

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - PPGEPS

KARIM YANETH PÉREZ MARTÍNEZ

**PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO NA INDÚSTRIA DE EMBALAGENS EM
POLPA MOLDADA**

Sorocaba
2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - PPGEPS

KARIM YANETH PÉREZ MARTÍNEZ

**PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO NA INDÚSTRIA DE EMBALAGENS EM
POLPA MOLDADA**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos - *Campus* Sorocaba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientadora: Profa. Dra. Eli Angela Vitor Toso

Financiamento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES.

Sorocaba
2013

P438p Pérez Martinez, Karim Yaneth
Planejamento e programação da produção na indústria de embalagens em polpa moldada / Karim Yaneth Pérez Martinez. -- Sorocaba, 2013.
123 f. : il. (color.) ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, *Campus* Sorocaba, 2013.

Orientador: Eli Angela Vitor Toso

Banca examinadora: Reinaldo Morabito Neto, Silvio Alexandre de Araujo, Douglas José Alem Junior

Bibliografia

1. Planejamento da produção. 2. Administração da produção. 3. Embalagens - indústria. I. Título. II. Sorocaba - Universidade Federal de São Carlos.

CDD 658.5038

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do *Campus* de Sorocaba.

KARIM YANETH PÉREZ MARTÍNEZ

**"PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO NA INDÚSTRIA DE
EMBALAGENS EM POLPA MOLDADA"**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Centro de Ciências e Tecnologias para a Sustentabilidade da Universidade Federal de São Carlos para obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção, Área de Concentração: Gestão de Operações.

Sorocaba, 27 de setembro de 2013

Orientador (a):

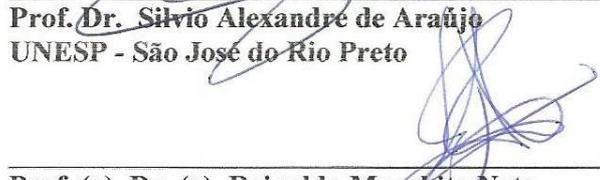


Prof. (a). Dr. (a). Eli Angela Vitor Toso
DEPS/UFSCar

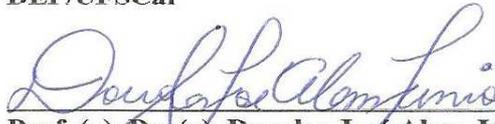
Examinadores (as):



Prof. Dr. Silvío Alexandre de Araújo
UNESP - São José do Rio Preto



Prof. (a). Dr. (a). Reinaldo Morabito Neto
DEP/UFSCar



Prof. (a). Dr. (a). Douglas José Alem Júnior
DEPS/UFSCar

*Aos meus queridos pais Argelio e Yarlys, e meus
irmãos Key e Luis.
O resultado desta experiência o dedico a vocês com
todo meu amor.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todas as oportunidades e pessoas especiais colocadas no meu caminho.

À minha orientadora Eli, quem muitas vezes foi também conselheira, amiga e mãe. Muito obrigada pela confiança, orientação, carinho e amizade. Sem dúvida, uma das pessoas mais admiráveis que já conheci.

A Adriano e Fernando, funcionários da Sanovo Greenpack, pela disposição e colaboração durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - Sorocaba, em especial à Erica pela colaboração, disposição e boa vontade sempre.

Aos professores da graduação Jota e Helman que me motivaram nos primeiros passos desta carreira acadêmica.

À CAPES- Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – pela bolsa de mestrado, sem a qual este trabalho não teria sido realizado.

Às pessoas que fizeram possível a minha vinda ao Brasil e me ajudaram no início deste caminho. Especialmente ao Prof. José Geraldo e à sua esposa Rosane pela disposição, confiança e recebimento.

Ao Pedro pela, força e companhia, especialmente nos objetivos e decisões compartilhadas. Muito obrigada pela iniciativa e incentivo nesta experiência.

Às amigas que surgiram ao longo do mestrado, Natália, Maritha, Nadya, Renata, Arthur, Diego e Alê. Especialmente às meninas pelas conversas e cafés da tarde com pão de queijo. Todos vocês fizeram mais feliz a minha vida longe de casa.

Ao Harlem pelo carinho, apoio e paciência desde o início desta amizade. Muito obrigada por me escutar sempre, pelas risadas e pelos bons momentos apesar da distância.

À minha família, meu maior presente, pela confiança, força e carinho que me fortaleceram para fazer o melhor de mim. Aos meus primos e tios sempre presentes em todos os momentos. Vocês enchem a minha vida de alegria e felicidade. Amo vocês.

Às pessoas queridas que já não estão mais na nossa família, mas sempre estarão nos nossos corações. Ao meu avô Alfredo (in memoriam) e à minha tia Oti (in memoriam), que sem dúvida, ficariam muito felizes em momentos como este.

Aos meus queridos amigos e amigas na Colômbia que sempre torceram por mim. Muito obrigada pela força, amizade e compreensão neste tempo de ausência. Especialmente aos meus amigos Leo e Adrian, por me fazer sentir que a nossa amizade não muda apesar da distância.

Ninguém vence sozinho. Muito obrigada a todos vocês!

RESUMO

PÉREZ, Karim Y. M. *Planejamento da produção na indústria de embalagens em polpa moldada*. 2013. 121f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Centro de Ciências e Tecnologias para a Sustentabilidade, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2013.

Este trabalho aborda o problema de planejamento e programação da produção na indústria de embalagens em polpa moldada, considerando particularmente uma fábrica de embalagens para acondicionamento de ovos. O processo de produção pode ser subdividido em dois processos: processo de moldagem e processo de estampagem. O principal desafio para as atividades de planejamento encontra-se no processo de moldagem, em que a obtenção dos produtos depende da utilização de diferentes ferramentais, formados por um conjunto de moldes. Estes ferramentais são chamados de “padrões de conformação” ou “padrões de moldagem”, e podem conter um, dois ou até três tipos de moldes, permitindo a produção simultânea de produtos diferentes. Esta produção simultânea de itens pode gerar grandes níveis de estoque de produtos de baixa demanda e estoques nulos para produtos de alta demanda, desta forma, são definidos diferentes níveis de estoque para cada produto com base no comportamento da sua demanda. As decisões envolvidas no planejamento e programação da produção neste tipo de processo 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. Para representar o problema são propostas dois tipos de formulações: a primeira baseada no Problema de Dimensionamento de Lotes Capacitado (CLSP), e a segunda baseada no Problema de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes Geral (GLSP). Os resultados da resolução dos modelos são comparados com base em exemplares reais da fábrica em estudo, a fim de verificar sua adequação para representar as decisões envolvidas no sistema de produção, as principais diferenças nos planos de produção gerados, e o desempenho destes modelos. Os resultados obtidos demonstram que os modelos propostos representam adequadamente as decisões no sistema de produção estudado, e geram planos de produção significativamente melhores que os planos praticados pela fábrica.

Palavras-chave: Planejamento e programação da produção. Dimensionamento de lotes. Padrões de moldagem. Indústria de embalagens em polpa moldada.

ABSTRACT

This research deals with the production planning and scheduling problem in the molded pulp packing industry, studying particularly a plant of molded pulp packages for eggs. The production process can be subdivided into two processes: molding process and printing process. The main challenge for production planning activities is on the molding process, where products are produced through tooling that have several molds. These tooling are called "Molding Patterns" or "Conformation Patterns". Each one of the molding patterns can contain one, two, until three kind of molds, allowing to produce several products simultaneously. Producing several products at the time can generate large inventory for low demand products and also null inventory for high demand products. Thus, different inventory levels are defined for each product based on their demand behavior, in order to control inventory quantities. In this way, decisions related to the production planning and scheduling in this production process involve deciding which molding patterns should be used, how much time they should be used, and how they should be sequenced. All these should be made taking into account a parallel machine system and sequenced-dependent setups time and costs, in order to minimize inventory and setups costs, as well as penalties associated to inventory out of the specified inventory levels of each product. To represent this problem we proposed two formulations: the first one based on the Capacitated Lot Sizing and Scheduling Problem (CLSP), and the second one based on the General Lot Sizing and Scheduling Problem (GLSP). The results from the models were compared in a set of real word instances of a plant, in order to check the adequacy to represent the decisions involved in the studied production process, as well as the main differences between their production plans and performance of the models. The proposed formulations were also adapted for a particular instance, in order to compare their production plans against the production plan implemented by the studied plant. Results show that the proposed models represent rightly decisions involved in the production planning and scheduling in the molded pulp. Furthermore, the solutions obtained by the proposed models represent production plans with costs significantly lower than the schedule implemented by a real plant in this kind of industry.

Keywords: Production planning and scheduling problem. Lot sizing and scheduling problem. Molding patterns. Molded pulp packaging industry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Participação de cada segmento na indústria de embalagens.....	6
Figura 2.2 - Embalagens em polpa moldada produzidas pela fábrica em estudo.....	9
Figura 2.3 - Fluxograma do processo de produção de embalagens em polpa moldada na fábrica estudada	10
Figura 2.4 - Padrões de moldagem para a produção de embalagens moldadas para acondicionamento de ovos	11
Figura 2.5 - Ilustração do arranjo físico da fábrica de embalagens moldadas.....	13
Figura 3.1 - Tempos de preparação triangulares e não triangulares.....	23
Figura 3.2 - Exemplo ilustrativo para as restrições de sequenciamento do modelo CLSP	29
Figura 3.3 - Possíveis configurações nas soluções do modelo CLSP sem restrições de eliminação de ciclos desconexos	30
Figura 3.4 - Exemplo de possíveis soluções obtidas através do CLSP com <i>setup</i> dependente da sequência e <i>setup carry-over</i>	31
Figura 5.1 - Plano de produção obtido através do modelo CLSP-1	64
Figura 5.2 - Plano de produção obtido através do modelo GLSP-1	64
Figura 5.3 - Comparação de custos entre os programas de produção obtidos através dos modelos CLSP-1 e GLSP-1	72
Figura 5.4 - Plano de produção da fábrica.....	74
Figura 5.5 - Plano de produção resultante do modelo CLSP-1, com considerações de atrasos	75
Figura 5.6 - Plano de produção resultante do modelo GLSP-1, com considerações de atrasos	75
Figura 5.7 - Comparação de custos entre o plano de produção da fábrica e os planos resultantes dos modelos propostos, com considerações de atraso.....	78
Figura 5.8 - Variação dos custos totais da solução conforme variações nos parâmetros α e β (CLPS-1 com considerações de atraso).....	81
Figura 5.9 - Variação das unidades em estoque, unidades atrasadas, e o desvio em relação aos níveis de estoque definidos, conforme variações nos parâmetros α e β (CLSP-1 com considerações de atraso)	82
Figura 5.10- Desempenho computacional das abordagens CLSP-1 e GLSP-1 na resolução do exemplar 4	86
Figura 5.11- Desempenho das formulações propostas para o Exemplar 4.....	89

Figura A.1- Possíveis sequências para o exemplo ilustrativo	102
---	-----

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Faturamento da indústria de embalagens no Brasil.....	5
Tabela 2.2- Crescimento da participação de cada segmento na indústria de embalagens.....	7
Tabela 2.3 - Taxa de produção dos padrões de moldagem (exemplo)	12
Tabela 3.1 - Dimensionamento e sequenciamento de lotes em diferentes setores industriais .	47
Tabela 4.1 - Número de variáveis e restrições envolvidas nas abordagens propostas	61
Tabela 5.1 - Consumo de capacidade nos planos de produção resultantes das abordagens propostas.....	65
Tabela 5.2 - Tempo dedicado às operações de preparação nos planos de produção CLSP-1 e GLSP-1	65
Tabela 5.3 - Atendimento da demanda (Modelo CLSP-1).....	66
Tabela 5.4–Atendimento da demanda (Modelo GLSP-1).....	67
Tabela 5.5 - Níveis de estoque e desvio (<i>unds.</i>) em relação ao nível mínimo e máximo para cada produto resultante do modelo CLSP-1	70
Tabela 5.6 - Níveis de estoque e desvio (<i>unds.</i>) em relação ao nível mínimo e máximo para cada produto resultante do modelo GLSP-1	70
Tabela 5.7 - Consumo de capacidade dos programas de produção, com permissão de atrasos.	75
Tabela 5.8 - Tempo dedicado às operações de preparação em cada plano de produção, com permissão de atrasos.	76
Tabela 5.9 - Volume total produzido, níveis de estoque e atrasos ao final do horizonte de planejamento.....	77
Tabela 5.10- Comparação entre as soluções resultantes das abordagens CLSP-1 e GLSP-1 ..	84
Tabela 5.11 - Comparação entre as abordagens CLSP-1 e GLSP-1 em relação ao número iterações e de nós explorados	85
Tabela 5.12 - Comparações entre as soluções das abordagens CLSP-2 e GLSP-2.....	87
Tabela 5.13 - Comparações entre as abordagens CLSP-2 e GLSP-P2, em relação ao número de iterações e nós explorados	88
Tabela B.1 - Volume produzido, unidades em estoque e atrasos no plano de produção da fábrica.....	106
Tabela B.2 - Volume produzido, unidades em estoque e atrasos no programa de produção do CLSP-1	107

Tabela B.3 - Volume produzido, unidades em estoque e atrasos no plano de produção do GLSP-1	108
Tabela B.4 - Unidades em estoque e desvio (em unidades) em relação aos níveis estabelecidos, resultantes do plano de produção da fábrica	109
Tabela B.5 - Unidades em estoque e desvio (em unidades) em relação aos níveis estabelecidos, resultantes no plano de produção do modelo CLSP-1	110
Tabela B.6 - Unidades em estoque e desvio (em unidades) em relação aos níveis estabelecidos, resultantes do plano de produção do GLSP-1	111
Tabela C.7- Características das instâncias geradas aleatoriamente	112
Tabela C.8 - Resultados do Grupo 1 de instâncias aleatórias.....	113
Tabela C.9 - Resultados do Grupo 2 de instâncias aleatórias.....	113
Tabela C.10 - Resultados do Grupo 3 de instâncias aleatórias.....	113
Tabela C.11 - Resultados do Grupo 4 de instâncias aleatórias.....	114
Tabela A.1 - Níveis de estoque para cada produto	115
Tabela A.2. Taxas de produção dos padrões de moldagem em relação a cada produto (unidades /hora).....	116
Tabela A.3. Tempos de preparação entre os diferentes padrões de moldagem (horas)	116
Tabela A.4. Custos de preparação entre os diferentes padrões de moldagem (unidades monetárias)	117
Tabela A.5. Capacidade disponível para o exemplar de comparação entre os planos de produção (horas).....	118
Tabela A.6. Previsão de demanda para o exemplar de comparações entre os planos de produção (unidades)	118
Tabela A.7. Níveis de estoques iniciais para o exemplar de comparação entre os planos de produção	118
Tabela B.1 - Estoques iniciais para os exemplares estudados.....	119
Tabela B.2 - Previsões de demanda para a Semana 1	119
Tabela B.3 - Previsões de demanda para a Semana 2	120
Tabela B.4 - Previsões de demanda para a Semana 3	120
Tabela B.5 - Previsões de demanda para a Semana 4	121

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS.....	3
1.2 METODOLOGIA.....	3
2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	5
2.1 O SETOR PRODUTOR DE EMBALAGENS	5
2.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE PRODUÇÃO ESTUDADO.....	8
2.2.1 Processo de produção	9
2.2.2 Planejamento e programação da produção	14
2.2.3 Escopo do trabalho	16
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	17
3.1 PROBLEMAS DE DIMENSIONAMENTO E SEQUENCIAMENTO DE LOTES 19	
3.1.1 Problema de Dimensionamento de Lotes Capacitado - CLSP	25
3.1.2 Problema de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes Geral - GLSP	32
3.2 DIMENSIONAMENTO DE LOTES E PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO EM DIFERENTES SETORES INDUSTRIAIS.....	35
4. MODELAGEM DO PROBLEMA	49
4.1 CONSIDERAÇÕES PARA MODELAGEM	49
4.2 ABORDAGEM BASEADA NO CLSP	51
4.2.1 Modelo CLSP-1.....	51
4.2.2 Modelo CLSP-2.....	56
4.3 ABORDAGEM BASEADA NO GLSP	57
4.3.1 Modelo GLSP-1	58
4.3.2 Modelo GLSP-2	59
5. ESTUDOS COMPUTACIONAIS.....	62
5.1 PLANOS DE PRODUÇÃO GERADOS PELOS MODELOS CLSP-1 E GLSP-1	63
5.2 COMPARAÇÃO COM O PLANO DE PRODUÇÃO DA FÁBRICA	73
5.2.1 Avaliação de diferentes penalidades no desvio dos níveis de estoque.....	80
5.3 COMPARAÇÃO ENTRE AS ABORDAGENS CLSP-1 E GLSP-1	83

5.4	COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS CLSP-2 E GLSP-2	87
6.	CONCLUSÕES FINAIS	92
7.	PERSPECTIVAS PARA FUTURAS PESQUISAS	94
	REFERÊNCIAS	96
	APÊNDICES	102
A-	Exemplo ilustrativo para verificação das restrições de eliminação de ciclos desconexos na formulação CLSP.	102
B-	Comparações entre os planos de produção resultante das abordagens propostas e o plano de produção da fábrica.....	106
C-	Resultados dos experimentos computacionais para instâncias aleatórias	112
	ANEXOS	115
A-	Informações do sistema de produção real utilizadas nos estudos computacionais.	115
B-	Informações relacionadas com os exemplares testados, para comparações entre as abordagens CLSP e GLSP.....	119

1. INTRODUÇÃO

As embalagens têm um papel fundamental na sociedade, não apenas pela proteção oferecida durante o transporte de produtos ou alimentos, mas também como forma de preservá-los até seu descarte final. Atualmente, as embalagens podem representar um fator diferenciador entre produtos de uma mesma categoria, oferecendo vantagem competitiva e contribuindo significativamente para aumentar as margens de lucro dos produtos. Estas são algumas das características que fazem da indústria de embalagens um setor dinâmico e com grande potencial de crescimento.

