



Planejamento da produção na indústria de embalagens de polpa moldada

Lot sizing and scheduling in the molded pulp packaging industry

Karim Yaneth Pérez Martínez¹
Eli Angela Vitor Toso²

Resumo: Este trabalho aborda o problema de planejamento e programação da produção na indústria de embalagens de polpa moldada, particularmente o sistema de produção de uma fábrica de embalagens para acondicionamento de ovos e frutas. O processo de produção envolve a utilização de padrões de moldagem, através dos quais são produzidos os diferentes produtos demandados. Desta forma, as decisões no planejamento da produção envolvem a escolha dos padrões de moldagem a serem utilizados, o tempo de produção de cada um deles em cada linha de produção, e a forma como devem ser sequenciados. Para representar o problema, foi proposto um modelo matemático baseado no Problema de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes Geral (GLSP), com tempos e custos de preparação dependentes da sequência. Os resultados do modelo sugerem planos de produção significativamente melhores que os planos de produção da fábrica em estudo, sendo que, em todos os experimentos realizados com dados reais, a demanda é atendida com menor consumo de capacidade, menor tempo total dedicado às operações de *setup* e melhor controle nos níveis de estoque, além de uma redução de aproximadamente 36% dos custos totais envolvidos.

Palavras-chave: Planejamento e programação da produção; Programação de padrões de moldagem; Dimensionamento de lotes; Indústria de embalagens de polpa moldada.

Abstract: *This paper addresses the problem of production planning and scheduling in the pulp molded packaging industry, considering especially a Brazilian plant that produces molded packs for eggs and fruits. The production process involves utilizing some molding patterns through which the different products are produced. Thus, decisions related to the production planning and scheduling involve the choice of which molding pattern will be used, how long they will be used on each production line, and how they should be sequenced. For representing this problem, a mathematical model based on the General Lot Sizing and Scheduling Problem (GLSP) with sequence-dependent setup times and costs was proposed. Results show that the production plans obtained by the model is advantageous compared with the company plan, because it involves lower capacity consumption, lower total setup time, and better inventory control, besides reducing the total cost of the proposed plan in approximately 36%.*

Keywords: *Production planning and scheduling; Molding patterns programming; Lot sizing; Molded pulp packaging industry.*

1 Introdução

As embalagens têm um papel fundamental na sociedade atual, não somente pela proteção que oferecem durante o transporte e manuseio de produtos ou alimentos, mas também como uma forma de preservá-los. Sendo assim, a indústria de embalagens apresenta altos índices de crescimento. Segundo a Associação Brasileira de Embalagens - ABRE (2014), a receita líquida de vendas neste setor, no ano de 2013, atingiu R\$51,8 bilhões, superando os R\$46,7 bilhões gerados em 2012. Para 2014, as perspectivas para o

setor são positivas, pois a produção de embalagens deverá crescer até 1,5% neste ano.

O planejamento da produção de embalagens em polpa moldada envolve questões importantes tanto em relação aos aspectos do ambiente produtivo, como questões de cunho econômico e ambiental. 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, o que implica que grandes volumes de

¹ Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, CEP 13565-905, São Carlos, SP, Brasil, e-mail: karim.1504@gmail.com

² Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, Campus Sorocaba, CEP 18052-780, Sorocaba, SP, Brasil, e-mail: eli@ufscar.br

produto devem ser produzidos de modo eficiente para manter este equilíbrio. Isto reforça a necessidade de um planejamento eficiente para melhor utilização dos recursos produtivos. Em relação ao aspecto produtivo, os grandes volumes de demanda, produção e estoque, dificultam as atividades de planejamento. Além disso, o processo de produção de embalagens em polpa moldada possui características particulares que trazem desafios extras para o planejamento da produção, como altos tempos de preparação das linhas de produção. Finalmente, em relação às questões ambientais, visto que as embalagens são rapidamente descartadas e geram grande acúmulo 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 & Silva, 2010).

Este artigo tem como escopo as decisões de planejamento e programação na indústria de embalagens, particularmente embalagens em polpa moldada para acondicionamento de ovos e frutas. Os processos de produção e de tomada de decisão considerados neste trabalho são caracterizados por meio do estudo de caso de uma fábrica localizada na cidade de Sorocaba - SP. O problema envolve o dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção considerando linhas paralelas, as quais têm disponíveis diferentes padrões de moldagem que devem ser programados para atender à 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, os custos de estocagem, e as penalidades associadas ao desvio do volume de estoque em relação a níveis previamente definidos. A abordagem de solução proposta neste trabalho é baseada em um modelo de programação matemática para representar o problema.

Este artigo está organizado da seguinte forma. A segunda seção apresenta uma breve revisão de literatura, principalmente dos trabalhos que tratam dos 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, dos processos da fábrica que foi objeto do estudo de caso, bem como descreve os aspectos mais relevantes para o planejamento e programação da produção nesta indústria. A Seção 4 apresenta as considerações para a modelagem do problema e a formulação matemática proposta para representar as decisões envolvidas. A Seção 5 apresenta os resultados dos estudos computacionais realizados, assim como as comparações entre os planos de produção da fábrica objeto de estudo, e os planos obtidos através da

resolução do modelo. Finalmente algumas conclusões e perspectivas de trabalhos futuros são apresentadas.

2 Revisão bibliográfica

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 a minimização dos custos totais envolvidos (Karimi et al., 2003; Drexel & Kimms, 1997). Várias formulações clássicas e diferentes métodos aproximados têm sido utilizados para abordar os problemas de dimensionamento de lotes e programação da produção em diversos contextos industriais, por exemplo, na indústria de fumo (Pattloch et al., 2001); na indústria têxtil (Silva & Magalhães, 2006); na indústria de iogurtes (Marinelli et al., 2007); na indústria de bebidas (Toledo et al., 2007, 2009, 2011; Ferreira et al., 2008, 2009); na indústria de grãos eletrofundidos (Luche & Morabito, 2005; Luche et al., 2009); na indústria de nutrição animal (Toso & Morabito, 2005; Toso et al., 2008, 2009; Clark et al., 2010; Augusto et al., 2014); no setor de fundição (Araujo et al., 2004, 2007; Luche & Morabito, 2005); na indústria de vidro (Almada-Lobo et al., 2008); etc. Cada aplicação implica adaptações nos modelos da literatura para contemplar as diferentes configurações dos processos de produção e os diferentes ambientes de negócio, instigando o desenvolvimento de formulações alternativas e novas pesquisas. Além disso, em todos os trabalhos citados, os resultados gerados pelos modelos são competitivos com os resultados praticados pelas empresas.

