, como apresentado na Tabela 2. Note que, de forma geral nos três planos de produção, os níveis de estoque ao longo do horizonte superam o nível máximo desejado para cada item. No entanto, na Tabela 2 note que, no modelo com consideração de atrasos, os custos associados às unidades embaixo do nível mínimo desejado de estoque é maior que o custo associado às unidades acima do nível mínimo, embora a relação seja contrária às informações apresentadas na Tabela 3. Isto acontece pois a penalização por unidades abaixo do nível mínimo desejado de estoque é consideravelmente maior que a penalização associada às unidades acima do nível máximo desejado.

Os resultados da Tabela 3 confirmam que o plano de produção gerado pelo modelo que permite atrasos, incorre em um menor custo de *backlogging* dado que uma menor quantidade de produto é atrasada ao longo do horizonte de planejamento.

7. Conclusões e perspectivas futuras

A partir das soluções obtidas na resolução dos modelos propostos e de sua comparação em relação ao plano de produção da fábrica, nós podemos afirmar que o CLSP reformulado representa adequadamente as decisões de planejamento e programação da produção na indústria de embalagens em polpa moldada. Quanto ao exemplar apresentado, podemos concluir que ambos os planos gerados pelo modelo representam uma redução significativa dos custos totais, independentemente da consideração ou não de atrasos no atendimento da demanda.

Adicionalmente, percebe-se também um melhor aproveitamento dos recursos de capacidade nos planos de produção obtidos através da resolução dos modelos propostos, dado que o planejamento e programação da produção são realizados incorrendo em um menor consumo de capacidade em relação à situação da fábrica.

Outros exemplares do sistema de produção estudado devem ser testados, de modo a complementar a análise do comportamento dos modelos em instâncias de diferentes tamanhos e características. Adicionalmente, outros elementos como o tempo dedicado às operações de troca devem ser incluídos na análise. Da mesma forma, outros objetivos e elementos de interesse neste setor industrial caracterizado pela alta demanda de produtos, poderiam ser testados e comparados, como por exemplo, a maximização do volume produzido e a consideração de técnicas de horizonte rolante.

8. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos – *Campus* Sorocaba (PPGEP-S), e à CAPES pelo apoio financeiro.

Referências

ALMADA-LOBO, B.; KLABJAN, D.; CARRAVILLA, M. A.; OLIVEIRA, J. F. Single machine multi - product capacitated lot sizing with sequence-dependent setups. *International Journal of Production Research*. v. 45, n. 20, p. 4873 - 4894, 2007.

ALMADA-LOBO, B.; OLIVEIRA, J. F.; CARRAVILLA, M. A. Production planning and scheduling in the glass container industry: AVNS approach. *International Journal of Production Economics*. v. 114, p. 363-375, 2008.