Segundo a Associação Brasileira de Embalagens - ABRE (2013), a receita líquida de vendas neste setor no ano de 2012 atingiu R\$46,1 bilhões, superando os R\$44,7 bilhões gerados em 2011. Para 2013, as perspectivas para o setor são positivas, pois a produção de embalagens deverá crescer até 2% neste ano, e obter receitas líquidas de venda de aproximadamente R\$48 bilhões. Estas previsões apresentadas pela ABRE, em conjunto com os dados históricos relacionados à receita líquida na indústria de embalagens desde o ano 2008, evidenciam as perspectivas de crescimento deste setor.

A produção de embalagens demanda decisões importantes tanto no aspecto produtivo e econômico, quanto no aspecto ambiental. Sistemáticamente, estas decisões envolvem um grande desafio nas atividades de planejamento nos níveis tático e operacional. Em relação ao aspecto ambiental, uma das principais características da produção de embalagens consiste na geração e acúmulo de resíduos pós-consumo, devido ao rápido descarte destes itens. Portanto, o desafio em termos de sustentabilidade ambiental está relacionado com o projeto do produto e dos processos envolvidos, de modo que os recursos disponíveis sejam aproveitados de forma eficiente, que a produção não empobreça o capital natural das próximas gerações, e que o seu processo de descarte pós-consumo seja fácil, sendo parte de um processo natural (PEREIRA; DA SILVA, 2010). Em relação ao aspecto econômico, a produção de embalagens deve garantir equilíbrio econômico e manter uma margem mínima de lucratividade, considerando que os itens produzidos geralmente possuem um baixo valor no mercado e é necessária a produção de grandes volumes de produto de modo eficiente. Já no aspecto produtivo, o processo de produção de embalagens envolve características relacionadas aos grandes volumes de demanda, produção e estoque, assim como uma ampla variedade de itens de diferentes tamanhos e especificações, as quais dificultam as atividades de planejamento e programação da produção.

Este trabalho foca as decisões de planejamento e programação na indústria de embalagens, estudando particularmente o sistema de produção de uma fábrica que produz embalagens em polpa moldada para acondicionamento de ovos e frutas. O planejamento neste sistema de produção específico envolve decisões econômicas, produtivas e ambientais, como as mencionadas anteriormente.

As embalagens biodegradáveis em fibra moldada são obtidas principalmente a partir de materiais fora de uso como aparas de papel jornal, revistas, papel sulfite, rascunhos, folhas de caderno, entre outros materiais como, por exemplo, pasta mecânica. O processo de produção pode ser subdividido em dois processos: moldagem e estampagem. O processo de moldagem compreende as etapas de preparação de polpa, moldagem propriamente dita, secagem, prensagem e estocagem. A denominação deste processo é assim definida, visto que a etapa de moldagem é a mais representativa do processo completo. Já o processo de estampagem compreende as etapas de impressão, empacotamento e expedição.

O processo de moldagem apresenta continuidade desde a entrada de matéria prima até a obtenção das embalagens e não possui estoques intermediários. Portanto, pode ser considerado como um processo monoestágio. Uma das principais particularidades deste processo é o acoplamento de ferramentais específicos para a produção de diferentes produtos. Estes ferramentais são chamados de “padrões de moldagem” ou “padrões de conformação”, e consistem em um conjunto de moldes para a produção de um ou mais tipos de produtos. Estes padrões de moldagem são semelhantes aos padrões de corte bidimensionais, no sentido que, a partir de um determinado molde, pode ser obtido um número discreto de itens ou produtos. Desta forma, a programação da produção envolve a escolha dos padrões a serem utilizados, o tempo durante o qual os padrões devem ser usados, e a sequência na qual diferentes padrões devem ser programados, de forma a atender a demanda de cada produto.

A indústria de embalagens em polpa moldada, particularmente para acondicionamento de ovos e frutas, apresenta particularidades em seu sistema produtivo que tornam ainda mais desafiadoras as atividades de planejamento e programação da produção. Por exemplo: a produção de grandes volumes de embalagens com baixo valor agregado; a manipulação de diferentes itens, cuja demanda varia consideravelmente de um produto para outro; e a utilização de padrões de moldagem através dos quais são produzidos os diferentes produtos e que devem ser configurados em um sistema de múltiplas linhas. Além disso, a sincronia entre produção e altos níveis de estoque instigam à aplicação de métodos de otimização neste setor industrial.

1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é estudar o problema de dimensionamento de lotes e programação da produção em uma fábrica do setor de produção de embalagens em polpa moldada para a indústria alimentícia, especificamente o setor de embalagens para acondicionamento de ovos e frutas, e propor modelos de programação inteira mista que representem adequadamente as características deste sistema de produção.

Como objetivo secundário, este trabalho pretende caracterizar o sistema de produção de embalagens em polpa moldada, descrevendo detalhadamente o processo de produção envolvido, as características do planejamento da produção das embalagens e as particularidades do sistema de produção em geral.

1.2 Metodologia

Esta pesquisa se fundamenta no pressuposto de que podemos construir modelos que expliquem total ou parcialmente o comportamento dos processos operacionais de ambientes reais, e que podemos também capturar os problemas de tomada de decisões envolvidos nestes processos. Segundo Bertrand e Fransoo (2002) e Morabito e Pureza (2009), esta pesquisa pode ser caracterizada como empírica prescritiva, visto que propõe principalmente criar um modelo que se ajuste às observações e ações no sistema real, desenvolvendo estratégias, políticas e ações para melhorar a situação atual.

A metodologia de pesquisa abordada neste trabalho se assemelha às etapas definidas por Hillier e Lieberman (2002) para os estudos em pesquisa operacional. O primeiro passo envolve a definição do problema abordado, a caracterização do sistema de produção estudado e a apresentação dos dados e informações relevantes relacionadas. Em seguida é proposto um modelo matemático para representar o problema, que deve se adequar corretamente às considerações particulares do sistema de produção. A seguir é necessária a definição de um procedimento para derivar as soluções do problema através da modelagem algébrica. Após esta etapa é utilizado um pacote comercial para a resolução do modelo. Com isto, o modelo é testado e validado através de exemplares reais fornecidos pela fábrica, o que permite verificar a necessidade de efetuar ajustes no modelo ou consideração de métodos de solução mais eficazes. Por fim, os resultados dos testes realizados serão apresentados, analisados e comparados com as informações relacionadas às práticas da fábrica estudada.

Este texto está organizado da seguinte maneira: o capítulo 2 apresenta a descrição do problema, o qual apresenta informações relacionadas ao setor de embalagens, a descrição do

processo de produção de embalagens em popa moldada, as particularidades do planejamento e programação da produção neste tipo de indústria e, nesse contexto, o escopo deste trabalho; o capítulo 3 apresenta os trabalhos encontrados na literatura relacionada aos problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes, assim como os trabalhos que abordam o planejamento e programação da produção em diversos setores industriais; o capítulo 4 descreve as abordagens propostas para a representação e modelagem do problema estudado; o capítulo 5 apresenta os estudos computacionais realizados e os resultados obtidos; e, finalmente as conclusões finais e perspectivas para trabalhos futuros são apresentadas.

2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Este capítulo apresenta uma descrição da indústria de produção de embalagens em polpa moldada, particularmente embalagens para o acondicionamento de ovos e frutas. Para contextualizar o problema, informações sobre o setor produtor de embalagens no Brasil, relacionadas com o crescimento desta indústria e sua interface com outros setores industriais são apresentados na Seção 2.1. A Seção 2.2 apresenta uma descrição detalhada da fábrica estudada pertencente à indústria de embalagens moldadas, abordando sua atividade de produção e as principais políticas, o funcionamento de seu sistema de produção e as particularidades do mesmo, o modo como é realizado o planejamento e programação da produção atualmente e o escopo a ser abordado neste trabalho.

2.1 O setor produtor de embalagens

O setor produtor de embalagens tem registrado um aumento importante no seu potencial produtivo e, conseqüentemente, nas suas receitas líquidas. Considerando os dados históricos sobre a receita líquida de vendas do setor desde o ano 2008 (Tabela 2.1), a ABRE registrou o aumento mais significativo na produção do ano 2009 para o ano 2010, passando de R\$36,7 bilhões de reais para R\$41,9 bilhões, gerando assim um crescimento do 14,16%. Os dados referentes à receita líquida de vendas desde o ano 2008 até o ano 2012 e as previsões de receita líquida para o ano 2013, as quais são de aproximadamente R\$48 bilhões, evidenciam a tendência de crescimento deste setor (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMBALAGENS - ABRE, 2013).

Tabela 2.1 - Faturamento da indústria de embalagens no Brasil

ANO	RECEITA LÍQUIDA DE VENDAS (Bilhões de Reais)
2008	35,4
2009	36,7
2010	41,9
2011*	44,7
2012*	46,1

* Dados estimados

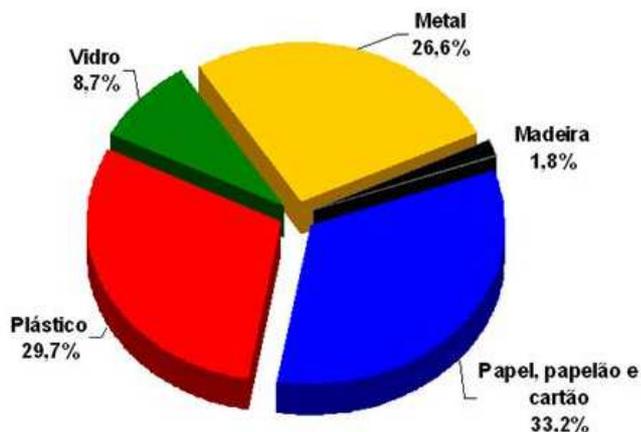
Fonte: ABRE (2013) extraído do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)

Entre as principais indústrias usuárias do setor de embalagens ressalta-se a indústria de alimentos, que é responsável por aproximadamente 50% do volume de produção gerado no setor de embalagens. Segundo a ABRE (2013), depois da indústria alimentícia, em ordem decrescente de participação no consumo do volume produzido, têm-se a indústria de bebidas,

fumo, vestuário e acessórios, calçados e artigos de couro, a indústria farmacêutica, sabões, sabonetes, detergentes e produtos de limpeza, perfumaria e cosméticos.

Outra característica importante deste setor é a capacidade de utilizar vários tipos de materiais para a manufatura de seus produtos. De forma geral, os principais materiais utilizados correspondem a papelão, papel e cartão, representando a maioria das embalagens produzidas (33,2%). Seguidamente o plástico e metal também representam uma porcentagem importante no tipo de material utilizado para a produção das embalagens no Brasil. Em uma porcentagem consideravelmente menor, o vidro e a madeira também são utilizados para a produção destes produtos. A Figura 2.1 detalha a participação de cada segmento na indústria de embalagens.

Figura 2.1 - Participação de cada segmento na indústria de embalagens



Fonte: Associação Brasileira de Embalagens - ABRE (2013)

A Tabela 2.2 apresenta um resumo das informações apresentadas na Figura 2.1, além de apresentar a participação de cada segmento de matéria prima na indústria de embalagens. Das informações apresentadas na tabela, nota-se uma redução em todos os segmentos no ano 2012 comparado ao ano de 2011, com exceção do segmento de plástico. A redução mais significativa se apresenta nos segmentos de madeira e vidro. Por outro lado, apesar da diminuição no total deste indicador, a participação dos materiais plásticos aumentou 0,44% em relação ao período anterior.

Tabela 2.2- Crescimento da participação de cada segmento na indústria de embalagens

SEGMENTO	PORCENTAGEM DE PARTICIPAÇÃO	2011*	2012*
Total	100	1,46	-1,19
Madeira	1,82	5,40	-10,20
Papel, Papelão e Cartão	33,16	2,51	-0,97
Plástico	29,74	-1,99	0,44
Vidro	8,71	5,16	-5,69
Metal	26,58	2,43	-1,13

* % em relação a igual período no ano anterior

Fonte: Associação Brasileira de Embalagens - ABRE, 2013

Apesar da leve diminuição na participação na indústria de embalagens, os materiais tipo papel, papelão e cartão são considerados uns dos insumos mais importantes para a produção de embalagens. Segundo a ABRE (2013), nas embalagens de papel estão incluídos os sacos e papéis de embrulho, as caixas e cartuchos de papelão e as caixas de papelão ondulado. As embalagens de papel e papelão podem ser moldadas em vários formatos, são relativamente leves e ocupam pouco espaço de armazenamento. Segundo o Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas - BRT (2007), os seguintes tipos de papel são utilizados na produção de embalagens.

Papéis para embalagens leves e embrulhos: são papéis de baixa gramatura fabricados em grande parte com aparas de diversos tipos de pastas mecânicas, semi-mecânica e química. Entre os mais conhecidos encontram-se: estiva e maculatura, usado para embrulhos que não requerem apresentação; o papel manilhina, usado geralmente em padarias; papel manilha, usado para embrulho nas lojas, indústrias e similares; papel tecido, utilizado essencialmente para embrulhos de tecidos e na fabricação de envelopes; papel fósforo, utilizado especificamente para forrar caixas de fósforos; diversos tipos de papel *strong*, utilizados para a fabricação de sacos de pequeno porte, forro de sacos e embrulho; papel seda, usado para embalagens leves, embrulhos de objetos artísticos, intercalação, enfeites, proteção de frutas, etc.; papéis impermeáveis, usado essencialmente para embalagens de alimentos; o papel granado e “*Greaseproof*”, usado essencialmente para embalagens de substâncias gordurosas, e finalmente o papel fosco usado para desenho, embalagens descartáveis para alimentos, etc.

Papéis para embalagens pesadas: trata-se dos papéis que possuem boa resistência mecânica e são fabricados geralmente a partir da pasta química sulfato. Estes papéis podem ser classificados como papel *Kraft*, o qual pode ser utilizado para: fabricação de sacos e embalagens para indústrias de grande porte; fabricação de sacos de pequeno porte; pode ser utilizado como folha externa em sacos multi-folhados, sacos de açúcar e farinha; e, para fabricação de saquinhos, embrulhos e embalagens em geral.

Papéis para fabricação de papelão ondulado: o papel ondulado é definido como uma estrutura formada por um ou mais elementos ondulados (miolos) fixados a um ou mais elementos planos (capas) por meio de adesivo aplicado no topo das ondas.

Cartão: o cartão é mais pesado que o papel e tem seus produtos aplicados em cartuchos, caixas pequenas, e pastas para arquivos. Os cartões podem ser da seguinte classe: cartão duplex, usados para a confecção de cartuchos impressos ou não; cartão triplex; cartão branco, ou cartão para copos; cartões cores, que são usados principalmente para confecção de fichas e pastas coloridas para arquivos; e, finalmente o papelão, que é usado na encadernação de livros, suporte para comprovantes contábeis, caixas e cartazes a serem recobertos. O papelão pode ser do tipo papelão madeira, papelão caixa, e polpa moldada, que é um produto obtido a partir de pastas químicas, mecânicas, branqueadas ou não, e aparas para o uso específico.

Polpa moldada: é obtida a partir da madeira de árvores ou a partir de aparas de papel e papelão. Suas aplicações são de várias formas e visam proteger quaisquer produtos, sejam bens de consumo frágeis, produtos eletrônicos, recipientes de vidro, plástico, madeira e inclusive alguns tipos de alimentos.

Todos estes materiais celulósicos caracterizam-se por serem biodegradáveis e recicláveis, e encontram-se entre os materiais com maior taxa de reciclagem no Brasil. A reciclagem é tradicional no setor papelero, no total, 46% de todos os papéis que circularam no país no ano 2009 foram encaminhados à reciclagem pós-consumo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL- BRASELPA, 2012). As fábricas cujos insumos contem este tipo de material são abastecidas por uma grande rede de aparistas, cooperativas e outros fornecedores de papel pós-consumo que fazem a triagem e o enfardamento do material.

2.2 Descrição do sistema de produção estudado

A fábrica objeto deste estudo pertence a uma empresa presente em todos os continentes, cujo foco principal consiste em oferecer soluções de embalagens para a indústria avícola e alimentícia. A partir do ano 2007, este grupo assumiu as unidades em Sorocaba no estado de São Paulo e Montes Claros no estado de Minas Gerais, assim com uma planta na Argentina.