Pattloch et al. (2001) tratam de um problema de planejamento da produção na indústria de fumo, com um ambiente de múltiplas máquinas paralelas idênticas para a produção de múltiplos produtos. Os autores propõem uma formulação matemática visando à minimização dos custos de *setup* envolvidos.

Silva & Magalhães (2006) estudam o dimensionamento de lotes e programação da produção em uma empresa 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, que consiste em permitir trocas entre lotes do mesmo tipo de produto por causa do desgaste das ferramentas.

Marinelli et al. (2007) abordam as decisões de dimensionamento e sequenciamento de lotes na indústria de iogurtes, propondo um modelo híbrido baseado nas formulações do CLSP e CSLP para os estágios de armazenagem e processamento, respectivamente.

Na indústria de bebidas Ferreira et al. (2012) considera o problema de dimensionamento de lotes e programação da produção em uma fábrica de refrigerantes.

O processo de produção compreende dois estágios: o primeiro relacionado com a produção do xarope nos tanques, e o segundo estágio relacionado com o engarrafamento do líquido nas linhas de produção. Os autores propõem quatro formulações monoestágio para abordar o problema de dois estágios sincronizados apresentados, baseados nos modelos clássicos GLSP com tempos e custos de *setup* dependentes da sequência e ATSP (*Asymmetric Travelling Salesman Problem*) com diferentes restrições de eliminação de *subtours*. Os resultados demonstram a superioridade dos modelos monoestágio em comparação com as formulações de dois estágios propostas em trabalhos anteriores (Ferreira et al., 2009), assim como a resolução rápida dos modelos baseados na formulação ATSP. Ainda no mesmo tipo de indústria, vários métodos aproximados foram explorados para este problema na indústria de bebidas, tais como estratégias de relaxação e decomposição (Ferreira et al. 2008, 2009), técnicas evolucionárias, algoritmos genéticos com múltiplas populações (Toledo et al., 2009) e algoritmos de Busca Tabu (Toledo et al., 2011).

Neste contexto, este trabalho apresenta uma aplicação dos problemas de dimensionamento de lotes e programação da produção na indústria de embalagens de polpa moldada. Nesta configuração produtiva, a produção das diferentes embalagens é realizada mediante a 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. A próxima seção descreve o sistema de produção e a utilização de padrões de moldagem para a produção das diferentes embalagens.

3 Caracterização da produção de embalagens em polpa moldada

O processo de produção de embalagens em polpa moldada pode ser subdividido em dois processos: o processo de moldagem, que envolve as etapas de formação de polpa, eliminação de impurezas, moldagem propriamente dita, secagem e prensagem; e o processo de estampagem que envolve as etapas de impressão, empacotamento e expedição. A Figura 1 ilustra as etapas envolvidas no processo de produção de embalagens em polpa moldada. Apesar de cada um destes processos envolver várias etapas, cada um deles pode ser considerado monoestágio em vista da continuidade do fluxo de material, da ausência de estoques intermediários, desde a primeira até a última etapa do processo de produção.

A primeira etapa do processo de produção é a formação da polpa. Nesta etapa, as matérias-primas, que consistem em aparas de diferentes tipos de papel, são misturadas com água e outros agentes químicos em um equipamento conhecido como *Hidra Pulper*, de modo que a polpa seja formada nas condições desejadas de cor, textura e umidade. Em seguida, a polpa passa por um sistema de purificação de massa, basicamente formado por um conjunto de peneiras vibratórias, que eliminam as impurezas mais grosseiras da polpa. Posteriormente, a massa segue para um tanque de armazenagem que supre a etapa de moldagem. Esta etapa é considerada a mais importante, pois é onde a fibra é moldada (Figura 1). Nesta etapa, a massa passa através de uma máquina que trabalha com dois rotores sincronizados, que dão a forma da embalagem desejada, por meio de operações de pressão e sucção do excesso de água. Nestes rotores, são acoplados ferramentais que contêm

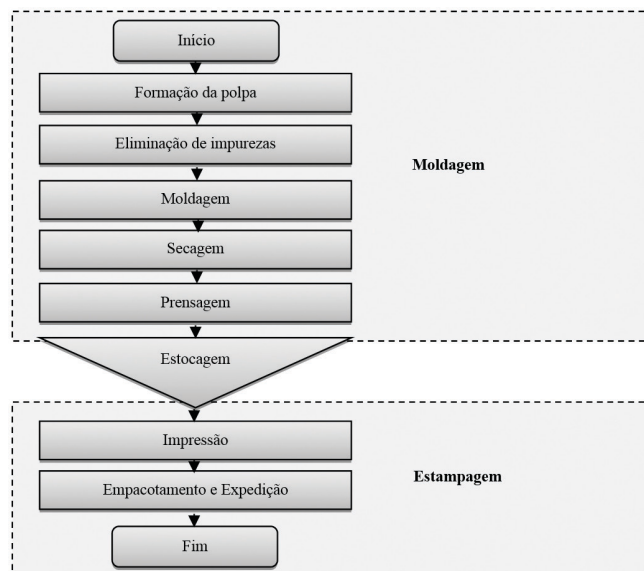


Figura 1. Fluxograma do processo de produção de embalagens em polpa moldada.

os moldes para a formação dos produtos, os quais são denominados “padrões de moldagem”. Cada padrão de moldagem pode conter moldes de um único tipo de produto, dois ou até três tipos diferentes.

Quando acoplado às máquinas de moldagem, cada padrão de moldagem pode produzir embalagens de diferentes tipos e com diferentes taxas de produção. Por exemplo, considerando a indústria de embalagens de polpa moldada para ovos, um mesmo padrão pode conter moldes para a produção de estojos de seis ovos e de doze ovos, implicando a produção simultânea de 105.000 unidades do primeiro tipo de produto, e 200.000 unidades do segundo, em uma hora de produção sob a configuração deste padrão.

Depois da etapa de moldagem, ocorre o processo de secagem (Figura 1). Nesta etapa, o material passa da esteira para uma estufa, na qual é aquecido entre 10 e 15 minutos em média, sendo submetido a temperaturas que variam entre 180 °C e 240 °C, dependendo das condições de umidade do material e do tipo de produto. Depois da secagem, as embalagens passam pela etapa de prensagem, cujo objetivo é propiciar um melhor acabamento e resistência ao produto, deixando-o apto para o processo de estampagem (Figura 1). Esta etapa é considerada a última do processo de moldagem, pois, ao término desta, as embalagens são estocadas, aguardando o processo de estampagem.