- ARAÚJO, S. A.; ARENALES, M. N.; CLARK, A. R. Joint rolling-horizon scheduling of materials processing and lot-sizing with sequence-dependent setups. *J Heuristic*. v. 13, p. 337-358, 2007.
- CLARK, A.; MORABITO, R.; TOSO, E. A. V. Production setup-sequencing and lot-sizing at an animal nutrition plant through ATSP subtour elimination and patching. *Journal of Scheduling*. v.13, n. 2, p.111-121, 2010.
- DREXL, A.; HAASE, K. Proportional lot sizing and scheduling. *International Journal of Production Economics*. v. 40, n. 1, p. 73-87, 1995.
- DREXL, A.; KIMMS, A. Lot sizing and scheduling - Survey and extensions. *European Journal of Operational Research*. v.99, n.2, p.221-235, 1997.
- ERLENKOTTER, D. Ford Whitman Harris and the economic order quantity model. *Operations Research*. v. 38, p. 937-946, 1990.
- FERREIRA, D.; FRANÇA, P. M.; KIMMS, A.; MORABITO, R.; RANGEL, S.; TOLEDO, C.F.M. Heuristic and meta-heuristics for lot sizing and scheduling in the soft drinks industry: a comparison study. *Metaheuristics for Scheduling In Industrial and Manufacturing Applications Studies in Computational Intelligence*. v. 128, p. 169-210, 2008.
- FERREIRA, D.; MORABITO, R.; RANGEL, S. Solution approaches for the soft drink integrated production lot sizing and scheduling problem. *European Journal of Operational Research*. v.196, p. 697-706, 2009.
- FLEISCHMANN, B. The discrete lot-sizing and scheduling problem. *European Journal of Operational Research*. v.44, n.3, p.337 - 348. 1990.
- FLEISCHMANN, B.; MEYER, H. The General Lotsizing and Scheduling Problem. *Operation Research Spektrum*. v. 19, n. 1, 1997.
- GICQUEL, C.; MINOUX, M.; DALLERY, Y. On the discrete lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent changeover times. *Operations Research Letters*. v. 37, n.1, p. 32-36. 2009.
- KARIMI, B.; GHOMI, S. M. T. F.; WILSON, J. M. The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms. *Omega*, v. 31, n.5, p. 365-378, 2003.
- LUCHE, J. R. D.; MORABITO, R. Otimização na programação da produção de grãos eletrofundidos: um estudo de caso. *Gestão & Produção*. v. 12, n. 1, p. 135-149, 2005.
- MARINELLI, F.; NENNI, M. E.; SFORZA, A. Capacitated lot sizing and scheduling with parallel machines and shared buffers: A case study in a packaging company. *Annals of Operations Research*. v. 150, p. 177-192, 2007.
- PATTLOCH, M.; SCHMIDT, G.; KOVALYOV, M. Y. Heuristic algorithms for lotsize scheduling with application in the tobacco industry. *Computers & Industrial Engineering*.v. 39, p. 235-253, 2001.
- PEREIRA, P. Z.; DA SILVA, R. P. Design de Embalagens e Sustentabilidade: uma análise sobre os métodos projetuais. *Design & Tecnologia*. v. 2, 2010.
- SILVA, C.; MAGALHAES, J. M. Heuristic lot size scheduling on unrelated parallel machines with applications in the textile industry. *Computers & Industrial Engineering*. v. 50, p. 76-89, 2006.
- TOLEDO, C. F. M.; FRANÇA, P. M.; MORABITO, R.; KIMMS, A. Um modelo de otimização para o problema integrado de dimensionamento de lotes e programação da produção em fábrica de refrigerantes. *Pesquisa Operacional*. v. 17, n. 1, p. 155-186, 2007.
- TOLEDO, C. F. M.; FRANÇA, P. M.; MORABITO, R.; KIMMS, A. Multi-population genetic algorithm to solve the synchronized and integrated two-level lot sizing and scheduling problem. *International Journal of Production Research*. v. 47, n. 11, p. 3097-3119, 2009.
- TOLEDO, F. C. M.; ARANTES, M. D.; FRANÇA, P. M. Tabu search to solve the synchronized and integrated two-level lot sizing and scheduling problem. Em: *ANNUAL CONFERENCE ON GENETIC AND EVOLUTIONARY COMPUTATION, 13, 2011. Proceedings...* ACM, 2011. p. 443-448.
- TOLEDO, F. C. M.; ARANTES, M. D.; FRANÇA, P. M, MORABITO, R. Memetic Framework for Solving the Lot Sizing and Scheduling Problem in Soft Drink Plants. In: CHIONG, R.; WEISE, T.; MICHALEWICZ, Z. (Eds). *Variants of Evolutionary Algorithms for Real-World Applications*. Berlin: Springer, 2012. p. 59-93.
- TOSO, E. A. V.; MORABITO, R; CLARK, A. Lot sizing and sequencing optimisation at an animal-feed plant. *Computers & Industrial Engineering*. v. 57, p. 813-821, 2009.
- TRANSCHEL, S.; KALLRATH, J.; MINNER, S.; LÖHNDORF, N.; EBERHAD, U. A hybrid general lot-sizing and scheduling formulation for a production process with a two-stage product structure. *International Journal of Production Research*.v. 19, n. 9, p.2463-2480, 2011.