O estudo de caso foi desenvolvido na unidade de Sorocaba-SP, que atualmente oferece soluções em embalagens para ovos e frutas, especificamente estojos e bandejas em polpa moldada. A unidade de Sorocaba possui cinco linhas de produção nas quais são produzidos diferentes tipos de bandejas e estojos variando o formato, o tamanho e a cor das embalagens.

Os produtos fabricados consistem em embalagens biodegradáveis de fibra moldada obtidas a partir de materiais pós-consumo, especificamente aparas de papel jornal, revista, papel sulfite, rascunhos, folhas de caderno entre outras, comprometendo-se assim com o desenvolvimento sustentável e a preservação do meio ambiente. Nas seções seguintes é explicado com maior detalhe o funcionamento da fábrica no que se refere à descrição do processo produtivo (Seção 2.2.1) e o planejamento e programação da produção (Seção 2.2.2).

2.2.1 Processo de produção

O sistema produtivo da fábrica caracteriza-se pela produção de grandes volumes de produtos e, portanto, pelo grande consumo de matérias primas. A fábrica opera de forma contínua 24 horas, sete dias por semana, durante todo o ano.

O processo produtivo, em geral, pode ser dividido em dois processos: moldagem e estampagem. Cada um destes processos compreende várias etapas, no entanto podem ser considerado como monoestágio devido ao fluxo contínuo de material as etapas de cada um deles, sem estoques intermediários. Adicionalmente, o planejamento e programação da produção nos processos de moldagem e estampagem são realizados separadamente.

A divisão dos processos de moldagem e estampagem está relacionada com os tipos de embalagens produzidas na fábrica. A unidade fabril produz embalagens do tipo estojo e bandejas para ovos, bem como bandejas para frutas, especificamente maçãs, como ilustrados na Figura 2.2. As embalagens do tipo estojo requerem tanto do processo de moldagem como do processo de estampagem para serem considerados produtos terminados. No entanto, as bandejas requerem apenas do processo de moldagem, sendo expedidas aos clientes ao término deste.

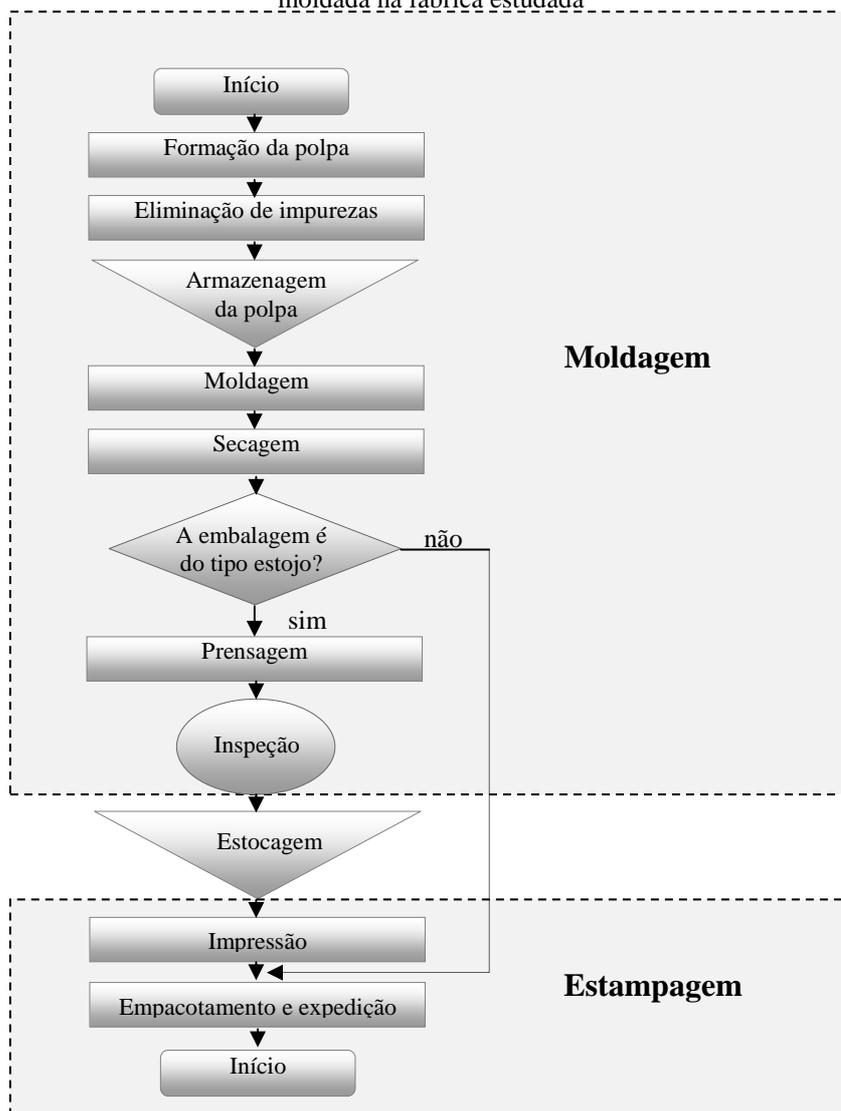
Figura 2.2 - Embalagens em polpa moldada produzidas pela fábrica em estudo



O processo de produção tanto de estojos como de bandejas começa com a recepção de matérias primas em um galpão aberto, onde são recebidas aparas dos diferentes tipos de papel, provenientes de diferentes fornecedores e de cooperativas de coleta de resíduos sólidos

recicláveis. Estas aparas são separadas segundo seu tipo, cor e qualidade, o que é determinante para a produção dos diferentes itens. Estes materiais são armazenados em um pátio aberto ao lado da fábrica, e quando ingressam na fábrica, seguem o processo de produção indicado na Figura 2.3.

Figura 2.3 - Fluxograma do processo de produção de embalagens em polpa moldada na fábrica estudada

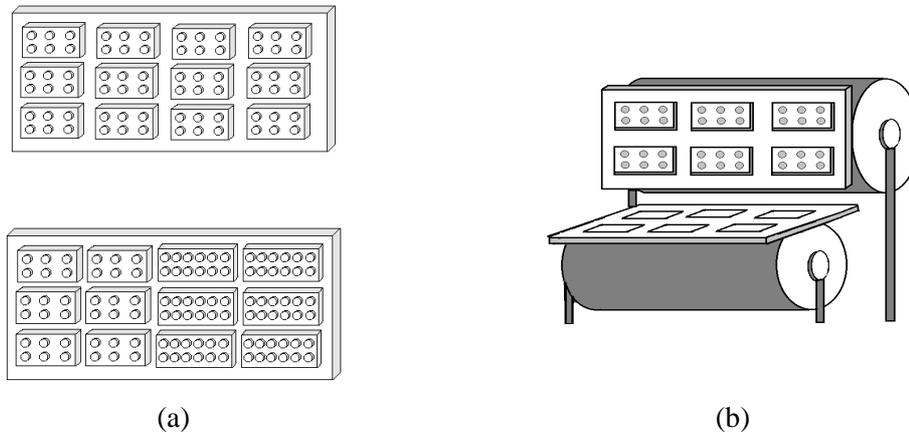


Após a recepção das matérias primas e sua armazenagem no galpão, estes materiais são transportados para o interior da fábrica, passando inicialmente pela etapa de fabricação da polpa. Nesta etapa, o papel é misturado com água e outros agentes químicos para melhorar a mistura e propiciar a cor desejada. O equipamento para esta etapa é conhecido como *Hidra Pulper*. A quantidade de água adicionada no processo depende das condições de umidade do papel devido à sua exposição ao meio ambiente na área de armazenagem.

Em seguida, a polpa passa por um sistema de purificação de massa, basicamente formado por um conjunto de peneiras vibratórias, para retirar as impurezas mais grosseiras da polpa (Figura 2.3). Na próxima etapa, a massa segue para o tanque de armazenagem que supre a etapa seguinte para a formação do produto (Figura 2.3).

A etapa seguinte é considerada a mais importante, pois é onde a fibra é moldada (Figura 2.3). Nesta etapa a massa segue através de uma máquina que trabalha com dois rotores sincronizados, que dão a forma do produto desejado, absorvendo o excesso de água por sucção. Sobre os rotores são acoplados os ferramentais que chamamos de padrões de conformação ou padrões de moldagem. Cada ferramental pode conter moldes de um único tipo de produto, dois ou até três tipos diferentes. A Figura 2.4 ilustra dois dos padrões de moldagem utilizados na fábrica em estudo (a), assim como sua configuração nos rotores para a fabricação das embalagens (b). O primeiro padrão, na parte superior esquerda da Figura 2.4(a) contém doze moldes para a produção de estojos de seis ovos. Já o segundo padrão contém seis moldes para a produção de estojos de seis ovos, e seis moldes para estojos de doze ovos.

Figura 2.4 - Padrões de moldagem para a produção de embalagens moldadas para acondicionamento de ovos



As informações relacionadas ao número de itens obtidos através de cada padrão de moldagem são fornecidas em função do tempo que são utilizados estes padrões, como no exemplo a seguir.

Tabela 2.3 - Taxa de produção dos padrões de moldagem (exemplo)

	Estojo de 6 ovos	Estojo de 10 ovos	Estojo de 12 ovos
Padrão de moldagem 1	210.000 $\frac{unds.}{h}$	-	-
Padrão de moldagem 2	105.000 $\frac{unds.}{h}$	-	80.000 $\frac{unds.}{h}$
Padrão de moldagem 3	-	200.000 $\frac{unds.}{h}$	-

Observe no exemplo da Tabela 2.3 que o padrão de moldagem 2 pode produzir tanto estojos de seis ovos, quanto estojos de doze ovos. Em uma hora de produção de qualquer uma das linhas de produção, sob a configuração do padrão 2, são obtidos 105.000 estojos de seis ovos e 80.000 estojos de 12 ovos. Note também que os estojos de 6 ovos podem ser obtidos através do padrão 1 e 2, ou seja, qualquer produto é produzido através de no mínimo um padrão de moldagem.

A unidade fabril estudada produz atualmente 48 itens diferentes entre bandejas para ovos e maçãs e estojos para ovos. Para a etapa de moldagem desses produtos a empresa tem disponíveis ferramentas para a conformação de sete padrões para a produção de estojos, e seis padrões para a produção de bandejas, os quais permitem a fabricação dos diferentes produtos nas diferentes cores.

Depois da etapa de moldagem ocorre o processo de secagem (Figura 2.3), no qual o material passa através de uma esteira para a estufa, sendo aquecido de 10 a 15 minutos em média, sendo submetido a temperaturas que variam entre 180°C e 240°C, dependendo das condições do material e o tipo de produto. Terminada esta etapa, as embalagens tipo bandeja são consideradas como produto acabado. No entanto, os estojos continuam o seu processo de produção.

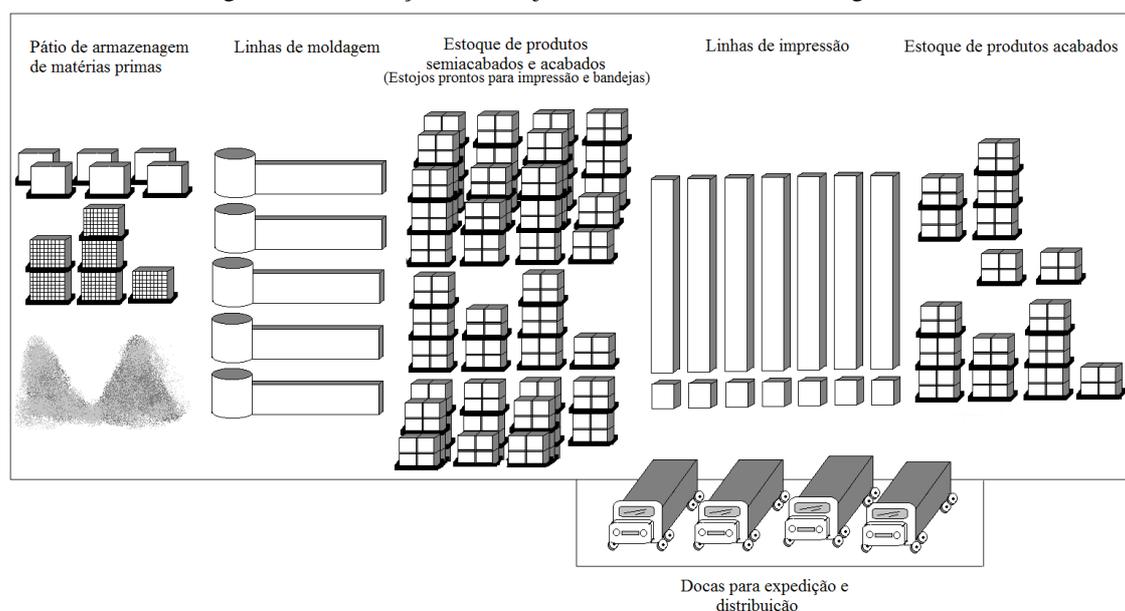
Após a secagem, as bandejas passam pela etapa de empacotamento e disposição em paletes, que é totalmente automatizada para este tipo de embalagem. Posteriormente, estas são enviadas para a etapa de expedição, onde recebem os códigos de barras e demais informações relacionadas com o produto e o cliente para onde será enviado.

Já os estojos, depois da etapa de secagem, passam pela etapa de prensagem, cujo objetivo é propiciar um melhor acabamento e resistência ao produto, deixando-o apto para o processo de impressão. Em seguida, estas embalagens passam por uma rápida inspeção manual (Figura 2.3). A seguir, as embalagens são estocadas e aguardam pelo processo de impressão.

Terminado o processo de moldagem, os estojos seguem para o processo de estampagem que começa com a etapa de impressão, conforme a Figura 2.3. Nesta etapa, as embalagens recebem a impressão na parte superior externa e interna do estojo de acordo com projeto definido previamente pelo cliente. A seguir, as embalagens tipo estojos são empacotadas na sua forma final e recebem os códigos de barras que identificam a quantidade de produto contida no pacote e incluem informações específicas dos clientes finais, para serem distribuídas (Figura 2.3).

Atualmente, a fábrica dispõe de cinco linhas de produção idênticas para o processo de moldagem e sete linhas de impressão para o processo de estampagem. A Figura 2.5 ilustra o arranjo físico da fábrica, mostrando as áreas de armazenagem, estocagem, moldagem e impressão.

Figura 2.5 - Ilustração do arranjo físico da fábrica de embalagens moldadas



As cinco linhas de produção disponíveis para o processo de moldagem podem processar qualquer tipo de formato das embalagens (estojos ou bandejas), requerendo uma preparação prévia que consiste na troca de moldes e ajuste dos equipamentos. Duas destas linhas foram recentemente modificadas para realizar as tarefas de empacotamento de forma automatizada. Estas linhas foram designadas para a produção exclusiva de bandejas para evitar grandes tempos de preparação na troca entre tipos de produto (de bandejas para estojos e vice-versa). As outras três linhas de produção são dedicadas à fabricação dos diferentes tipos de estojos, o que implica uma maior dificuldade para a programação da produção, visto que existe maior variedade de formatos e cores.

No processo de estampagem, quatro das sete linhas de impressão trabalham em tempo integral no atendimento das ordens de produção. As outras três trabalham com menor frequência, já que processam apenas um conjunto pequeno de produtos que geralmente apresenta baixa demanda.

Desta forma, em termos gerais o sistema de produção de embalagens estudado pode ser definido como de dois níveis: o primeiro que corresponde ao processo de moldagem, e o segundo ao processo de estampagem. O processo de moldagem consiste em um sistema de produção com máquinas paralelas idênticas, em que o padrão de produção é do tipo *flowshop*, os produtos passam pelas mesmas máquinas e não existem estoques intermediários. O processo de estampagem consiste em um sistema de máquinas paralelas dedicadas, em que existem linhas especializadas na produção de certos itens. O planejamento e programação da produção do sistema completo depende da estrutura do processo de produção e é descrito na próxima seção.

2.2.2 Planejamento e programação da produção

A diferenciação dos processos de moldagem e estampagem para produção de embalagens da fábrica é importante para a descrição das atividades de planejamento e programação da produção, visto que estas atividades são realizadas de forma separada nos dois processos e cada um deles possui características e desafios diferentes para o planejamento.

Como estratégia de competitividade e sustentabilidade econômica, além do baixo preço no mercado das embalagens, a fábrica lida com grandes volumes de produção e estoque. O processo de moldagem pode ser considerado como “empurrado”, visto que o seu objetivo principal é o aproveitamento total da capacidade e o atendimento da demanda, gerando, caso seja possível, grandes volumes de estoque para atender futuros pedidos. Já o processo de estampagem, cuja matéria prima corresponde aos produtos obtidos no processo de moldagem, pode ser considerado “puxado”, uma vez que depende das ordens individuais de cada cliente e das datas combinadas com os mesmos.

A fim de planejar e programar as atividades produtivas, os departamentos comercial, de produção e de logística trabalham em conjunto para atender os pedidos dos clientes nos períodos estabelecidos. De forma geral, o processo de planejamento da produção começa com a previsão de demanda mensal para cada um dos itens produzidos na fábrica, que é realizada pelo departamento comercial. Estas previsões são desagregadas semanalmente para cada item, e são informadas para o departamento de produção, aproximadamente seis dias antes do início

de cada mês. A partir disto, levando em conta os níveis de estoques e as atividades de manutenção programadas com antecedência, o responsável pelo planejamento e programação no departamento de produção estabelece um plano de produção detalhado semana a semana.