O processo de estampagem começa com a etapa de impressão (Figura 1). Nesta etapa, as embalagens recebem a impressão na parte superior externa e interna de acordo com o projeto definido previamente pelo cliente. Em seguida, estas embalagens são empacotadas e posteriormente expedidas para os clientes finais.

O planejamento e a programação da produção de embalagem moldada são realizados de forma separada para o processo de moldagem e para o processo de estampagem. O planejamento no processo de moldagem é realizado com base nas previsões de demanda para um horizonte de tempo determinado. Entretanto, o planejamento no processo de estampagem é baseado nas ordens diretas dos clientes, visto que depende das especificações destes para a personalização dos produtos.

Este trabalho aborda as decisões de planejamento e programação da produção somente no processo de moldagem, pois este representa o gargalo do sistema de produção e envolve vários elementos que dificultam as atividades de planejamento e programação da produção. O processo de moldagem envolve um sistema de linhas paralelas idênticas, nas quais podem ser acoplados qualquer um dos padrões de moldagem disponíveis para a produção dos produtos. As decisões de planejamento e programação da produção neste processo são: quais padrões de moldagem devem ser utilizados, quanto tempo cada linha de produção deve utilizar cada padrão de moldagem e em que sequência devem ser programados. Além disto, dois elementos

importantes devem ser considerados nas decisões de planejamento no processo de produção estudado: a necessidade de controle nos níveis de estoque e os tempos de preparação que são dependentes da sequência.

A produção em determinado período deve não apenas atender à demanda por produtos no período como também serve para manter níveis de estoque adequados de produtos para o processo de estampagem. Além disso, a produção simultânea de produtos diferentes por meio de padrões de moldagem que contêm mais de um tipo de molde afeta diretamente os níveis de estoques. Desta forma, os níveis de estoques devem ser controlados de modo a evitar a geração de grandes volumes de estoque de produtos de baixa demanda e evitar eventuais faltas de produtos de alta demanda. Portanto, níveis mínimos e máximos de estoques para cada produto são estabelecidos, e uma penalidade é associada às unidades em estoque fora destes limites.

As trocas entre os diferentes padrões de moldagem envolvem tempos e custos que são dependentes da sequência em que as trocas são programadas. Os tempos de troca variam entre 30 minutos e 48 horas, obedecem à desigualdade triangular e requerem a parada das linhas de produção. Já os custos de preparação são significativos e envolvem tanto o custo de oportunidade associado à parada das máquinas quanto o custo de mão de obra especializada da equipe de manutenção que realiza estas atividades.

Desta forma, o problema de planejamento na indústria de embalagens em polpa moldada envolve a escolha dos padrões de moldagem a serem utilizados, o tempo de produção de cada padrão e a sequência em que estes devem ser programados, considerando um sistema de linhas paralelas idênticas e tempos e custos de preparação dependentes da sequência. Estas decisões devem ser definidas de modo a minimizar os custos de estocagem, preparação e penalidades associadas ao desvio do volume do estoque em relação aos níveis estabelecidos para cada produto.

4 Modelagem do problema

A abordagem proposta para representar o problema de planejamento e programação da produção na indústria de embalagens moldadas é baseada nas formulações do Problema de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes Geral (GLSP) propostas por Meyr (2002) e Ferreira et al. (2012).

Para a modelagem do problema, são necessárias as seguintes considerações e pressupostos. Considera-se um sistema de linhas paralelas idênticas, que possuem igual características técnicas, taxas de produção e tempos de preparação. Assume-se que cada linha de produção dispõe de todos os tipos de moldes e, portanto, dos mesmos padrões de moldagem em qualquer instante de tempo, permitindo a preparação para um único padrão por vez. Cada período de tempo representa uma

semana do horizonte de planejamento. A capacidade disponível em cada período e as taxas de produção de cada padrão de moldagem são dadas em horas. Os tempos e custos de preparação são dependentes da sequência e obedecem à desigualdade triangular. O estado de preparação das linhas é preservado de um período para outro (*setup carry-over*) e, finalmente, existe uma penalidade associada às unidades em estoque fora dos níveis definidos para cada produto. Desta forma, o problema pode ser representado matematicamente como segue.

Índices

- k Tipos de produto
- i, j Padrões de conformação
- l Linhas de produção
- t Períodos de tempo
- s Microperíodos

Parâmetros

- N Número de padrões de moldagem disponíveis
- K Número de itens (tipos de produto)
- L Linhas de produção disponíveis
- T Períodos de tempo no horizonte de planejamento
- S Número total de microperíodos
- S_t Conjunto dos microperíodos pertencentes ao período t
- I_{k0} Nível de estoque do item k no início do horizonte de planejamento
- $I_{k(\min)}$ Nível de estoque mínimo para o item k
- $I_{k(\max)}$ Nível de estoque máximo para o item k
- h_k Custo de estocar uma unidade do item k por período
- α_k Penalidade por unidade de estoque do item k acima do nível máximo
- β_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} Unidades do item k obtidas a partir de padrão i (*unidades/hora*)
- st_{ij} Tempo de preparação requerido para configurar a linha do padrão i para o padrão j
- c_{ij} Custo de preparação envolvido na troca do padrão i para o padrão j
- M_{lit} Limitante superior para as horas de produção de cada padrão, em cada linha, e para cada período de tempo.