O planejamento e programação da produção nos processos de moldagem e estampagem são realizados de forma separada e, atualmente, não existe um sistema de apoio à decisão para estas atividades, sendo realizadas conforme experiência prévia dos responsáveis. No primeiro processo, as atividades de programação da produção são baseadas nas previsões de demanda fornecidas pelo departamento comercial. No processo de estampagem, o planejamento é baseado nas ordens diretas dos clientes. Embora o planejamento nestes dois processos seja realizado de forma separada e com responsáveis diferentes, as decisões e informações de um processo influenciam nas decisões do outro. Assim, os responsáveis mantêm comunicação constante procurando sincronizar o processo decisório.

Um dos elementos que dificultam a programação da produção no processo de moldagem são as características dos tempos de preparação das linhas. Estes tempos variam entre 30 minutos e 2 horas para troca de cor, e entre 10 e 48 horas para trocas entre padrões de moldagem. Além deste consumo de tempo, devem ser consideradas também as atividades de manutenção, revisão e lubrificação, sendo que estas demoram cerca de 10 e 2 horas, respectivamente.

Todo o consumo de capacidade das máquinas com atividades de preparação, revisão, lubrificação e manutenção programadas são considerados fatores críticos que dificultam a programação das linhas de produção no processo de moldagem. Este processo representa o gargalo do sistema de produção, pois sua capacidade é consideravelmente reduzida pelos grandes tempos de preparação e atividades de manutenção, fazendo-a menor que a capacidade do processo de estampagem.

O estoque intermediário de produto entre os processos de moldagem e estampagem é gerado tanto pela produção simultânea de produtos com alta e baixa demanda, quanto pela tendência da fábrica de aproveitar uma preparação que consome muito tempo para produzir lotes grandes, ou seja, minimizar os tempos de troca. Para controlar os níveis de estoque são definidas metas para níveis de estoque de cada produto. Estes níveis resultam em uma medida para garantir a disponibilidade de produtos de alta demanda (nível mínimo de estoque) e evitar o excesso de produtos em estoque (nível máximo). No entanto, existe maior cuidado em manter os níveis mínimos de estoque, devido à preocupação da fábrica quanto ao atraso no atendimento dos pedidos, e para garantir disponibilidade de produto para pedidos não

programados. Todas estas características e particularidades do sistema de produção na indústria de embalagens moldadas, especialmente no processo de moldagem, tornam desafiadoras as atividades de planejamento e programação da produção.

2.2.3 Escopo do trabalho

Considerando os desafios relacionados ao planejamento e programação da produção na fábrica estudada, o escopo deste trabalho foca o planejamento e programação do processo de moldagem, mais especificamente da produção das embalagens do tipo estojo. A delimitação deste escopo é motivada pela maior variedade de formatos e cores deste tipo de embalagem, pelo maior número de padrões de moldagem disponíveis, além do fato deste processo representar o gargalo do sistema e ser considerado a atividade de planejamento mais crítica, segundo os responsáveis pela programação da produção.

Desta forma, o foco do problema é a programação da produção de estojos para ovos em polpa moldada, cujo ambiente de produção consiste em um sistema de três linhas paralelas. Como o produto passa por todas as máquinas na mesma ordem, podemos considerar cada linha como uma única máquina.

O objetivo e o principal desafio para o responsável do planejamento da produção no processo de moldagem é estabelecer um plano de produção para determinar quais padrões de moldagem utilizar, quanto tempo cada linha deverá utilizar cada padrão de moldagem e em que sequência estes padrões devem ser programados. Todas estas decisões devem ser definidas, resultando no menor tempo de trocas possíveis e gerando quantidade suficiente de produtos para atender as previsões de demanda e, eventualmente, pedidos não programados que surgem durante o horizonte de planejamento, sem incorrer em excesso de produto em estoque. Neste contexto, este trabalho pretende abordar as particularidades deste sistema de produção, buscando um plano de produção viável do ponto de vista prático, que minimize os custos de preparação e de manutenção de estoques, e permita controlar o volume de estoque de cada produto.

3. REVISÃO DE LITERATURA

O gerenciamento da produção pode ser definido como a administração dos recursos diretos que são necessários para a obtenção dos produtos e serviços de uma organização. Esta administração é responsável por todas as atividades do processo produtivo, desde a gestão e recepção das matérias primas até a entrega dos produtos aos clientes finais. Dentro da função produção, as decisões gerenciais são exercidas em três grandes níveis hierárquicos: decisões estratégicas, táticas, e de planejamento operacional e controle (DAVIS; AQUILANO; CHASE, 2001; HAX; CANDEA, 1984).

As decisões estratégicas envolvem planejamento a longo prazo e correspondem ao mais alto nível na tomada de decisões, em que são definidas as metas da empresa e as políticas para atingí-las. Estas decisões costumam ser de natureza muito ampla e abordam aspectos como: as formas de produção do produto, a localização das instalações e fábricas, a capacidade requerida, e o momento e modo em que esta deve ser ampliada (ARENALES et al., 2007).

O planejamento tático consiste no primeiro desdobramento do planejamento estratégico e visa à alocação efetiva dos recursos para satisfazer a demanda, levando em conta os custos envolvidos. Estas decisões abordam basicamente as questões de como alocar mão-de-obra e materiais de forma eficiente e coerente com o plano estratégico previamente estabelecido. Algumas questões nas quais se concentra o planejamento tático referem-se ao número de operários necessários, a alocação de horas extras, à definição de ter ou não estoques, entre outras decisões (LUSTOSA et al., 2008; ARENALES et al., 2007)

As decisões relacionadas ao planejamento operacional e controle da produção, além de serem influenciadas pelas decisões táticas, são muito restritas e de curto prazo. O planejamento neste nível trata das decisões mais imediatas levando em conta os planos definidos nos níveis tático e estratégico, estabelecendo uma programação detalhada da produção que apresente o sequenciamento dos pedidos nos centros de trabalho, designações de tarefas especiais e prioridades nas ordens de fabricação, administração dos estoques, aquisição das matérias primas e programação da distribuição dos produtos, entre outros (LUSTOSA et al., 2008; ARENALES et al., 2007).

Este trabalho foca os problemas de tomada de decisões no nível tático-operacional do setor de produção de embalagens moldadas. O planejamento nestes níveis inclui o dimensionamento de lotes e programação da produção, o qual 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 minimizar os custos totais envolvidos (KARIMI; GHOMI; WILSON, 2003).

Na prática, na maioria das empresas, bem como em vários trabalhos encontrados na literatura, as decisões sobre o tamanho dos lotes e a sequência de produção são considerados de forma independente (BERNADES; ARAUJO; RANGEL, 2010). Segundo Defalque (2010) e Araujo e Arenales (2000), o problema de dimensionamento de lotes consiste em planejar a quantidade de itens a ser produzida em uma ou várias máquinas, em cada período ao longo de um horizonte de tempo, de modo a atender certa demanda, sujeita a restrições de limite de capacidade, e de acordo com um critério de otimização específico. Por outro lado, o sequenciamento consiste em encontrar a ordem em que os itens devem ser produzidos, em um conjunto de máquinas definido, tal que um ou mais objetivos sejam otimizados. Desta forma, o problema integrado de dimensionamento de lotes e programação da produção responde às questões do que, quanto e quando produzir de cada produto, de forma a otimizar custos ou recursos (KARIMI; GHOMI; WILSON, 2003).

Os problemas de dimensionamento de lotes podem ser classificados em dois principais grupos: problemas de dimensionamento de lotes de um único item e problemas de dimensionamento de lotes de múltiplos itens. Os problemas de dimensionamento de lotes de um único item visam encontrar um plano de produção que atenda à demanda em cada período e às restrições de capacidade, enquanto minimiza os custos de produção e estocagem (POCHET; WOLSEY, 2006). Este tipo de problema tem sido de especial interesse pela sua relativa simplicidade, e pela sua importância como um sub problema de outros problemas de dimensionamento mais complexos, além da aplicabilidade em ambientes industriais onde é possível agregar itens para considerar como um único produto (BRAHIMI et al., 2006; KARIMI; GHOMI; WILSON, 2003). Algumas revisões dos modelos de dimensionamento de lotes de um único item podem ser encontradas em Brahim et al. (2006) e Pochet e Wolsey (2006). Karimi, Ghomi e Wilson (2003) dentro da sua revisão de literatura sobre os problemas de dimensionamento capacitados abordam também os modelos de um único item. Outras revisões relacionadas com este tipo de problema podem ser encontradas em Staggemeier e Clark (2001).

Este capítulo apresenta os principais trabalhos relacionados ao dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção monoestágio e para múltiplos itens. A Seção 3.1 apresenta as principais características e considerações dos problemas de dimensionamento de lotes de múltiplos itens, apresentando particularmente as formulações clássicas do Problema

de Dimensionamento de Lotes Capacitado (CLSP) e o Problema de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes Geral (GLSP). A Seção 3.2 apresenta uma descrição dos principais trabalhos relacionados ao dimensionamento e sequenciamento de lotes aplicado a sistemas de produção em diferentes setores industriais.

3.1 Problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes

Nos problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes, a produção de diferentes produtos é programada ao longo de um horizonte de planejamento, envolvendo maior dificuldade para fornecer um plano de produção, em comparação com os problemas de um único item. Uma formulação clássica para representar os problemas de múltiplos itens com restrições de recurso é o Problema de Dimensionamento de Lotes Capacitado (CLSP), que pode ser formulado como segue (KARIMI; GHOMI; WILSON, 2003).

Índices

i Produtos
 t Períodos de tempo

Parâmetros

N Número de produtos
 T Número de períodos de tempo
 Q_t Capacidade disponível no período t
 d_{it} Demanda do item i no período t
 p_{it} Custo unitário de produção do item i no período t
 h_{it} Custo unitário de estocagem do item i no período t
 s_{it} Custo de preparação incorrido se o item i é produzido no período t
 q_i Consumo de capacidade unitário do item i

Variáveis de decisão

x_{it} Unidades do item i produzidas no período t
 I_{it} Unidades do item i em estoque ao final do período t
 y_{it} Variável binária que assume o valor de 1 se o item i é produzido no período t , ou 0 em caso contrário.

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (p_{it}x_{it} + h_{it}I_{it} + s_{it}y_{it}) \quad (3.1)$$

Sujeito a:

$$I_{i(t-1)} + x_{it} = d_{it} + I_{it} \quad \forall t=1,\dots,T; i=1,\dots,N \quad (3.2)$$

$$\sum_{i=1}^N q_i x_{it} \leq Q_t \quad t=1,\dots,T \quad (3.3)$$

$$x_{it} \leq M_{it} y_{it} \quad \forall t = 1, \dots, T; i = 1, \dots, N \quad (3.4)$$

$$x_{it}, I_{it} \geq 0; y_{it} \in \{0, 1\} \quad \forall t = 1, \dots, T; i = 1, \dots, N \quad (3.5)$$

A função objetivo (3.1) relaciona os custos totais compostos pelos custos de produção de todos os itens ao longo do horizonte de planejamento, pelos custos de estocagem para todos os produtos e pelos custos de preparação. As equações (3.2) correspondem às restrições de balanceamento de estoques e atendimento da demanda, para todos os itens, em cada período de tempo. As restrições (3.3) garantem que em cada período, a produção de todos os itens produzidos não exceda a capacidade disponível. As restrições (3.4) relacionam as variáveis de quantidade produzida de cada item ao estado de preparação da máquina em determinado período, de modo que para produzir qualquer quantidade do item i , necessariamente a máquina deve estar preparada para esse item. A máxima quantidade produzida é limitada pelo parâmetro M_{it} , em que $M_{it} = \sum_{k=t}^T d_{ik}$. Por último as equações (3.5) definem o domínio das variáveis do modelo.

Uma ampla gama de variações nos modelos de dimensionamento de lotes e programação da produção tem sido gerada a partir da inclusão de elementos na modelagem. A incorporação destes elementos diferencia a complexidade na modelagem dos problemas de dimensionamento (KARIMI; GHOMI; WILSON, 2003; VOß; WOODRUFF, 2003). De acordo com Pochet e Wolsey (2006), algumas das considerações que fazem parte destas extensões são as seguintes.

Backlogging ou atraso na demanda: indica que é possível atender parte da demanda após a data combinada. Geralmente este atraso envolve um custo de penalização associado proporcionalmente à quantidade de produto atrasado, e ao período de tempo posterior à data de entrega combinada. Esta particularidade pode ser considerada na modelagem dos problemas de dimensionamento de lotes de múltiplos itens como segue.

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (p_{it} x_{it} + h_{it} I_{it}^+ + b_{it} I_{it}^- + s_{it} y_{it}) \quad (3.6)$$

Sujeito a: restrições (3.3), (3.4),

$$I_{i(t-1)}^+ - I_{i(t-1)}^- + x_{it} = d_{it} + I_{it}^+ - I_{it}^- \quad \forall t = 1, \dots, T; i = 1, \dots, N \quad (3.7)$$

$$x_{it}, I_{it}^+, I_{it}^- \geq 0; y_{it} \in \{0, 1\} \quad \forall t = 1, \dots, T; i = 1, \dots, N \quad (3.8)$$

em que b_{it} representa o custo associado às unidades em atraso do item i no período t , I_{it}^+ e I_{it}^- são variáveis não negativas que representam as unidades em estoque e as unidades atrasadas do item i ao final do período t , respectivamente.

Perda de vendas ou *backorders*: a demanda pode ou não ser totalmente atendida no período considerado, sem possibilidade de ser suprida em períodos futuros, como acontece quando são permitidos *backlogging*. Estes casos podem ocorrer, por exemplo, quando a capacidade é muito menor que a necessária para satisfazer a demanda potencial, ou quando o preço de venda nem sempre cobre o custo marginal de produção. As penalidades por perda da venda geralmente equivalem ao custo de produção do produto ou o lucro do mesmo, no entanto, muitas vezes representam também prejuízos não tangíveis em situações reais. Na reformulação do problema de Wagner-Whitin para um problema de maximização de lucro, Aksent, Altinkemer e Chand (2003) incorporam restrições de perda de venda.

Tamanho mínimo de lote: em alguns problemas, a fim de garantir um nível mínimo de produtividade, um tamanho de lote mínimo ou nível de produção é definido. Pochet e Wolsey (2006) afirmam que não são necessárias variáveis adicionais na formulação do problema para incluir estas restrições, sendo suficiente associar um limite inferior à quantidade produzida como na equação (3.9).

$$x_{it} \geq y_{it} LB_{it} \quad \forall t = 1, \dots, T; i = 1, \dots, N \quad (3.9)$$

em que LB_{it} representa a quantidade mínima do produto i a ser produzida no período t .

Geralmente, estas restrições são propostas devido a algumas limitações tecnológicas no sistema de produção, e tem muitas aplicações em situações reais, como na indústria de bebidas e de alimentos. Alguns trabalhos aplicados à indústria alimentícia e de bebidas evidenciam a importância de incorporar níveis mínimos de produção (TOSO; MORABITO; CLARK, 2009; FERREIRA; MORABITO; RANGEL, 2009). Outros sistemas de produção também determinam tamanhos de lote mínimo para os itens cujo tempo de preparação da linha para a sua produção é muito grande.

Estoque de segurança: faz referência a uma quantidade mínima de estoque planejado, denominado estoque de segurança, que é requerido ao final de cada período de modo ajudar a lidar com as incertezas, e evitar as unidades faltantes quando a demanda ultrapassa as previsões de demanda em determinados períodos. A inclusão desta particularidade na modelagem adiciona um limite inferior SS_{it} para os níveis de estoque em cada período, como indicado nas equações (3.10).

$$I_{it} \geq SS_{it} \quad \forall t=1, \dots, T; i=1, \dots, N \quad (3.10)$$

Tempos e custos de preparação dependentes da sequência: neste caso considera-se que a preparação das máquinas para a produção de cada item, depende do item imediatamente anterior que foi produzido na mesma máquina. Esta preparação dependente da sequência tem um custo e/ou um tempo de preparação associado também dependente da sequência que gera um impacto nos custos totais e/ou uma redução da capacidade, respectivamente.

Vários são os trabalhos que consideram custos e tempos de preparação dependentes da sequência. Haase (1996), por exemplo, considera o problema de dimensionamento de lotes capacitado, em que os custos de preparação dependentes da sequência são considerados, e o estado de preparação da linha é preservado nos períodos de tempo ociosos. Anily, Tzur e Wolsey (2009) e Haase e Kimms (2000) também consideram custos e tempos de preparação dependentes da sequência. Na revisão particular do CLSP apresentada na seção 3.1.1 deste capítulo é apresentada a incorporação destes elementos na modelagem.

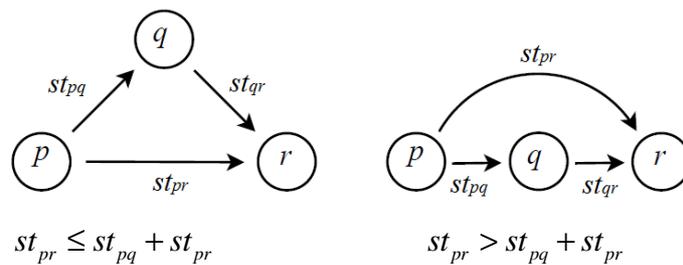
Setup carry-over ou conservação do estado de preparação: a inclusão de *setup carry-over* significa que uma máquina é capaz de manter seu estado de preparação, para a produção de determinado item, entre diferentes períodos de tempo. Esta característica implica que o último produto produzido no período pode ser produzido no período seguinte, sem uma preparação adicional da máquina. A particularidade de manter os estados de preparação das máquinas entre os períodos de tempo é muito importante em indústrias cuja produção é contínua (QUADT; KUHN, 2008). Nos trabalhos de Gupta e Magnusson (2005), que considera tempos e custos de preparação dependentes da sequência, a conservação do estado de preparação da linha também é incluída na sua formulação. Da mesma forma Gopalakrishnan, Miller e Schmidt (1995) e Almada-Lobo et al. (2007) apresentam formulações para o problema de dimensionamento de lotes considerando *setup carry-over*.

Period overlapping setup ou sobreposição de setup entre períodos: a consideração de *period overlapping setup* implica que as operações de preparação podem ser interrompidas no final de um período de tempo e retomadas no início do período seguinte, sem nenhum prejuízo adicional, considerando a natureza da operação requerida, e que não existe separação física entre os períodos de tempo. Esta consideração é muito importante para sistemas de produção em que os tempos de preparação das máquinas são considerados grandes em relação aos períodos do horizonte de planejamento, e a capacidade das máquinas é tão ajustada, que precisa de uma distribuição efetiva dos tempos de preparação. Menezes, Clark e Almada-Lobo (2011) consideram esta característica nas formulações propostas, entretanto Surie

(2006) apresenta várias formulações para lidar especialmente com os tempos de preparação que apresentam esta característica.

Tempos de preparação triangulares: os tempos de preparação triangulares ocorrem sempre que é mais vantajoso preparar a máquina desde um produto p para um produto r diretamente, do que preparar a máquina através de um terceiro produto q , ou seja, a desigualdade triangular $st_{pr} \leq st_{pq} + st_{qr}$ é satisfeita como mostra a Figura 3.1. Em que st_{pr} é o tempo de preparação necessário para configurar a máquina do produto p para o produto r . Na prática existem produtos que podem ser considerados como “limpantes”, que evitam a contaminação nas linhas de produção e podem resultar em tempos de preparação não triangulares. Esta contaminação representa uma preocupação especial para a indústria alimentícia, embora este problema possa ser encontrado também em outros tipos de indústrias, tais como a indústria de bebidas e de petróleo (CLARK; MAHDIEH, 2011).

Figura 3.1 - Tempos de preparação triangulares e não triangulares



Clark e Mahdih (2011) abordam amplamente as considerações de tempos de preparação não triangulares. Menezes, Clark e Almada-Lobo (2011) apresentam formulações para lidar com tempos de preparação não triangulares, além de outras considerações no dimensionamento de lotes e programação da produção. Toso, Morabito e Clark (2008) apresentam um estudo de caso na indústria de nutrição animal, cujos produtos tem risco de contaminação cruzada e existem produtos que funcionam como “limpantes”, portanto, os tempos de preparação entre eles não obedecem à desigualdade triangular.

Problemas *small bucket* e *big bucket*: uma importante classificação para os problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes de múltiplos itens corresponde aos problemas tipo *small bucket* e *big bucket* (KARIMI; GHOMI; WILSON, 2003). No caso dos problemas do tipo *small bucket*, os períodos de tempos são considerados curtos de forma que somente um item pode ser processado em cada período, gerando no máximo uma preparação na linha. Entretanto, os problemas *big bucket* ou *large bucket* indicam que mais de um

produto e, portanto mais de uma preparação pode ser feita no mesmo período (KARIMI; GHOMI; WILSON, 2003; VOß; WOODRUFF, 2003). As considerações do tipo *small bucket* são geralmente representadas nos problemas de dimensionamento pelas equações (3.11).

$$\sum_{i=1}^N y_{it} \leq 1 \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (3.11)$$

Como y_{it} indica se a máquina está preparada para produzir o item i no período t ($y_{it} = 1$), ou não ($y_{it} = 0$), em cada período t , no máximo um único produto pode ser produzido.

Existem várias formulações na literatura que são considerados modelos do tipo *small bucket* e, da mesma forma, modelos do tipo *big bucket*. O Problema de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes Discreto (DLSP), o Problema de Dimensionamento de Lotes com *Setup* Contínuos (CSLP), e o Problema de Dimensionamento de Lotes Proporcional (PLSP) destacam-se entre os modelos *small bucket*. Por outro lado, o Problema de Dimensionamento de Lotes Capacitado (CLSP) e o Problema de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes Geral (GLSP) são considerados modelos do tipo *big bucket* (DREXL; KIMMS, 1997).

Entre as formulações do tipo *small bucket*, o Problema de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes Discreto (DLSP) caracteriza-se principalmente pelos seguintes elementos: a demanda dos produtos é determinística e varia ao longo do tempo; o plano de produção é estabelecido para um horizonte de planejamento finito subdividido em vários períodos de tempo discretos; no máximo um único item é processado em cada período, e se processado consome toda a capacidade da linha, ou caso contrário a mesma permanece ociosa ("produção tudo ou nada"). Formulações deste tipo podem ser encontradas em Fleischmann (1990) e Gicquel, Minoux e Dallery (2009).

O problema DLSP de múltiplos itens tem sido estudado amplamente na literatura. Brüggemann e Jahnke (2000) discutem a complexidade do problema de dimensionamento de lotes e programação da produção discreto. Salomon et al. (1997) abordam o DLSP considerando tempos e custos de preparação dependentes da sequência, através de um algoritmo de programação dinâmica aplicado a uma reformulação deste problema usando o Problema do Caixeiro Viajante com Janelas de Tempo. Similarmente, Gicquel, Wolsey e Mineux (2012) apresentam uma extensão do DLSP para máquinas paralelas idênticas.

O Problema de Dimensionamento com *Setup* Contínuos (CSLP) é muito similar ao Problema de Dimensionamento e Sequenciamento Discreto (DLSP), sendo que este último, a

fim de fornecer uma formulação mais adequada à realidade, desconsidera o consumo de capacidade "tudo ou nada", porém ainda considera a produção de um item por período.

O Problema de Dimensionamento de Lotes Proporcional (PLSP) tenta evitar a ociosidade no Problema de Dimensionamento com *Setup* Contínuos, utilizando a capacidade remanescente para a produção de outro item no período de tempo em particular. Desta forma é permitida a produção de no máximo dois produtos por período. A formulação para este problema é apresentada em Drexl e Haase (1995) e Drexl e Kimms (1997).

Entre os problemas do tipo *big bucket* mais conhecidos encontra-se o Problema de Dimensionamento de Lotes Capacitado (CLSP), que é considerado uma extensão do Problema de Wagner-Whitin para múltiplos itens e restrições de capacidade (DREXL; KIMMS, 1997; KARIMI; GHOMI; WILSON, 2003). Neste problema múltiplos produtos são produzidos, os quais estão associados a um volume de demanda discreta e determinística para cada período de tempo. A produção de um item consome capacidade da linha, e a troca de um produto para outro, além de consumir capacidade, tem um custo de preparação associado. O objetivo é encontrar um plano de produção ótimo que minimize os custos de preparação e estocagem, fornecendo os tamanhos de lotes ótimos e a sequência de produção dos mesmos.

Uma das formulações mais completas pertencentes à classe de problemas do tipo *big bucket* corresponde ao Problema de Dimensionamento de Lotes Geral (GLSP) apresentado por Fleischmann e Meyr (1997) e Suerie (2005). A principal característica deste problema consiste na subdivisão dos períodos de tempo T em um conjunto de S micro-períodos, onde no máximo um item é processado. Como nos modelos apresentados até então, a demanda é determinística e dinâmica, ou seja, varia ao longo do tempo. Formulações clássicas e variações dos modelos CLSP e GLSP são apresentadas com mais detalhes nas seções seguintes.

3.1.1 Problema de Dimensionamento de Lotes Capacitado - CLSP

Como mencionado anteriormente, o CLSP é considerado um modelo tipo *big bucket*, visto que vários itens podem ser produzidos por período. Formulações básicas para este modelo são apresentadas por Drexl e Kimms (1997) e Karimi, Ghomi e Wilson (2003), conforme às equações (3.1) - (3.5) apresentado no início da seção 3.1. A resolução do Problema de Dimensionamento de Lotes Capacitado é conhecida como *NP-hard*, entretanto, quando incorporados tempos de preparação positivos o problema torna-se *NP-Completo* (DREXL; KIMMS, 1997). Algumas revisões dos problemas CLSP são estudadas nos trabalhos de Karimi, Ghomi, e Wilson (2003), Quadts e Kuhn (2008) e Absi (2008).

Vários trabalhos tem abordado o CLSP considerando diferentes características e elementos na modelagem. Uma das variações dos problemas CLSP mais estudadas é o CLSPL (*Capacitated Lot Sizing Problem with Linked Lot Sizes*), que mantém o estado de preparação de um período para outro (*setup carry-over*). Segundo Surie e Stadler (2003), uma das principais características deste tipo de problema é que, no máximo um *setup* é mantido de um período para o próximo, de modo que dois lotes de períodos adjacentes sejam agregados, sem necessidade de operações de preparação no segundo período.

Gopalakrishnan, Miller e Schmidt (1995) e Gopalakrishnan (2000) abordam o CLSPL, considerando tempos de preparação não dependentes e dependentes do produto, respectivamente. Sox e Gao (1999) abordam o CLSPL através de uma formulação baseada na representação do problema do caminho mínimo, resultando em limitantes apertados para o modelo linear. Surie e Stadler (2003) apresentam também reformulações para o CLSPL baseadas no problema de locação de facilidades, assim como extensões do modelo para múltiplos níveis.

Recentemente, a incorporação de decisões de sequenciamento nas formulações do CLSP tem recebido especial atenção, em vista da sua aplicabilidade em diferentes contextos industriais. Haase (1996) foi um dos primeiros autores que estenderam as formulações CLSP, considerando *setups* dependentes da sequência. Os autores ressaltam as diferenças entre o modelo proposto e o Problema de Dimensionamento de Lotes Discreto com Custos de Preparação Dependentes da Sequência (DLSDD), ressaltando que este último divide os macro-períodos de tempo (t) em um conjunto de micro-períodos de igual capacidade. Esta formulação considera custos e tempos de preparação dependentes da sequência, e que obedecem à desigualdade triangular.

Haase e Kimms (2000) apresentam uma formulação para os problemas de dimensionamento de lotes, que incorpora tempos e custos dependentes da sequência. Esta formulação assume custos e tempos de preparação que obedecem à desigualdade triangular, e o estado de preparação da máquina é preservado em períodos ociosos. Este modelo consiste em determinar quais “sequências eficientes” designar para cada período, e o tamanho dos lotes de cada item incluído na sequência. Estas sequências são determinadas previamente, através da resolução de problemas do caixeiro viajante (TSP – *Traveling Salesman Problem*), e permitem a produção de vários itens por período de tempo. Os autores apresentam também alternativas de reprogramação, baseadas na formulação proposta. Kovács, Brown e Tarim (2009) também propõem uma formulação baseada no trabalho de Haase e Kimms (2000), para

os problemas de dimensionamento de lotes em que vários itens são processados por período, e os tempos e custos de preparação são dependentes da sequência. Nesta formulação, os autores mantêm a idéia da determinação de “sequências eficientes”, e os mesmos pressupostos considerados em Haase e Kimms (2000). No entanto, este modelo utiliza variáveis binárias para indicar se um item é produzido ou não em cada período, o que resulta em um modelo de menor tamanho, porém na expressão complexa de restrições relacionadas com custos e tempos de preparação. Os autores demonstram experimentalmente o desempenho eficiente do modelo proposto, em comparação com a formulação de Haase e Kimms (2000).

Clark and Clark (2000) apresentam uma formulação inteira mista, com tempos de preparação dependentes da sequência, que permite vários *setups* por período, para um sistema de máquinas paralelas. A formulação proposta assume um número conhecido de *setups* permitidos por período, e relaciona as decisões de sequenciamento com a utilização destas preparações. O modelo proposto apresenta dificuldade na resolução de instâncias de grande porte, portanto são utilizadas técnicas de horizonte rolante que geram planos de produção exatos para um determinado conjunto de períodos de tempo imediato.

Gupta e Magnusson (2005) também apresentam uma formulação de programação inteira mista para o CLSP, com tempos e custos de preparação dependentes da sequência, e considerações de *setup carry-over*. A formulação deste problema é motivada pelas atividades de planejamento e programação da produção em uma empresa que fabrica produtos abrasivos. A modelagem inclui um amplo conjunto de variáveis binárias para indicar as decisões de qual produto produzir em determinado período, decisões de troca entre produtos, e decisões para determinar o primeiro e último produto a ser produzido em cada período. Adicionalmente, um conjunto de restrições diferentes às apresentadas em Haase (1996) são propostas para eliminação de sub-rotas no sequenciamento. No entanto, Almada-Lobo, Oliveira e Carravilla (2008) demonstram que as restrições apresentadas em Gupta e Magnusson (2005) não eliminam sub-rotas e propõem novas restrições para este fim.

Almada-Lobo et al. (2007) apresentam uma formulação para o CLSP, em que vários produtos são produzidos por período e são considerados tempos e custos de preparação dependentes da sequência. Esta formulação é utilizada como base para as abordagens propostas nesta pesquisa, e tem uma estrutura similar à formulação apresentada por Haase (1996). Utilizando os parâmetros e variáveis definidos ao longo do capítulo e nesta seção, o CLSP com custos e tempos de preparação dependentes da sequência, e *setup carry-over* pode ser formulado, segundo Almada-Lobo et al. (2007), como segue.

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^T s_{ij} z_{ijt} + \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T h_i I_{it} \quad (3.12)$$

Sujeito a:

$$I_{i(t-1)} + x_{it} - d_{it} = I_{it} \quad \forall i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (3.13)$$

$$\sum_{i=1}^N q_i x_{it} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N s_{ij} z_{ijt} \leq Q_t \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (3.14)$$

$$x_{it} \leq M_{it} \left(\sum_{j=1}^N z_{jit} + y_{it} \right) \quad \forall i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (3.15)$$

$$\sum_{i=1}^N y_{it} = 1 \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (3.16)$$

$$y_{it} + \sum_{j=1, j \neq i}^N z_{jit} = y_{i(t+1)} + \sum_{j=1, j \neq i}^N z_{ijt} \quad \forall i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (3.17)$$

$$f_{it} + N \cdot z_{ijt} - (N-1) - N \cdot y_{it} \leq f_{jt} \quad \forall i, j = 1, \dots, N / i \neq j; t = 1, \dots, T \quad (3.18)$$

$$x_{it}, I_{it}, y_{it}, f_{it} \geq 0, \quad z_{ijt} \in \{0, 1\} \quad \forall i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (3.19)$$

Nesta formulação, a variável y_{it} representa o estado de preparação da máquina ao início do período t , e diferencia-se do modelo proposto por Haase (1996) pela consideração de tempos de preparação dependentes da sequência, e diferenças nas restrições de eliminação de ciclos. A função objetivo (3.12) minimiza os custos de estocagem e preparação dependentes da sequência, as restrições (3.13) representam o balanceamento de estoques e atendimento à demanda e as restrições (3.14) garantem que os tempos de produção e preparação totais não excedam a capacidade disponível em cada período.

As restrições (3.15) garantem que um produto possa ser produzido se e somente se a linha foi configurada para a produção do mesmo. As restrições (3.16) garantem que cada linha de produção seja preparada para um único produto, ao início de cada período de tempo. As restrições (3.17) definem o sequenciamento dos lotes de produção. Observe que elas estabelecem a relação entre os estados iniciais de preparação da linha, e as trocas ao longo de cada período. Através destas igualdades estabelece-se que, se uma linha está preparada para o padrão i no início de determinado período de tempo, necessariamente deve haver uma troca para qualquer padrão $j \neq i$, ou a linha se mantém preparada para o padrão i no período seguinte ($y_{i(t+1)} = 1$). Da mesma forma, se há troca do padrão j para o padrão i no período t em uma linha específica, necessariamente deve haver uma nova troca do padrão i para qualquer outro $j \neq i$, ou o estado de preparação se mantém para o próximo período. Estas restrições

permitem a utilização de vários padrões de moldagem e, conseqüentemente, várias trocas em cada linha e em cada período de tempo, uma vez que mantém o estado de preparação das linhas de um período para outro (*setup carry-over*). O exemplo a seguir ilustra esta situação.

Suponha quatro padrões de moldagem disponíveis (A, B, C e D). Considere que em determinada linha, em determinado período de tempo são programados os padrões de moldagem A, C e D como indica a Figura 3.2, e verifiquemos se as restrições (3.17) permitem mais de uma troca em cada período.

Figura 3.2 - Exemplo ilustrativo para as restrições de sequenciamento do modelo CLSP



No exemplo, a linha se encontra preparada inicialmente para o padrão D, portanto $y_{ID_t} = 1$. Aplicando as restrições (3.17) para o exemplo, temos o seguinte.