Variáveis de decisão

- x_{lis} Horas de produção da máquina l , sob a configuração do padrão i , nos microperíodos.
- y_{lis} Indica se a linha l está configurada para o padrão i no início dos microperíodos ($y_{lis}=1$), ou não ($y_{lis}=0$)
- Z_{lij} Indica se na linha l há troca do padrão i para o padrão j no início dos microperíodos ($Z_{lij}=1$), ou não ($Z_{lij}=0$)
- I_{kt} Unidades do item k estocadas ao final do período
- E_{kt} Unidades do item k acima do nível de estoque máximo
- E_{kt} Unidades do item k abaixo do nível de estoque mínimo

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

$$\sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K (\alpha_k E_{kt}^+ + \beta_k E_{kt}^-)$$

Sujeito a:

$$I_k = I_{k(t-1)} + \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^N \sum_{s \in S_t} p_{ki} x_{lis} - d_{kt} \quad (2)$$

$$\forall t = 1, \dots, T; k = 1, \dots, K$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{s \in S_t} x_{lis} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{s \in S_t} st_{ij} z_{lij} \leq Q_{lt} \quad (3)$$

$$\forall t = 1, \dots, T; l = 1, \dots, L$$

$$x_{lis} \leq M_{lit} y_{lis} \quad \forall l = 1, \dots, L; i = 1, \dots, N; s = 1, \dots, S; t = 1, \dots, T \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N y_{lis} = 1 \quad \forall l = 1, \dots, L; s = 1, \dots, S \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^N z_{lij} \leq y_{ljs} \quad \forall l = 1, \dots, L; j = 1, \dots, N; s = 1, \dots, S \quad (6)$$

$$y_{li(s-1)} = \sum_{j=1}^N z_{lij} \quad \forall l = 1, \dots, L; i = 1, \dots, N; s = 1, \dots, S \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^N z_{lij} = y_{lis} \quad \forall l = 1, \dots, L; i = 1, \dots, N; s = 1, \dots, S \quad (8)$$

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

$$I_{kt} + E_{kt}^- - E_{kt}^+ \leq I_{k(\max)} \quad \forall k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T \quad (10)$$

$$I_{kt}, x_{lis}, E_{kt}^+, E_{kt}^- \geq 0; y_{lis}, z_{lij} \in \{0, 1\} \quad (11)$$

$$\forall i, j = 1, \dots, N; l = 1, \dots, L; k = 1, \dots, K; s = 1, \dots, S; t = 1, \dots, T$$

A função objetivo (1) visa à minimização dos custos representativos do sistema de produção envolvidos,

que consistem nos custos de estocagem na primeira parcela, custos de preparação dependentes da sequência na segunda parcela, além das penalidades associadas às unidades acima e abaixo das metas de estoque.

As restrições (2) correspondem às restrições de balanceamento de estoques, que relacionam as unidades produzidas de cada produto, sua demanda e níveis de estoque. Diferentemente das formulações clássicas para o problema de dimensionamento de lotes, a quantidade (lote) de produto é obtida de forma fracionada, pela relação entre as horas de utilização de cada padrão em cada linha e a taxa de produção desses padrões em relação ao produto considerado. Desta forma, não existe um único lote de produto, porém existe um único lote de processo, representado pelas horas de utilização de cada padrão de moldagem em particular.

As restrições (3) referem-se ao consumo de capacidade em cada linha e em cada período do horizonte de planejamento. Note que, a capacidade de cada linha é consumida pelas horas de produção de cada padrão de moldagem utilizado e pelos tempos de preparação que são dependentes da sequência de troca entre diferentes padrões.

As restrições (4) garantem que um padrão de moldagem possa ser utilizado, somente se, a linha estiver configurada para esse padrão nesse microperíodo. Levando em conta que não são permitidos *backlogs*, caso o padrão i seja utilizado, o número de horas máximo que este pode utilizar em cada linha e em cada período pode ser obtido pela expressão (12).

$$M_{lit} = \min \left\{ Q_{li}, \max_{k: p_k \neq 0} \frac{\sum_{h=t}^T d_{kh}}{p_{ki}} \right\} \quad (12)$$

$$\forall l=1, \dots, L; i=1, \dots, N; t=1, \dots, T$$

As equações (12) indicam que, o limite de utilização de cada padrão de moldagem i , em cada na linha l e período t é o valor mínimo entre a capacidade da linha nesse período, e o tempo de produção do padrão i requerido para o atendimento da demanda remanescente de todos os itens que podem ser obtidos por meio dele. Considere, por exemplo, que o padrão i produz 20.000 unidades/hora do produto A e 30.000 unidades/hora do produto B, simultaneamente. Além disso, considere que a capacidade na linha l no período t é de 168 horas e existe uma demanda remanescente de 500.000 unidades de A e 1.000.000 de unidades de B. Desta forma, o limitante $M_{lit} = \min \left\{ 168, \max \left\{ \frac{500.000}{20.000}, \frac{1.200.000}{30.000} \right\} \right\}$. Ou seja, o padrão i será utilizado no máximo durante 40 horas de produção na linha l no período t .

As restrições (5) garantem que cada linha esteja configurada para um único padrão de moldagem em cada microperíodo de tempo. As restrições (6) relacionam os estados de preparação de cada microperíodo, com as variáveis de troca. As restrições (7) e (8) garantem o fluxo de configurações das linhas de produção, e a preservação do estado de preparação entre os microperíodos e os períodos de tempo.

As desigualdades (9) e (10) contabilizam para cada item, e em cada período de tempo, as unidades abaixo do nível mínimo definido e as unidades acima do nível máximo estabelecido, correspondentemente. Observe que a quantidade total de cada produto mantida em estoque é contabilizada apenas pela variável I_{kt} , entretanto a variável E_{kt} indica quantas unidades do estoque estão acima do nível máximo estabelecido, e E_{kt} indica o desvio do volume estocado (em unidades), em relação ao nível mínimo definido.

Finalmente, as expressões (11) definem o domínio das variáveis. O número de horas de produção de cada padrão de moldagem é considerado como uma variável positiva, embora isto não garanta que o volume produzido de cada item seja uma quantidade inteira. Esta é uma aproximação aceitável no sistema de produção estudado devido aos grandes volumes de produção manipulados e à definição de níveis mínimos de estoque para cada produto.

5 Experimentos computacionais

Todos os experimentos computacionais realizados para a validação e avaliação do desempenho da abordagem proposta foram realizados na linguagem matemática GAMS (*Generic Algebraic Modeling System*) versão 22.6, com o *solver* CPLEX versão 11.0, em um processador Intel Core i7-2600, 3.40GHz e 16 GB de memória RAM. Os experimentos realizados compreendem o estudo de exemplares do problema real: primeiramente foi utilizado um exemplar em particular, a partir do qual são realizadas comparações detalhadas entre os planos de produção obtidos a partir da resolução do modelo e do plano de produção praticados na fábrica estudada. Depois desta comparação, foram realizados experimentos computacionais com um conjunto de 12 exemplares reais que permitem avaliar o comportamento do modelo. Finalmente, foram feitos estudos computacionais com exemplares aleatórios.

Inicialmente foi considerado um exemplar em particular, do qual se dispõe de informações detalhadas sobre o plano de produção definido por uma fábrica representativa da indústria estudada. Este exemplar permite a comparação detalhada entre as soluções providenciadas pela abordagem proposta e o planejamento atual do sistema de produção considerado. Neste contexto, além dos parâmetros

envolvidos na representação do modelo, também foram considerados os estados de preparação inicial das linhas de produção e as manutenções programadas ao longo do horizonte de planejamento. O tempo de execução para a resolução foi limitado a 3 horas, foram considerados 4 micropéridos por período de tempo, pois é o número máximo de trocas que a empresa admite.

O resultado do primeiro experimento com o modelo GLSP gerou um plano de produção que define qual padrão de moldagem deve ser usado por quanto tempo, de forma a atender à demanda sem atrasos. A Tabela 1 apresenta os resultados gerados pelo modelo GLSP em relação ao consumo de capacidade e tempo dedicado às operações de *setup* e a comparação dos mesmos resultados com o plano de produção da fábrica. A Tabela 2 apresenta informações relacionadas ao volume total produzido ao longo do horizonte de planejamento (considerando todos os tipos de produtos), o volume total em estoque ao final do horizonte, e as unidades totais fora dos níveis de estoque estabelecidos.

Note que as principais vantagens do plano de produção obtido por meio do modelo proposto, em relação ao plano de produção da fábrica objeto de estudo, evidenciam-se no aproveitamento da capacidade, a redução do tempo dedicado às operações de troca entre os padrões e o controle dos níveis de estoque. O modelo GLSP propõe um plano de produção que utiliza menor capacidade que o plano de produção da fábrica (aproximadamente 8% a menos), ao mesmo tempo que reduz aproximadamente 9 horas do tempo dedicado às operações de preparação das linhas. Estes tempos de preparação, embora representem uma pequena proporção em relação ao tempo de produção total, têm um impacto significativo nos custos totais, em vista do alto custo por hora de preparação.

Observe que o modelo GLSP propõe um plano de produção que atende totalmente à demanda, sem atrasos, entretanto o plano da fábrica apresenta um volume de 811.058 unidades no final do horizonte planejamento. Isto evidencia a dificuldade enfrentada pelos decisores para ajustar as quantidades produzidas e gerar planos de produção coerentes com as previsões de demanda. De modo geral, o modelo proposto gera planos de produção que incorrem em um volume de produção menor que o plano de produção da fábrica, ao mesmo tempo que apresenta um menor volume de estoque ao final do horizonte de planejamento. Da mesma forma, o plano de produção do modelo GLSP controla de forma melhor os níveis de estoque ao término do horizonte de planejamento, sendo que, no plano de produção da fábrica, 43,54% do volume total em estoque encontra-se fora dos níveis estabelecidos ao final do horizonte, entretanto os resultados do modelo sugerem um plano de produção em que somente 25,42% do volume em estoque encontra-se fora das metas definidas.

As vantagens dos planos de produção obtidos pela resolução dos modelos também estão refletidas nos custos envolvidos. A Figura 2 apresenta os custos totais dos planos de produção estudados.

Observe que o plano de produção do GSLP pode reduzir os custos totais do plano de produção da fábrica em aproximadamente 35,96%. Os custos mais significativos do processo de produção são os custos de preparação e os custos de estocagem. Nesse sentido, observe que o modelo GLSP sugere um plano de produção cujo custo de preparação ao longo de horizonte é aproximadamente 27,08% menor que os custos de preparação sugeridos pelo plano de produção da fábrica. Da mesma forma, os custos de estocagem resultam aproximadamente 33,10% menores que os indicados no plano de produção da fábrica.

Tabela 1. Consumo de capacidade e tempos totais de *setup* nos planos de produção da fábrica e do modelo GLSP.

PLANO DE PRODUÇÃO	CONSUMO DE CAPACIDADE E TEMPO DEDICADO ÀS OPERAÇÕES DE <i>SETUP</i>			
	Linha 1	Linha 2	Linha 3	Total do sistema de produção
FÁBRICA	100% (5,5 h)	100% (20 h)	100% (10,5 h)	100% (36 h)
MODELO GLSP	97,34% (5,5 h)	94,91% (2 h)	85,88%(11,5 h)	92,47% (27 h)

Tabela 2. Comparações dos principais elementos dos planos de produção da fábrica e do modelo GLSP.

ELEMENTOS DOS PLANOS DE PRODUÇÃO	FÁBRICA	Modelo GLSP
Volume total produzido (unidades)	16.157.858	14.952.093
Nível de estoque ao final do horizonte (unidades)	4.579.267	2.562.202
Volume em atraso ao final do horizonte (unidades)	811.058	0
Unidades em estoque acima do nível máximo de estoque no final do horizonte	1.521.469	575.611
Unidades em estoque abaixo do nível mínimo de estoque no final do horizonte	472.375	75.850

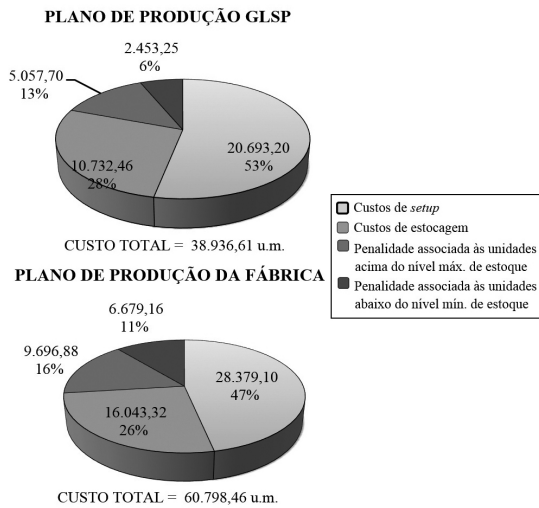


Figura 2. Custos totais dos planos de produção da fábrica e do modelo GLSP.

Finalmente, as penalidades associadas ao volume de produto em estoque fora das metas estabelecidas também são reduzidas no plano de produção indicado pelo modelo GLSP, como esperado ao analisar o volume de produto em estoque fora dos níveis estabelecidos (metas).