Padrão A: $y_{IA_t} + (z_{IBA_t} + z_{ICA_t} + z_{IDA_t}) = y_{IA_{(t+1)}} + (z_{IAB_t} + z_{IAC_t} + z_{IAD_t})$
 $0 + (0 + 0 + 1) = 0 + (0 + 1 + 0)$

Padrão B: $y_{IB_t} + (z_{IAB_t} + z_{ICB_t} + z_{IDB_t}) = y_{IB_{(t+1)}} + (z_{IBA_t} + z_{IBC_t} + z_{IDB_t})$
 $0 + (0 + 0 + 0) = 0 + (0 + 0 + 0)$

Padrão C: $y_{IC_t} + (z_{IAC_t} + z_{ICB_t} + z_{ICD_t}) = y_{IC_{(t+1)}} + (z_{ICA_t} + z_{ICB_t} + z_{ICD_t})$
 $0 + (1 + 0 + 0) = 1 + (0 + 0 + 0)$

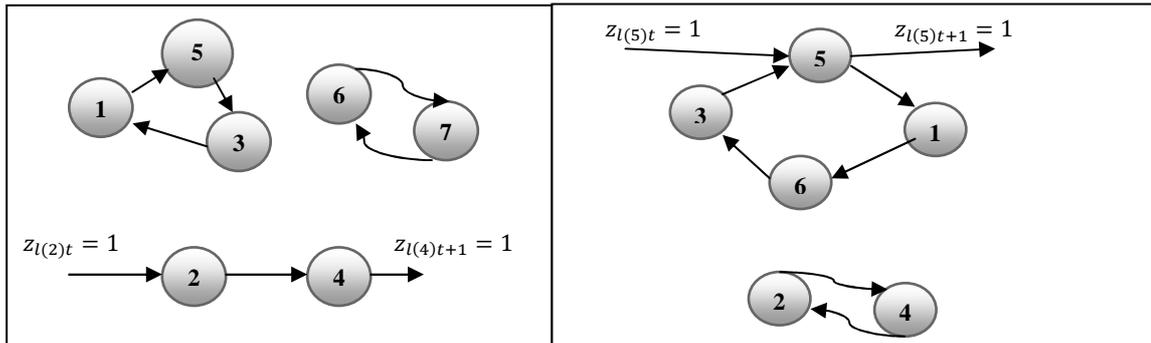
Padrão D: $y_{ID_t} + (z_{IAD_t} + z_{IDB_t} + z_{IDC_t}) = y_{ID_{(t+1)}} + (z_{IDA_t} + z_{IDB_t} + z_{IDC_t})$
 $1 + (0 + 0 + 0) = 0 + (1 + 0 + 0)$

Note que, cada lado da equação pode tomar o valor de um ou zero dado que as variáveis y_{lit} e z_{lit} são binárias. A linha só pode estar preparada para um único padrão em cada período e, só é permitida uma troca por vez desde um mesmo padrão. No caso do padrão B, dado que ele não é utilizado na linha, os dois lados da equação são iguais a zero. Já para o padrão C, visto que não existe nenhuma troca dele para algum outro padrão, sendo este o último programado, a sua preparação permanece até o período seguinte $y_{IC_{(t+1)}} = 1$.

Observe que as restrições descritas até agora (3.13) - (3.17) junto com a definição das variáveis permitem soluções com uma sequência coerente, porém pode conter também vários ciclos desconexos, como ilustrado na Figura 3.3. Do lado esquerdo na Figura 3.3 tem-se uma sequência válida e dois ciclos desconexos, ou seja, a linha se encontra inicialmente configurada para o item 2 e logo ocorre uma troca para o item 4, deixando este como o estado

de preparação inicial para o próximo período. Por outro lado, os itens 1, 3 e 5, assim como os itens 6 e 7 formam ciclos não conexos à sequência. Da mesma forma, na representação da solução apresentada no lado direito da Figura 3.3 tem-se um ciclo entre os itens 2 e 4 desconexos da sequência principal.

Figura 3.3 - Possíveis configurações nas soluções do modelo CLSP sem restrições de eliminação de ciclos desconexos



A fim de obter uma solução factível e um plano de produção coerente, as restrições (3.18) são impostas. Note que estas restrições utilizam as variáveis auxiliares f_{it} para a eliminação de ciclos desconexos nas soluções, de modo que uma solução factível pode ser representada como uma única sequência ou um único ciclo. A modelagem destas restrições é similar à modelagem das chamadas "restrições fracas" para eliminação de sub-rotas nos problemas do caixeiro viajante (TSP).

Observe que as variáveis f_{it} atribuem um valor específico à sequência de cada linha em cada período, por exemplo, se $y_{it} = 1$ e $z_{ijt} = 1$ necessariamente $f_{it} \leq f_{jt}$. Assim o valor das variáveis f_{it} relaciona-se com a sequência programada em cada linha para cada período de forma crescente desde o primeiro até o último padrão programado.

Finalmente as restrições (3.19) definem o domínio das variáveis. Note que a integralidade da variável y_{it} não é necessária, se a máquina está configurada para um produto específico ao início do primeiro período, no entanto, se esta condição é violada, a restrição de integralidade deve ser incluída.

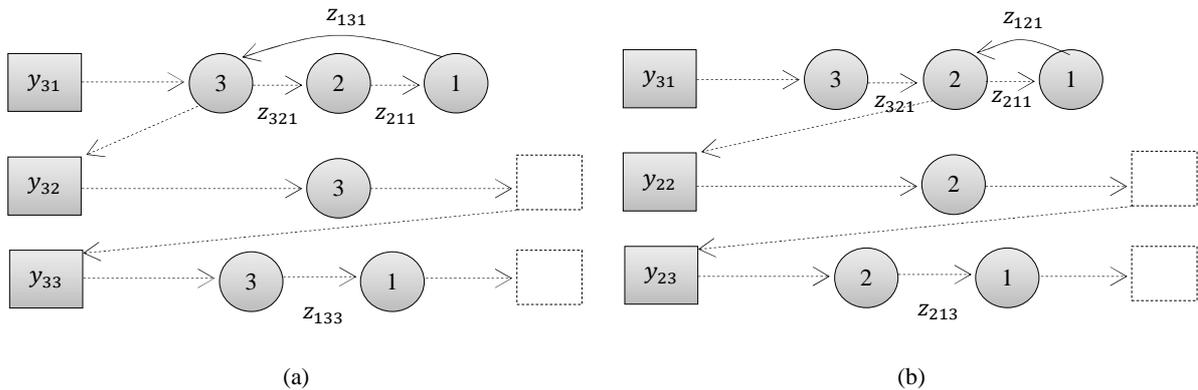
Almada-Lobo et al. (2007) também propõem uma “formulação compacta” que inclui as restrições (3.20) para eliminação de ciclos.

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \notin S} z_{ijt} + \sum_{i \in S} y_{i(t+1)} \geq \sum_{j=1}^N z_{jkt} \quad \forall t = 1, \dots, T, k \in S, S \subseteq [N] \quad (3.20)$$

Em que S representa o subconjunto de itens que formam ciclos desconexos na solução, e $[N] = \{1, \dots, N\}$ representa o conjunto de todos os itens.

Os autores demonstram que a formulação do problema com as restrições (3.20) é mais forte que a formulação (3.12) - (3.19) e possui um número exponencial de restrições. Esta formulação permite aproveitar a capacidade remanescente ao final de determinado período para a realização de atividades de preparação das máquinas, cujo estado é mantido até o seguinte período (*setup carry-over*). No entanto, preparações ao final de um período são permitidas somente para o primeiro produto programado, como ilustrado na Figura 3.4 (a). Observe que nesta figura, no primeiro período a linha encontra-se configurada para o item 3, há uma troca para o item 2, depois para o item 1, que corresponde ao último item programado. A fim de aproveitar a capacidade remanescente, uma troca é realizada para o primeiro produto programado (item 3), e este estado de preparação se mantém até o período seguinte.

Figura 3.4 - Exemplo de possíveis soluções obtidas através do CLSP com *setup* dependente da sequência e *setup carry-over*



As soluções apresentadas na Figura 3.4(a) são permitidas no modelo (3.12) - (3.19). No entanto, soluções como a apresentada na Figura 3.4(b) não são consideradas, pois são impedidas pelas restrições de eliminação de ciclos desconexos (3.18) e (3.20). Estas possíveis soluções (Figura 3.4(b)) representam a situação em que, caso exista uma preparação ao final do período para aproveitamento da capacidade remanescente, esta é realizada para qualquer item diferente do primeiro programado. O Apêndice A- apresenta um exemplo, em que mostra-se que as restrições (3.18) e (3.20) são válidas para soluções como Figura 3.4(a), porém não permitem soluções como as representadas na Figura 3.4(b).

Ainda para o CLSP com *setups* dependentes da sequência, Almada Lobo et al. (2007) propõem um conjunto de desigualdades válidas (3.21) - (3.24), as quais fornecem melhores limitantes para o problema estudado.

$$y_{it} \leq \sum_{j=1/j \neq i}^N z_{ijt} + w_t \quad \forall i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (3.21)$$

$$y_{it} \leq \sum_{j=1/j \neq i}^N z_{ji(t-1)} + w_{(t-1)} \quad \forall i = 1, \dots, N; t = 2, \dots, T \quad (3.22)$$

$$1 - w_t \leq \sum_{i,j=1/j \neq i}^N z_{ijt} \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (3.23)$$

$$w_t \leq 1 - \frac{\sum_{i,j=1/j \neq i}^N z_{ijt}}{N} \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (3.24)$$

em que w_t é uma variável binária que assume o valor de 0, se no mínimo uma preparação é realizada no período t , e $w_t = 1$ se não há preparação nenhuma nesse período.

As restrições (3.21) relacionam o estado de preparação inicial, as trocas ao longo de cada período e a variável w_t , fazendo esta última variável igual 1, no caso em que a linha esteja preparada para o item i no período t , e $\sum_{j=1}^N z_{ijt} = 0$. Da mesma forma, considerando o período imediatamente anterior nas desigualdades (3.22), se $y_{it} = 1$, necessariamente houve uma troca de qualquer outro item j para o item i no período $t-1$ $\left(\sum_{j=1}^N z_{ji(t-1)} = 1 \right)$, ou o estado de preparação foi preservado desde o período $t-1$ ($y_{i(t-1)} = 1$), fazendo $w_{t-1} = 0$. Observe que, no caso em que $\sum_{j=1}^N z_{ijt} = 1$ ou $\sum_{j=1}^N z_{ji(t-1)} = 1$, as restrições (3.21) e (3.22) não são suficientes para fazer $w_t = 0$. Portanto, as restrições (3.23) e (3.24) são impostas.

Outras extensões para o problema de dimensionamento de lotes capacitado podem ser encontradas em Menezes, Clark e Almada-Lobo (2011), em que são considerados tempos e custos de preparação que não obedecem à desigualdade triangular, e *period overlapping setups*.

3.1.2 Problema de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes Geral - GLSP

O Problema de Dimensionamento de Lotes Geral (GLSP) consiste em determinar lotes contínuos de vários produtos e programá-los em uma única linha, sujeito a restrições de capacidade. A primeira formulação é apresentada por Fleischmann e Meyr (1997), em que o horizonte de planejamento formado por T macro-períodos são divididos em um conjunto de

micro-períodos, de longitude variável, em que um único produto pode ser produzido. Considerando os parâmetros e variáveis já definidas, assim como os indicados a seguir, o modelo GLSP é apresentado como segue (FLEISCHMANN; MEYR, 1997).

Índices

s Micro-períodos

Conjuntos

S_t Conjunto de micro-períodos pertencentes ao período t

Parâmetros

S Número de micro-períodos do horizonte de planejamento

lm_i Tamanho do lote mínimo para o produto i (unidades)

c_{ij} Custo de preparação associado à troca do produto i para o produto j

Variáveis

x_{is} Quantidade do item i produzido no micro-períodos

y_{is} Variável binária que toma o valor de 1 se a linha está configurada para o produto i no micro-períodos, ou 0 em caso contrário

z_{ijs} Variável binária que toma o valor de 1 se é realizada uma preparação do item i para o item j , no micro-períodos.

$$\text{Minimizar } \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N h_{it} I_{it} + \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^N c_{ij} z_{ijs} \quad (3.25)$$

Sujeito a:

$$I_{it} = I_{i(t-1)} + \sum_{s \in S_t} x_{is} - d_{it} \quad \forall t = 1, \dots, T; i = 1, \dots, N \quad (3.26)$$

$$\sum_{s \in S_t} \sum_{i=1}^N q_i x_{is} \leq Q_t \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (3.27)$$

$$x_{is} \leq \frac{Q_t}{q_i} y_{is} \quad \forall s = 1, \dots, S; i = 1, \dots, N \quad (3.28)$$

$$x_{is} \geq lm_i (y_{is} + y_{i(s-1)}) \quad \forall i = 1, \dots, N; s = 1, \dots, S \quad (3.29)$$

$$\sum_{i=1}^N y_{is} = 1 \quad \forall s = 1, \dots, S \quad (3.30)$$

$$z_{ijs} \geq y_{i(s-1)} + y_{js} - 1 \quad \forall i, j = 1, \dots, N; s = 1, \dots, S \quad (3.31)$$

$$x_{is}, I_{it}, z_{ijs} \geq 0; y_{is} \in \{0, 1\} \quad \forall t = 1, \dots, T; s = 1, \dots, S; i, j = 1, \dots, N \quad (3.32)$$

A função objetivo (3.25) envolve a minimização dos custos de estocagem e preparação dependentes da sequência. As equações (3.26) correspondem às restrições de atendimento da demanda de cada período, em que são relacionados os níveis de estoque, e a quantidade

produzida em todos os micro-períodos pertencentes ao período de tempo em particular. As restrições de capacidade são representadas pelas desigualdades (3.27). As restrições (3.28) e (3.30) expressam que a produção de um item só acontece se a linha está configurada para o respectivo produto e um e somente um estado de preparação é definido em cada micro-período. Uma vez que o tamanho dos micro-períodos s é determinada pela quantidade produzida, micro-períodos com tamanho zero são permitidos. As restrições (3.29) definem lotes mínimos para evitar trocas no estado de preparação sem trocas no produto, o que implicaria uma avaliação errada dos custos de preparação na solução ótima, quando os custos de preparação não satisfazem a desigualdade triangular. As restrições (3.31) estabelecem a ligação das variáveis que representam o estado de preparação e as variáveis de troca entre os produtos. Finalmente as restrições (3.32) definem o domínio das variáveis.

Fleischmann e Meyr (1997) apresentam também as restrições adicionais (3.33) e (3.34) para o modelo anterior, a fim de evitar redundâncias quanto à designação de vários micro-períodos para um mesmo produto, no mesmo macro-período. Alterações no modelo para considerar o caso em que o estado de preparação do último item produzido não é preservado também são propostas.

$$\sum_{i,j,i \neq j}^N z_{ij(s-1)} \geq \sum_{i,j,i \neq j}^N z_{ijs} \quad \forall t=1,\dots,T; s=(f_t+2),\dots,l_t \quad (3.33)$$

$$x_{js} \leq \frac{Q_t}{q_t} \left(2 - \sum_{i=1}^N z_{ij(s-1)} - z_{jjs} \right) \quad \forall t=1,\dots,T; j=1,\dots,N; s=(f_t+1),\dots,l_t \quad (3.34)$$

em que f_t corresponde o primeiro micro-período do período t , e l_t corresponde ao último micro-período do período t .

Algumas extensões em relação ao GLSP tem sido abordadas em diferentes trabalhos. Koçlar e Süral (2005) asseguram que o modelo proposto por Fleischman e Meyr (1997) é limitado ao caso em que o estado de preparação é preservado entre dois períodos consecutivos, somente se a capacidade do período precedente é maior ou igual ao tamanho de lote mínimo. Estes autores propõem novas restrições para a generalização do modelo, em relação à conservação do estado de preparação. Meyr (2002) propõe o modelo GLSP para máquinas paralelas não homogêneas, considerando tempos de preparação dependentes da sequência. Fandel e Stammen-Hegene (2006) estendem o GLSP para múltiplos níveis e múltiplas linhas de produção.

Ferreira et al. (2012) apresentam formulações baseadas no GLSP e ATSP (*Assimetric Traveling Salesman Problem*) para o planejamento e programação da produção na indústria de bebidas. Nesse trabalho são apresentadas duas variantes do GLSP, uma delas relacionada à substituição das restrições (3.31) da formulação clássica, pelas restrições (3.35), (3.36) e (3.37).

$$\sum_{i=1}^N z_{ijs} \leq y_{js} \quad \forall j = 1, \dots, N; s = 1, \dots, S \quad (3.35)$$

$$y_{i(s-1)} = \sum_{j=1}^N z_{ijs} \quad \forall i = 1, \dots, N; s = 1, \dots, S \quad (3.36)$$

$$\sum_{i=1}^N z_{ijs} = y_{js} \quad \forall j = 1, \dots, N; s = 1, \dots, S \quad (3.37)$$

onde, S representa o número de micro-períodos. A variável z_{ijs} indica se há ou não uma troca do item i para o item j , no micro-período s . A variável y_{is} indica se a máquina está ou não configurada para a produção do item i no micro-períodos.