A fim de avaliar o desempenho computacional do modelo na resolução de exemplares reais, foram realizados experimentos considerando 12 instâncias compostas por informações do sistema de produção de uma fábrica de embalagens moldadas para acondicionamento de ovos e frutas. Estas instâncias envolvem dados reais relacionados com o número de itens fabricados, número de padrões de moldagem disponíveis, taxas de produção dos padrões de moldagem, conforme apresentados na Tabela 3, níveis de estoque iniciais, custos de preparação e estoques, entre outros parâmetros necessários para a representação e solução do problema por meio do modelo matemático.

As instâncias utilizadas representam dados de diferentes meses, ao longo de um horizonte de tempo. Cada exemplar representa quatro períodos, ou seja, quatro semanas, nas quais três linhas de produção estão disponíveis 24 horas por dia, sete dias por semana. Foram considerados também quatro micropériosodos por período de tempo, baseados na indicação dos responsáveis do planejamento da produção em relação ao número máximo de trocas desejáveis por semana, ou seja, em cada período de tempo. Cada exemplar contém informação sobre previsões de demanda e níveis de estoque iniciais para a produção de 14 produtos (conforme apresentado na Tabela 4), os quais podem ser obtidos a partir de um conjunto de 19 padrões de moldagem. Demais

informações e dados relacionados com os exemplares reais encontram-se em Martínez (2013).

A Tabela 5 apresenta os resultados do modelo proposto para o conjunto de exemplares considerados, após 3 horas de execução. Nesta tabela, mostra-se a solução incumbente encontrada ao término do tempo de execução, o melhor limitante, o *gap* dado pelo CPLEX, o tempo de execução e o tempo aproximado em que a solução incumbente foi encontrada.

Observe que, de modo geral, foi possível achar uma solução factível para todos os exemplares testados. No entanto, o comportamento do modelo em relação à resolução dos exemplares e às soluções obtidas não apresenta um padrão definido.

Em particular, note que a metade dos exemplares testados foi resolvida de forma ótima, envolvendo tempos computacionais que variam desde 1 minuto até aproximadamente 1 hora e meia de execução. Entre os exemplares que não foram resolvidos de forma ótima, obtiveram-se soluções com *gap* não superior a 6,32%. Entretanto, os exemplares 1 e 10 foram mais difíceis de resolver, resultando em soluções com *gap* de 64,45% e 24,20%, respectivamente, após 3 horas de execução. Observe a partir da última coluna da Tabela 5 que, de modo geral, o modelo consegue boas soluções nos primeiros minutos de execução na maioria dos exemplares. Assim, apesar dos exemplares serem do mesmo tamanho, o desempenho computacional varia consideravelmente de um exemplar para outro.

Para uma análise mais completa em relação ao desempenho da abordagem proposta para o problema em estudo, foram realizados experimentos computacionais sobre um conjunto de exemplares aleatórios. Os conjuntos de dados foram gerados com base em Haase (1996) e Fleischmann & Meyr (1997) e consistem em quatro grupos de diferente tamanho, os quais variam entre cada um com dez exemplares. As características dos exemplares gerados aleatoriamente são apresentadas na Tabela 6, e os resultados obtidos para cada conjunto são apresentados na Tabela 7.

Note que os exemplares gerados aleatoriamente são de tamanho menor que os exemplares reais providenciados pela fábrica em estudo. Os resultados destes estudos computacionais mostram que a abordagem baseada no GLSP fornece soluções factíveis para todos os exemplares dos diferentes grupos. No entanto, percebe-se que o modelo resolve de forma ótima a maioria dos exemplares dos grupos de menor tamanho (Grupo 1 e Grupo 2), os quais possuem somente 6 padrões de moldagem, 4 tipos de produtos, 5 períodos de tempo e 2 linhas de produção. Já quando o número de padrões é aumentado para 10 e o número de produtos para 6, o modelo apresenta dificuldade em resolver os exemplares de forma ótima, conseguindo soluções com *gap* significativo que podem superar 50%.

Tabela 3. Taxas de produção de cada padrão de moldagem em relação aos produtos (unidades de produto/hora).

Produtos	Padrões de moldagem																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	8.791	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7.326	5.862	0	0	7.326	5.862	0	0	4.395
2	0	8.791	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	8.791	0	0	0	0	0	4.395	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	8.791	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	8.791	0	0	0	0	7.326	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	8.791	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	8.791	4.395	0	0	0	0	7.326	5.862	0	0	7.326	5.862	0
8	0	0	0	0	0	0	0	3.295	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	3.295	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.465	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.465	2.929	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.465	2.929	0	0	0	0	0	0	1.465
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.465	2.929	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.465	2.929	0	0	2929

É importante ressaltar que, para o conjunto de exemplares aleatórios, o número de microperíodos por período de tempo foi aproximado ao número de padrões de moldagem disponíveis, ou seja, o número total de microperíodos $S = N * T$. No entanto, no conjunto de 12 exemplares reais apresentados na Tabela 5, foram considerados 4 microperíodos por período de tempo, ou seja, o número total de microperíodos $S = 4 * T$. Isto nos permite afirmar

que o modelo GLSP apresenta um desempenho computacional satisfatório para aqueles exemplares representativos do sistema real, em que o número de microperíodos foi definido com base na experiência prática do pessoal diretamente envolvido com o sistema de produção. No entanto, é evidente que o comportamento do modelo proposto depende em grande medida do número de microperíodos atribuídos por períodos de tempo, o qual representa

Tabela 4. Níveis de estoque inicial de cada produto, para cada exemplar considerado.

Produtos	Ex. 1	Ex. 2	Ex. 3	Ex. 4	Ex. 5	Ex. 6	Ex. 7	Ex. 8	Ex. 9	Ex. 10	Ex.11	Ex.12
1	288.543	530.620	527.890	487.323	500.242	346.987	456.231	345.280	657.987	768.945	921.865	698.627
2	144.010	1.498.168	1.143.836	1.484.517	1.605.017	1.629.929	747.670	345.238	105.768	42.862	183.053	59.064
3	126.782	1.310.897	1.000.847	1.944.050	759.292	1.426.188	29.701	302.083	350.587	295.544	211.700	631.584
4	36.052	374.542	285.956	186.815	216.941	38.855	353.584	252.976	82.521	66.794	339.794	447.509
5	360.569	213.356	1.151.031	159.621	460.872	523.153	458.681	1.236.914	269.614	112.348	350.025	717.061
6	54.655	561.813	428.935	833.164	325.411	334.753	806.847	655.935	123.781	100.191	31.243	488.508
7	198.627	117.346	633.067	87.792	1.267.205	287.734	56.000	484.028	357.503	271.007	54.495	309.662
8	36.766	23.560	12.489	68.978	53.567	39.878	23.458	89.712	23.678	18.542	177.850	38.380
9	20.577	15.679	15.679	296.878	29.678	296.878	12.879	12.879	10.076	10.076	10.173	10.173
10	45.349	40.567	35.321	56.789	49.987	42.234	78.654	67.543	47.851	37.823	31.005	163.724
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	97.856	196.754	249.445	316.246	250.787	319.978	352.397	263.872	325.925	314.602	179.125	48.305
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	188.724	327.924	415.742	527.077	417.978	533.296	587.329	439.787	543.209	524.337	491.431	88.137

Tabela 5. Desempenho computacional do modelo GLSP.

Exemplar	Solução incumbente (u.m)	Melhor limitante (u.m.)	Gap	Tempo de execução (seg.)	Tempo aproximado em que a solução incumbente foi encontrada (seg.)
1	71.568,38	26.872,47	62,45%	10.801,2	6.971,4
2	22.562,54	22.562,54	0,0%	118,7	90
3	19.325,65	19.325,66	0,0%	5.856,9	3.858
4	38.031,73	38.031,73	0,0%	433,5	301,2
5	23.882,86	23.882,86	0,0%	2.277,3	2.250
6	36.290,37	35.485,97	2,27%	10.801,5	4.980
7	35.718,47	35.445,11	0,77%	10.802,2	3.610,8
8	20.432,04	20.432,04	0,0%	1.591	390
9	31.554,20	29.783,99	5,61%	10.800,9	3.780
10	25.568,23	19.379,25	24,20%	10.801,4	6.024
11	20.476,83	20.476,83	0,0%	6.362	1.044
12	26.727,71	25.037,12	6,32%	10.801,1	1.022,4

Tabela 6. Características dos exemplares gerados aleatoriamente.

Grupo	Número de instâncias	Número de padrões de moldagem (N)	Número de produtos (K)	Número de períodos de tempo (T)	Número de linhas de produção (L)	Porcentagem esperada de utilização da capacidade (U)
1	10	6	4	5	2	80%
2	10	6	4	5	2	90%
3	10	10	6	5	2	80%
4	10	10	6	5	2	90%

Tabela 7. Resultados da abordagem GLSP sobre um conjunto de exemplares aleatórios.

Ex	GRUPO 1			GRUPO 2			GRUPO 3			GRUPO 4		
	Solução incumbente	Gap	Tempo (seg.)	Solução incumbente	Gap	Tempo (seg.)	Solução incumbente	Gap	Tempo (seg.)	Solução incumbente	Gap	Tempo (seg.)
1	700,45	18%	10.800	2.104,85	0%	126,2	2.041,95	39,30%	10.800	2.515,33	0%	10.072,04
2	1.098,81	0%	1.588,6	911,15	18,73%	10.800	1.401,08	37,23%	10.800	1.334,64	0%	10.800
3	740,15	37,17%	10.800	747,71	0%	10.010,7	1.738,88	55,80%	10.800	1.317,4	48,13%	10.800
4	648,11	0%	8.266,8	866,91	0%	63,6	1.442,77	52,00%	10.800	3.175,61	8,39%	10.800
5	742,64	0%	2.568,4	547,43	0%	707,3	1.52,04	57,58%	10.800	3.735,91	7,79%	10.800
6	731,22	17,88%	10.800	814,62	0%	147,8	1.859,39	26,24%	10.800	1.881,17	34,36%	10.800
7	711,24	0%	455,7	532,90	0%	2.219,3	1.530,67	27,09%	10.800	1.425,6	49,22%	10.800
8	799,22	0%	10.800	759,16	12,11%	10.800	1.817,05	28,59%	10.800	1.456,23	48,69%	10.800
9	1.184,36	0%	532,9	877,97	0%	3.206,9	1.433,98	51,20%	10.800	1.465,82	28,97%	10.800
10	749,89	0%	794,7	899,28	0%	6.943,5	1.402,48	30,15%	10.800	1.878,77	29,20%	10.800

uma decisão determinada *a priori*, que pode ser determinada empiricamente (por meio de informações providenciadas por pessoal diretamente envolvido) ou experimentalmente (parametrização do modelo).

6 Conclusões e perspectivas futuras

Neste trabalho, estudou-se o problema de planejamento e programação da produção na indústria de embalagens moldadas, estudando particularmente o sistema de produção de uma fábrica brasileira de embalagens moldadas para acondicionamento de ovos e frutas. As decisões de planejamento estão relacionadas como o dimensionamento e sequenciamento de lotes de processos, envolvendo a escolha de padrões de moldagem, o tempo de produção destes e a forma como devem ser sequenciados. Para representar estas decisões, foi proposto um modelo baseado no Problema de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes Geral (GLSP).

O modelo proposto foi testado considerando exemplares reais representativos do sistema de produção da fábrica em estudo, cujos resultados mostraram que a abordagem é capaz de fornecer soluções factíveis e coerentes em um limite de tempo de 3 horas, sendo que 50% destes exemplares foram resolvidos de forma ótima e, em aproximadamente 33% deles, foram encontradas soluções com *gap* inferior a 10%. No entanto, o desempenho computacional satisfatório do modelo é influenciado diretamente pela escolha do número de microperíodos por período de tempo, o qual foi definido com base na experiência empírica do pessoal diretamente envolvido com o planejamento da produção na fábrica estudada. Assim, estes resultados instigam o estudo de formulações alternativas que independam de parâmetros subjetivos no modelo, de modo que os resultados possam ser generalizados para diferentes conjuntos de exemplares, e sejam obtidas soluções de melhor qualidade.

O plano de produção obtido a partir do modelo proposto foi comparado com o plano de produção definido pela fábrica em estudo, para um exemplar

em particular. Evidenciou-se que o atendimento total da demanda sem atrasos resulta em um desafio para os responsáveis pelo planejamento da fábrica. Demonstrou-se, no entanto, que é possível gerar um plano de produção que atenda totalmente à demanda, que, por sua vez, apresenta vantagens relacionadas a menor consumo de capacidade, redução dos tempos envolvidos nas operações de *setup* e melhor controle dos níveis de estoque. Assim, as vantagens do plano de produção sugerido pelo modelo proposto são evidenciadas também nos custos mais importantes do processo de produção, incorrendo em uma redução de aproximadamente 35,96% dos custos totais, 27,08% dos custos de *setup* e aproximadamente 33,10% dos custos de estocagem.