Este conjunto de restrições ((3.35) - (3.37)) implica na geração de melhores limitantes para o problema em estudo. As restrições (3.35) relacionam os estados de preparação de cada micro-período, com as variáveis de troca. As restrições (3.36) relacionam o estado de preparação de um determinado micro-período, com as preparações no período seguinte, de modo que, se $y_{i(s-1)} = 1$, logo $\sum_{i=1}^N z_{ijs} = 1$, permitindo $z_{iis} = 1$ nos casos em que o estado de preservação permanece até o próximo período $y_{is} = 1$, sem incorrer em tempos nem custos de preparação adicionais, pois $st_{ii} = 0$ e $c_{ii} = 0$ (onde st_{ij} representa os tempos de preparação dependentes da sequência). Finalmente as restrições (3.37) relacionam as preparações realizadas em determinado micro-período com o estado de preparação do mesmo, de modo que as restrições (3.36) e (3.37) garantem o fluxo de configurações das linhas de produção, e a preservação do estado de preparação entre os micro-períodos e macro-períodos de tempo.

3.2 Dimensionamento de lotes e programação da produção em diferentes setores industriais.

Diversos são os trabalhos encontrados na literatura relacionados aos problemas de dimensionamento de lotes e programação da produção, que tratam estes problemas em situações reais de diferentes setores industriais no mundo, especialmente no Brasil. Várias

aplicações nas indústrias de bebidas, fundição, alimentícia, entre outras, tem sido objeto de estudo dos problemas de dimensionamento de lotes. Estas aplicações contribuem significativamente para a formulação e resolução destes problemas, de modo que os modelos sejam cada vez mais representativos para situações reais e a sua resolução seja eficiente do ponto de vista prático.

Nesta seção é apresentada uma breve descrição dos trabalhos mais recentes relacionados aos problemas de dimensionamento de lotes em diferentes setores industriais. As principais características quanto à modelagem e formulações propostas apresentadas nos trabalhos descritos a seguir, são apresentadas também de forma consolidada na Tabela 3.1 ao final desta seção.

Indústria de fumo

Pattloch, Schmidt e Kovalyov (2001), abordam o problema de dimensionamento de lotes e programação da produção em uma indústria de fumo, estudando particularmente uma fábrica produtora de vários tipos de cigarro. A formulação proposta pelos autores visa à minimização dos custos de troca envolvidos na produção de múltiplos produtos, e tem uma estrutura similar à formulação para o CSLP. No modelo é considerado um sistema de produção de múltiplas máquinas paralelas idênticas com capacidade limitada, em que a demanda das tarefas e a capacidade de produção estão relacionadas aos prazos de entrega. Cada tarefa é considerada como um lote de cigarros do mesmo tipo, que não pode ser particionado em sub-lotes produzidos separadamente devido às restrições tecnológicas do sistema, de modo que uma tarefa pode ser vista como um lote mínimo de produção. Os autores propõem quatro diferentes heurísticas para o caso de uma única máquina, das quais duas são também aplicados ao caso de múltiplas máquinas. No caso de múltiplas máquinas, uma das heurísticas é comparada com o planejamento realizado na fábrica em estudo. Esta comparação mostra que o método é capaz de gerar soluções em um tempo menor, sendo que o plano de produção gerado pela heurística é aproximadamente de 20% a 40% melhor do que o utilizado na empresa em termos de trocas entre os trabalhos.

Indústria de grãos eletrofundidos

Luche e Morabito (2005) apresentam um estudo de caso na indústria de grãos eletrofundidos. Os autores apresentam uma ampla descrição da indústria sob estudo e apresentam uma formulação para o planejamento e programação da produção que combina modelos de seleção de processos e dimensionamento de lotes, cuja estrutura assemelha-se ao

problema CSLP. O processo de produção consiste na transformação de matérias primas através de processos de mistura, aquecimento, separação, britagem, moagem, separação magnética, classificação e empacotamento. As principais decisões envolvidas no planejamento se relacionam com os níveis de estoque de matérias primas e produtos intermediários e com a programação dos fornos e processos subsequentes como britagem, moagem e classificação, tudo em função da demanda de produtos finais. A maior dificuldade encontra-se na programação da classificação dos grãos, que é feita por um conjunto de peneiras vibratórias que separam os grãos por tamanho, e que deve ser realizada em conjunto com a programação dos fornos. Cada conjunto de peneira combinado com a regulação dos moinhos e britadores é considerado um processo diferente, através dos quais podem ser obtidos vários produtos, ou seja, vários quilos de cada tipo de grão. A seleção dos processos a serem utilizados é importante no sentido de que os custos de produção e recursos de produção dependem desta escolha. Neste contexto, o planejamento e a programação da produção deste sistema de produção envolve a determinação das quantidades a serem produzidas de cada tipo de grão, a escolha dos processos a serem utilizados para a obtenção dos produtos, e a sequência em que estes serão programados.

Neste trabalho os autores apresentam duas propostas de modelagem: a primeira minimiza o número de períodos necessários para a produção dos itens demandados, e a segunda minimiza os atrasos no atendimento da demanda (*backlogging*). Estes modelos consideram tempos de preparação dependentes da sequência em que são programados os processos, e são testados em diferentes instâncias fictícias e reais, evidenciando que os modelos propostos são capazes de gerar soluções melhores do que as utilizadas pela empresa. Posteriormente, Luche, Morabito e Pureza (2009) propõem uma heurística construtiva para o mesmo problema do estudo de caso na indústria de grãos eletrofundidos, que demonstra a sua capacidade de resolver o problema de forma eficiente em um conjunto de instâncias criadas a partir de informações de uma fábrica pertencente ao setor.

Indústria têxtil

Silva e Magalhães (2006) apresentam o problema de dimensionamento de lotes e programação da produção em uma empresa que produz fibras acrílicas para a indústria têxtil. Este problema tem uma estrutura similar ao DLSP, no entanto, considera um sistema de máquinas paralelas e apresenta uma particularidade relacionada aos tempos de preparação entre produtos, em que as trocas entre lotes do mesmo tipo de produto são permitidas devido ao desgaste das ferramentas. As fibras acrílicas são obtidas em três etapas: preparação da

pasta, fiação e corte. Na etapa de fiação, a pasta produzida é forçada a passar através de um conjunto de fiandeiras, gerando assim um conjunto de filamentos que posteriormente são lavados, secados e submetidos a um tratamento térmico. Já na etapa de corte e empacotamento os filamentos são cortados e dispostos em uma embalagem para serem expedidos. O produto obtido até a etapa de fiação é chamado de reboque e pode ser vendido para a indústria de lã, entretanto o produto obtido até a etapa de corte e empacotamento é chamado de produto bruto e é utilizado na indústria de algodão.

A principal dificuldade para o planejamento e programação deste sistema encontra-se na unidade de fiação. Neste sistema, aproximadamente 60 tipos diferentes de fibras são produzidos em 10 máquinas paralelas, as quais produzem um conjunto de fibras em diferentes taxas de produção, portanto são dedicadas e não relacionadas. Alguns produtos, embora sejam considerados diferentes, utilizam o mesmo ferramental na etapa de fiação requerendo somente uma pequena configuração na máquina, sem necessidade de parar seu funcionamento. Portanto, as trocas neste sistema ocorrem sempre entre dois produtos que requerem diferentes ferramentais de fiação, ou entre dois produtos iguais, pois os ferramentais acoplados no sistema de fiação geralmente tem uma vida útil de 8 a 45 dias. O objetivo do problema consiste em minimizar o número de trocas realizado no sistema e os atrasos na entrega dos produtos.

Para solucionar o problema descrito, os autores desenvolvem um algoritmo específico que utiliza regras clássicas de sequenciamento para o problema em particular, o qual é posteriormente implementado em um sistema de apoio à decisão de programação da produção (SDSS) para ser testado na empresa. Os resultados deste sistema na fase de teste demonstraram um melhoramento nos planos de produção, de modo que estes são obtidos em um menor tempo e envolvem um número menor de trocas e atrasos na entrega dos produtos, em comparação com os planos implementados habitualmente na companhia.

Indústria de iogurtes

Marinelli, Nenni e Sforza (2007) abordam o problema de dimensionamento de lotes e programação da produção em uma empresa que empacota iogurtes em embalagens de vidro. O sistema de produção é caracterizado como um sistema *flow-shop* e compreende as seguintes etapas: (i) entrada de materiais e alimentação, em que as matérias primas são colocadas em um tanque de armazenagem que por sua vez permite operações de controle de qualidade; (ii) acondicionamento, em que a mistura do produto é vertida em recipientes de vidro; (iii) amadurecimento, em que a mistura do produto é amadurecida em células termo estáticas que

permitem a proliferação de enzimas; e, (iv) a etapa de estabilização, em que o produto é refrigerado durante 24 horas para estabilizar os níveis de acidez.

O sistema de produção compreende várias linhas de produção paralelas não relacionadas, que podem ser abastecidas por qualquer dos tanques de armazenagem disponíveis sem custo adicional. O planejamento e programação da produção é feito em dois estágios: a armazenagem, que se refere aos tanques de armazenagem onde um único tipo de mistura pode ser designado por período, permitindo o uso parcial ou total da capacidade do tanque; e o estágio de processamento, onde a produção de vários itens pode ser programada ao longo de um período de tempo dividido em vários micro-períodos.

Para abordar este problema os autores propõem um modelo híbrido desenvolvido a partir das formulações baseadas no Problema de Dimensionamento de Lotes Capacitado (CLSP) e o Problema de Dimensionamento de Lotes com Setup Contínuos (CSLP), para os estágios de armazenagem e processamento, respectivamente. Esta formulação considera tempos e custos de *setup* independentes da sequência, tanto no estágio de armazenagem como no estágio de processamento, e é resolvida através de um pacote comercial para um conjunto de instâncias criadas a partir de dados históricos reais. Várias relaxações do modelo proposto e uma heurística de dois estágios também são apresentadas, as quais resolvem o problema estudado de forma efetiva.

Indústria de papel

Bouchriha, Ouhimmou e D'Amours (2007) abordam o problema de dimensionamento de lotes para a definição de programas de produção em uma fábrica de papel, cuja estrutura assemelha-se ao problema de dimensionamento de lotes discreto (DLSP). Na indústria de papel e celulose a produção é geralmente planejada dentro de campanhas de duração fixa, chamadas tempos de ciclos. Nestas campanhas, os volumes de produção, ou seja, o dimensionamento de lotes é efetuado de modo a atender os requerimentos da demanda. Geralmente, na fabricação de papel os produtos são produzidos do papel mais leve, para o papel de maior peso, portanto a programação de seus produtos segue esta sequência específica. Desta forma, o trabalho aborda o planejamento e programação da produção de múltiplos itens dentro de um horizonte de planejamento discreto, de modo atender os requerimentos de demanda sem atraso, em que uma sequência de produção predeterminada deve ser mantida, e considerando tempos e custos de preparação dependentes da sequência.

Para abordar este problema os autores desenvolvem um método de solução de três passos. No primeiro passo é definida a duração do tempo de ciclo, considerando as previsões

de demanda média ao longo de um ano. No segundo passo é determinado o plano de produção considerando o tempo de ciclo fixo já definido, obtendo assim um limitante superior para os custos envolvidos na produção do papel. Finalmente no terceiro passo, o plano de produção é avaliado considerando também as previsões de demanda, porém o tempo de ciclo definido não é considerado e os custos de *setup* são incluídos, obtendo assim um limitante inferior para os custos de produção envolvidos. Os modelos de dimensionamento de lotes implementados para a determinação dos planos de produção visam à minimização dos custos totais de produção, estoque, e preparação da máquina. O método proposto foi implementado e validado em uma fábrica de papel e celulose canadense, conseguindo definir tempos de ciclo e tamanhos de lote ótimos a ser produzidos, considerando as particularidades do sistema de produção estudado.

Santos e Almada-Lobo (2012) também abordam o planejamento e programação da produção na indústria de papel e celulose. O processo de produção envolve vários níveis que representam diferentes processos como a produção de polpa, produção de papel e geração de energia. No primeiro nível, a matéria prima (aparas de madeira, água e outros componentes) é misturada no equipamento apropriado para a obtenção de polpa “virgem” e “reciclada”, necessária para a produção de papel, e o “líquido preto”, decorrente deste processo, que é posteriormente vaporizado e convertido em energia. No segundo nível, as polpas (virgem e recicladas) são misturadas e convertidas em papel de diferentes tipos. Os tipos de papel diferenciam-se pela gramatura, a incorporação de água e polpa. No terceiro nível, o “líquido preto” resultante do primeiro estágio passa através de uma série de passos intermediários, de modo que seja convertido em vapor, que é diretamente usado para a secagem do papel, ou para a produção de energia elétrica. Os autores propõem uma formulação baseada no GLSP, que representa as decisões representativas do sistema de produção estudado em cada nível, assim como a sincronia das mesmas em todos os estágios.

Setor de fundição

Araujo, Arenales e Clark (2007) tratam os problemas de dimensionamento de lotes e programação da produção no setor de fundições. Este problema envolve a tomada de decisão em dois níveis: o primeiro relacionado com a produção e preparação dos materiais principais; e, o segundo relacionado com a transformação destes nos diferentes produtos finais. Neste sistema de produção, um produto só pode ser manufaturado em um período de tempo específico se e somente se os materiais necessários para sua fabricação são manufaturados no mesmo período de tempo, de modo que nenhum material processado pode ser estocado de um

período para outro. Um único material pode ser processado por período de tempo, os atrasos na demanda são permitidos, e os tempos e custos de preparação na troca de um material para outro são também considerados.

Duas formulações representativas do problema são apresentadas. A primeira consiste em um modelo global baseado no GLSP, que considera as particularidades do sistema de produção descritas. A segunda inclui todas as particularidades do sistema considerando um horizonte de planejamento rolante. O problema é resolvido satisfatoriamente de forma exata somente para pequenas instâncias, portanto estratégias baseadas na heurística *Relax - and - Fix* e variantes do algoritmo de Busca Local também foram propostas. As formulações e os métodos estudados foram testados sobre um conjunto de instâncias características dos sistemas de produção do setor de fundições, e comparados com os métodos de programação criados manualmente pela fundição que motivou a pesquisa. Os resultados do trabalho demonstram que as formulações apresentadas, e particularmente os métodos de Busca Local são capazes de gerar soluções de boa qualidade para o dimensionamento e sequenciamento de lotes nos problemas práticos relacionados ao setor de fundições.

Indústrias de bebidas

Diversos trabalhos na literatura tratam o problema de dimensionamento de lotes e programação na indústria de bebidas: Toledo et al. (2007); Ferreira, Morabito e Rangel (2009); Ferreira, Morabito e Rangel (2008; 2009; 2010); Toledo et al. (2009); Toledo, Arantes e França (2011) e Ferreira et al. (2012).

Toledo et al.(2007) abordam o problema de dimensionamento de lotes e programação da produção em uma fábrica de refrigerantes. Neste tipo de indústria a produção envolve dois níveis interdependentes com decisões relativas à armazenagem das matérias primas e ao engarrafamento das bebidas. A combinação do tipo de xarope armazenado, que escoia dos tanques, com o tipo de envase realizado nas linhas de produção resulta na bebida ou produto final. As decisões neste sistema de produção envolvem: o dimensionamento e a programação dos xaropes em um primeiro nível e o dimensionamento e programação das bebidas ou produtos finais no segundo nível. No primeiro nível define-se quanto e quando determinado xarope será armazenado em cada um dos tanques. Entretanto, no segundo nível decide-se quanto e quando determinado produto será colocado em produção nas linhas de engarrafamento.

Neste trabalho são incluídas as principais particularidades do sistema de produção de bebidas, como por exemplo: quantidade mínima de armazenagem de xarope nos tanques; um

único xarope pode ser armazenado por vez; a troca de xarope nos tanques requer operações de limpeza, as quais representam um determinado tempo e custo que depende da sequência em que estes xaropes são programados; o sistema de tanques pode suprir qualquer das linhas do sistema de engarrafamento, no qual cada linha pode ser suprida por vários tanques, uma vez que contenham o mesmo xarope; as linhas de engarrafamento podem realizar mais de um tipo de envase por vez; as linhas de produção devem ser preparadas cada vez que o tipo de xarope no estágio de armazenagem seja trocado; os tempos e custos de preparação são dependentes da sequência; e, as linhas de engarrafamento são consideradas não relacionadas.

O modelo apresentado por Toledo et al. (2007) utiliza elementos das formulações do GLSP e do Problema Contínuo de Dimensionamento de Lotes (PCDL), em que o horizonte de planejamento é dividido em micro-períodos de tamanho fixo, cada um dos quais tem associado um número máximo de lotes tanto para os tanques como para as linhas. A formulação proposta envolve um amplo conjunto de variáveis e parâmetros, que tornam a modelagem do problema complexa e a sua resolução em forma exata viável somente para um conjunto de instâncias de pequeno porte. Para instâncias de maior porte, os autores apresentam três estratégias de relaxação para resolver o problema, nas quais escolhem certos grupos de variáveis binárias para serem relaxadas. No entanto, esta alternativa não se mostrou viável, pois ainda assim houve dificuldades em retornar soluções factíveis. 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).