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 Corporação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) o apoio; e à Sanovo Greenpack Embalagens do Brasil Ltda. a colaboração e disposição durante o desenvolvimento deste trabalho.

Referências

- Almada-Lobo, B., Oliveira, J. F., & Carravilla, M. A. (2008). Production planning and scheduling in the glass container industry: AVNS approach. *International Journal of Production Economics*, 114(1), 363-375. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.02.052>.
- Araujo, S. A., Arenales, M. N., & Clark, A. R. (2004). Dimensionamento de lotes e programação do forno numa fundição de pequeno porte. *Gestão & Produção*, 11(2), 165-176. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-530X2004000200003>.
- Araujo, S. A., Arenales, M. N., & Clark, A. R. (2007). Joint rolling-horizon scheduling of materials processing and lot-sizing with sequence-dependent setups. *Journal of Heuristics*, 13(4), 337-358. <http://dx.doi.org/10.1007/s10732-007-9011-9>.

- Associação Brasileira de Embalagens – ABRE (2014). *Associação Brasileira de Embalagem apresenta balanço do setor*. Recuperado em 14 de março de 2014, de www.abre.org.br
- Augusto, D. B., Alem, D., & Toso, E. A. V. (2014). Planejamento agregado na indústria de nutrição animal sob incertezas. *Produção*. In press.
- Clark, A., Morabito, R., & Toso, E. A. V. (2010). Production setup-sequencing and lot-sizing at an animal nutrition plant through ATSP subtour elimination and patching. *Journal of Scheduling*, 13(2), 111-121. <http://dx.doi.org/10.1007/s10951-009-0135-7>.
- Drexl, A., & Kimms, A. (1997). Lot sizing and scheduling - Survey and extensions. *European Journal of Operational Research*, 99(2), 221-235. [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00030-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00030-1).
- Ferreira, D., Clark, A. R., Almada-Lobo, B., & Morabito, R. (2012). Single-stage formulations for synchronised two-stage lot sizing and scheduling in soft drink production. *International Journal of Production Economics*, 136(2), 255-265. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.11.028>.
- Ferreira, D., França, P. M., Kimms, A., Morabito, R., Rangel, S., & Toledo, C. F. M. (2008). 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*, 128, 169-210. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-78985-7_8.
- Ferreira, D., Morabito, R., & Rangel, S. (2009). Solution approaches for the soft drink integrated production lot sizing and scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 196(2), 697-706. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2008.03.035>.
- Fleischmann, B., & Meyr, H. (1997). The general lotsizing and scheduling problem. *Operation Research Spektrum*, 19(1), 11-21.
- Haase, K. (1996). Capacitated lot-sizing with sequence dependent setup costs. *Operation Research Spektrum*, 18(1), 51-59. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01539882>.
- Karimi, B., Ghomi, S. M. T. F., & Wilson, J. M. (2003). The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms. *Omega*, 31(5), 365-378. [http://dx.doi.org/10.1016/S0305-0483\(03\)00059-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0305-0483(03)00059-8).
- Luche, J. R. D., & Morabito, R. (2005). Otimização na programação da produção de grãos eletrofundidos: um estudo de caso. *Gestão & Produção*, 12(1), 135-149.
- Luche, J. R. D., Morabito, R., & Pureza, V. (2009). Combining process selection and lot sizing models for production scheduling of electrofused grains. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 26(3), 421-443.
- Marinelli, F., Nenni, M. E., & Sforza, A. (2007). Capacitated lot sizing and scheduling with parallel machines and shared buffers: A case study in a packaging company. *Annals of Operations Research*, 150(1), 177-192. <http://dx.doi.org/10.1007/s10479-006-0157-x>.
- Martínez, K. Y. P. (2013). *Planejamento da produção na indústria de embalagens de polpa moldada* (Dissertação de mestrado). Departamento de Engenharia de Produção – Sorocaba, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba.
- Meyr, H. (2002). Simultaneous lotsizing and scheduling on parallel machines. *European Journal of Operational Research*, 139(2), 277-292. [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00373-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00373-3).
- Pattloch, M., Schmidt, G., & Kovalyov, M. Y. (2001). Heuristic algorithms for lotsize scheduling with application in the tobacco industry. *Computers & Industrial Engineering*, 39(3-4), 235-253. [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-8352\(01\)00004-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-8352(01)00004-3).
- Pereira, P. Z., & Silva, R. P. (2010). Design de Embalagens e Sustentabilidade: uma análise sobre os métodos projetuais. *Design & Tecnologia*, 1(2), 29-43.
- Silva, C., & Magalhaes, J. M. (2006). Heuristic lot size scheduling on unrelated parallel machines with applications in the textile industry. *Computers & Industrial Engineering*, 50(1-2), 76-89. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2006.01.001>.
- Toledo, C. F. M., Arantes, M. D., & França, P. M. (2011). Tabu search to solve the synchronized and integrated two-level lot sizing and scheduling problem. *Memorias de Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*, 13, 443-448.
- Toledo, C. F. M., França, P. M., Morabito, R., & Kimms, A. (2007). Um modelo de otimização para o problema integrado de dimensionamento de lotes e programação da produção em fábrica de refrigerantes. *Pesquisa operacional*, 17(1), 155-186.
- Toledo, C. F. M., França, P. M., Morabito, R., & Kimms, A. (2009). Multi-population genetic algorithm to solve the synchronized and integrated two-level lot sizing and scheduling problem. *International Journal of Production Research*, 47(11), 3097-3119. <http://dx.doi.org/10.1080/00207540701675833>.
- Toso, E. A. V., & Morabito, R. (2005). Otimização no dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção: estudo de caso numa fábrica de rações. *Gestão & Produção*, 12(2), 203-217.
- Toso, E. A. V., Morabito, R., & Clark, A. (2008). Combinação de abordagens GLSP e ATSP para o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes na produção de suplementos para nutrição animal. *Pesquisa Operacional*, 28(3), 423-450. <http://dx.doi.org/10.1590/S0101-74382008000300003>.
- Toso, E. A. V., Morabito, R., & Clark, A. R. (2009). Lot sizing and sequencing optimization at an animal-feed plant. *Computers & Industrial Engineering*, 57(3), 813-821. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2009.02.011>.