Ainda aplicado à indústria de bebidas, Ferreira, Morabito e Rangel (2009) apresentam diferentes abordagens para a resolução dos problemas de dimensionamento de lotes e programação da produção em uma fábrica de bebidas que compreende dois níveis: preparação do xarope e engarrafamento, como o sistema estudado por Toledo et al. (2007). A formulação apresentada pelos autores considera as mesmas particularidades já descritas no trabalho de Toledo et al. (2007) relacionadas aos sistemas de produção na indústria de bebidas. No entanto, Ferreira, Morabito e Rangel (2009) apresentam uma formulação do problema menos complexa, visto que simplifica algumas das considerações feitas na modelagem de Toledo et al. (2007). A formulação proposta também é baseada no GLSP, o principal diferencial relaciona-se com o fato de que cada linha de engarrafamento tem um tanque de preparação de xarope dedicado, e que em cada tanque pode ser preparado qualquer dos tipos de xarope

requerido pela linha de engarrafamento. Da mesma forma, diferente ao trabalho de Toledo et al. (2007), o tamanho dos micro-períodos é flexível e seu tamanho depende do tamanho do lote do produto.

Em vista da dificuldade de resolver a formulação proposta via métodos exatos, Ferreira, Morabito e Rangel (2009) indicam várias estratégias de solução aproximadas. A primeira delas corresponde a um enfoque de relaxação, cuja idéia básica é assumir que o estágio de preparação do xarope não representa o gargalo do sistema, ou seja, a capacidade do tanque de preparação do líquido é suficientemente grande para suprir o estágio de engarrafamento. Portanto, apenas as decisões relacionadas ao segundo estágio são necessárias para abordar o planejamento e programação da produção do sistema completo. Uma segunda abordagem corresponde às estratégias *Relax-and-Fix*, em que são apresentados vários critérios para dividir o conjunto de variáveis inteiras relacionadas ao estado de preparação das linhas e às trocas entre produtos, assim como diferentes critérios para fixar os subconjuntos gerados. As estratégias de solução foram testadas e analisadas para diferentes instâncias reais de uma indústria de bebidas, evidenciando que a proposta do enfoque de relaxação e as várias estratégias *Relax-and-Fix* são capazes de fornecer melhores soluções que as praticadas pela empresa estudada.

Ferreira et al. (2012) propõem quatro formulações monoestágio baseadas nas formulações do Problema de Dimensionamento de Lotes e Programação da Produção Geral (GLSP) e no Problema do Caixeiro Viajante Assimétrico (ATSP) para o problema de dois níveis estudado no trabalho anterior. Os seus resultados evidenciam vantagens dos modelos monoestágio, em comparação com as formulações de múltiplos níveis apresentadas em Ferreira, Morabito e Rangel (2009), além da superioridade nos tempos de execução quando utilizada as formulações baseadas no Caixeiro Viajante Assimétrico.

Indústria de Vidro

Almada-Lobo, Oliveira e Carravilla (2008) tratam o problema de planejamento e programação da produção na indústria de recipientes de vidro. O sistema de produção nesta indústria compreende múltiplas facilidades, cada uma das quais possui um conjunto de fornos onde é produzida a pasta de vidro requerida para atender a demanda. A pasta de vidro é distribuída para um conjunto de máquinas de moldagem paralelas que dão forma aos produtos finais, sendo que cada máquina de moldagem possui características diferentes, limitando o conjunto de produtos que podem ser processados em cada uma delas. Somente uma cor para os recipientes de vidro pode ser produzida nos fornos em qualquer instante de tempo, assim

como nas máquinas de moldagem. Após este procedimento, os produtos obtidos na moldagem passam através de outro forno para reaquecimento, sendo inspecionados e posteriormente dispostos em paletes.

Para este problema os autores propõem um modelo que pode ser considerado uma extensão do CLSP, para uma única máquina e tempos de preparação dependentes da sequência, os quais são consideravelmente grandes nesta atividade de produção. O objetivo é otimizar uma função ponderada, que considera a minimização dos tempos de preparação dependentes da sequência, o estoque médio e o número de itens faltantes na demanda.

Inicialmente o problema foi resolvido através de um pacote comercial. No entanto, para instâncias do tamanho considerado no estudo de caso, o modelo não foi resolvido de forma ótima. Desta forma, os autores apresentam três variantes da heurística VNS (*Variable Neighbourhood Search*): as versões básicas da heurística VNS e RVNS (*Reduced Variable Neighbourhood Search*), e uma variante RVNS/VNS. Estes métodos foram testados a partir de diferentes soluções iniciais, obtendo como resultado que a heurística VNS básica é sempre superior à heurística RVNS, e quase sempre que a RVNS/VNS.

Indústria de nutrição animal

Toso, Morabito e Clark (2009) abordaram o dimensionamento de lotes e programação da produção na indústria de nutrição animal. Apesar do processo de produção compreender várias etapas, este é considerado monoestágio e ocorre em bateladas, que representam a unidade de produção, independente de seu tamanho. As demandas por produto são agregadas e aproximadas pelos múltiplos dos tamanhos das bateladas, portanto, a quantidade produzida é uma variável inteira. Na modelagem é considerada a agregação dos produtos em famílias, em que cada família só tem produtos com características comuns e pertencentes ao mesmo grupo de contaminação. Os tempos de preparação entre produtos de diferentes famílias são dependentes da sequência, e não obedecem à desigualdade triangular. A definição de tamanhos de lote mínimo e decisões relacionadas à utilização de horas extras também são consideradas para modelagem representativa do problema.

Além de apresentar uma caracterização do processo produtivo em uma fábrica de rações, neste trabalho são propostas duas formulações baseadas no GLSP. O primeiro modelo apresentado assume uma limpeza da linha ao final de cada período, portanto a programação dos lotes entre o final de um período e o início do próximo é independente da sequência. O segundo modelo representa o caso em que não há tempo suficiente para as atividades de limpeza ao final de cada período, de modo que existe relação dependente da sequência entre

estes. Para a resolução do problema inicialmente os modelos são resolvidos de forma exata, envolvendo grandes tempos computacionais para a sua resolução, motivando assim o uso alternativo de duas variações da heurística *Relax-and-Fix* testadas sobre um conjunto de instâncias criadas a partir de dados reais. Os resultados computacionais evidenciam que as alternativas propostas superam substancialmente os planos de produção praticados pela empresa. Em Clark, Morabito, Toso (2010) foi proposta uma formulação alternativa baseada no Problema do Caixeiro Viajante Assimétrico (ATSP), que inclui a possibilidade de atrasos na demanda para o mesmo estudo de caso, assim como um método iterativo de eliminação de sub-rotas e uma heurística de *patching*.

Indústria química

Transchel et al. (2011) apresentam várias formulações para o problema de dimensionamento de lotes e programação da produção na indústria química. O processo de produção estudado consta de dois níveis: no primeiro são produzidos os produtos de forma agregada; e no segundo nível, os produtos produzidos no nível anterior são desagregados em diferentes itens que se diferenciam pela embalagem. Cada item obtido no segundo estágio possui diferente margem de lucro, custos de estocagem e custos de penalização por perda de vendas, e a sua produção envolve tempos e custos de preparação dependentes da sequência produtiva. Inicialmente os autores propõem um modelo híbrido baseado no GLSP que combina estruturas de tempo discreto e contínuo, a fim de maximizar o lucro total considerando custos de penalização por perda de venda, custos de estocagem e custos de preparação dependentes da sequência produtiva.

A fim de comparar a efetividade da formulação clássica baseada no GLSP, os autores apresentam duas reformulações para o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes na indústria química. O primeiro, denominado “Problema de transporte baseado em quantidade (QTP)”, baseia-se no clássico problema de transporte, e desagrega as variáveis de produção de cada período em variáveis relacionadas ao tamanho da demanda desse período. A segunda formulação, denominada “Problema de transporte proporcional” também desagrega as variáveis de produção, porém segundo a sua proporção em relação à demanda total. Tanto a modelagem clássica, como as reformulações baseadas no problema de transporte foram testadas sobre um conjunto de dados de uma indústria em particular pertencente ao setor químico.

A Tabela 3.1 resume os principais trabalhos que abordam o dimensionamento de lotes e programação da produção em diferentes contextos industriais, e as principais características

das formulações propostas. A primeira coluna indica o tipo de indústria estudada, a segunda cita os principais e mais recentes trabalhos desenvolvidos neste tipo de indústria, e a terceira coluna indica as principais características das formulações propostas.

Tabela 3.1 - Dimensionamento e sequenciamento de lotes em diferentes setores industriais

TIPO DE INDÚSTRIA	REFERÊNCIA	TIPO DE FORMULAÇÃO	PRINCIPAIS CONSIDERAÇÕES
Indústria de fumo	Pattloch, Schmidt e Kovalyov (2001).	<i>Small bucket</i> , monoestágio e múltiplas máquina. (Baseado no CSLP)	Minimização do número de trocas ao longo do horizonte de planejamento. Estoque de produto em processo. Horizonte de planejamento dividido em ITU (Intervalos de Tempo Unitário).
Indústria de grãos eletrofundidos.	Luche, Morabito e Pureza (2009).	<i>Small bucket</i> , monoestágio e única máquina. (Baseado no CLSP)	Minimização de faltantes na demanda. Permissão de faltantes e excesso no atendimento da demanda. Tempos de preparação não dependentes da sequência. Dimensionamento de lotes de processo.
	Luche e Morabito (2005)	<i>Small bucket</i> , monoestágio e única máquina (Baseado no CLSP)	Minimização do número de períodos necessários para a produção dos itens demandados. Minimização dos atrasos na demanda. Permissão de atrasos e excessos no atendimento da demanda. Tempos de preparação não dependentes da sequência.
Indústria têxtil	Silva e Magalhaes (2006).	<i>Small bucket</i> , monoestágio, e múltiplas máquinas. (Baseado no modelo DLSP)	Minimização do número de preparações realizadas nas máquinas. Permissão de <i>backlogging</i> . Máquinas paralelas não relacionadas e dedicadas. Preparações entre itens iguais, devido ao desgaste de ferramentas. Preparações não dependentes da sequência.
	Camargo (2012)	<i>Big bucket</i> , múltiplos estágios e múltiplas máquinas. (Baseado no MSGLSP - <i>Multi-Stage General Lot Sizing Problem</i>)	Minimização dos custos de preparação, estocagem e <i>backlogging</i> . Tempos e custos de preparação dependentes da sequência. Múltiplas máquinas. Produtos agrupados em famílias. Permissão de <i>backlogging</i> . Lote máximo de produto.
Indústria de Iogurtes.	Marinelli, Nenni e Sforza (2007).	Formulação dois estágios: <i>small bucket</i> no primeiro, e <i>big bucket</i> no segundo, múltiplas máquinas no segundo estágio. (Baseado no CLSP e CSLP)	Minimização dos custos de preparação nos dois estágios, custos de estocagem e custos de processamento. Tempos e custos de preparação não dependentes da sequência nos dois estágios.
Indústria de papel	Bouchriha, Ouhinmou e D'amours (2007)	<i>Small bucket</i> , monoestágio, e única máquina. (Baseado no DLSP).	Minimização dos custos de estocagem, preparação, e produção. Níveis de estoque de segurança. Custos e tempos de preparação não dependentes da sequência.
	Santos e Almada-Lobo (2012).	<i>Big bucket</i> , múltiplos estágios (considera-se 3 níveis de decisão), e única máquina. (Baseado no GLSP).	Otimização dos custos de estocagem, <i>backlogging</i> e preparações (no segundo estágio), e quantidade produzida (no primeiro estágio). Lote mínimo e máximo. Permissão de <i>backlogging</i> . Tempos e custos de preparação dependentes da sequência (segundo estágio). Níveis de estoque mínimo e máximo (terceiro estágio). Sincronização entre todos os estágios
Indústria de fundições	Santos-Meza, Santos e Arenales (2002).	Formulação 1: <i>Big bucket</i> , único nível, e máquinas paralelas. (Baseado no CLSP) Formulação 2: <i>Small bucket</i> , único nível, e máquinas paralelas. (Baseado no CSLP)	Formulação 1: Minimização do custo de produção. Máquinas paralelas. Formulação 2: Minimização do custo de produção. Produtos com demanda dependente. máquinas paralelas
	Araujo, Arenales e Clark (2004).	<i>Small bucket</i> , monoestágio, e única máquina.	Minimização das penalidades por produto em atraso, produto antecipado e custos de preparação. Permissão de <i>backlogging</i> e antecipação na entrega dos produtos. Extensões do modelo para um horizonte de tempo rolante.
	Araujo, Arenales e Clark (2007).	<i>Big bucket</i> , monoestágio, e única máquina. (Baseado no GLSP)	Minimização dos custos de estocagem, <i>backlogging</i> e preparação. Custos e tempos de preparação não dependentes da sequência. Permissão de <i>backlogging</i> . Produtos agrupados em famílias. Micro-períodos com tamanho fixo. Extensões do modelo para um horizonte de planejamento rolante.
	Hans e Van de Velde (2011).	<i>Big bucket</i> , único nível, e única máquina.	Minimização do desvio da quantidade de matéria prima utilizada, em relação ao nível médio de consumo estimado. Lote mínimo. Tempos de preparação não dependentes da sequência. Número máximo de trocas por período. <i>Setup carry-over</i> . Restrições fracas (restrições que podem ser relaxadas com penalidades associadas).

Indústria de Vidro	Almada-Lobo, Oiveira e Carravilla (2008).	<i>Big bucket</i> , dois estágios, múltiplas máquinas no segundo estágio (baseado no modelo CLSP).	Minimização da somatória ponderada do desperdício envolvido nas preparações, os níveis de estoque médio, e as faltantes na demanda. Permissão de <i>backlogging</i> . Tempos de preparação dependentes da sequência.
Indústria de bebidas	Ferreira, Morabito e Rangel (2008)	<i>Big bucket</i> , monoestágio e única máquina. (Baseado do GLSP)	Minimização dos custos de <i>backlogging</i> , estoque e preparação dependentes da sequência. Permissão de <i>backlogging</i> . Tempos e custos de preparação dependentes da sequência. Lote mínimo e lote máximo de produção.
	Ferreira, Morabito e Rangel (2009).	<i>Big bucket</i> , dois estágios, e múltiplas máquinas nos dois estágios. (Baseado no GLSP)	Minimização dos custos de estocagem, custos de preparação dependentes da sequência e <i>backlogging</i> . Permissão de <i>backlogging</i> . Lote mínimo e máximo. Tempos e custos de preparação não nulos entre produtos iguais nos dois estágios. Tempos e custos de preparação dependentes da sequência nos dois estágios.
	Ferreira, Morabito e Rangel (2010).	<i>Big bucket</i> , monoestágio, e única máquina. (Baseado no GLSP)	Minimização os custos de estocagem, custos de preparação dependentes da sequência e <i>backlogging</i> . Lote mínimo e máximo de produção. Permissão de <i>backlogging</i> . Tempos e custos de preparação dependentes da sequência e que obedecem à desigualdade triangular.
	Ferreira et al. (2012)	Formulação 1 e 2: <i>Big bucket</i> , monoestágio, e de múltiplas máquinas. (Baseado no GLSP) Formulação 3 e 4: <i>Big bucket</i> , monoestágio, e de múltiplas máquinas. (Baseado no ATSP)	Formulação 1 e 2: Minimização dos custos de estocagem, custos de preparação dependentes da sequência e <i>backlogging</i> . Lote mínimo. Permissão de <i>backlogging</i> . Tempos e custos de preparação dependentes da sequência e que obedecem à desigualdade triangular. Tempos e custos de preparação não nulos entre produtos iguais. As duas formulações diferenciam-se pela reformulação das restrições de sequenciamento, para a obtenção de melhores limitantes. Formulação 3 e 4: Apresentam o mesmo objetivo e considerações que as formulações 1 e 2, diferenciando-se entre elas nas restrições de eliminação de ciclos desconexos no sequenciamento dos produtos.
Indústria de nutrição animal	Toso, Morabito e Clark (2009).	<i>Big bucket</i> , único estágio, e única máquina. (Baseado no modelo GLSP)	Minimização dos custos de estocagem e utilização de capacidade extra. Lote mínimo. Tempos de preparação dependentes da sequência e que não obedecem à desigualdade triangular. O tamanho dos lotes é uma quantidade inteira. Produtos agrupados em família. Permissão de capacidade extra.
	Clark, Morabito e Toso (2010).	<i>Big bucket</i> , único estágio, e única máquina. (Baseado no modelo ATSP).	Minimização dos custos de estocagem, <i>backlogging</i> , e utilização de capacidade extra. Lote mínimo. Permissão de capacidade extra e <i>backlogging</i> . Produtos agrupados em família. Tempos de preparação dependentes da sequência e que não obedecem à desigualdade triangular.
Indústria química	Transchelet al. (2009)	<i>Big bucket</i> , único estágio, e única máquina. (Baseado no modelo GLSP).	Minimização do lucro total, considerando receita, custos de preparação, estocagem e <i>backlogging</i> . Permissão de <i>backlogging</i> . Lote mínimo. Custos de preparação dependentes da sequência.

4. MODELAGEM DO PROBLEMA

Neste capítulo são apresentadas duas abordagens para tratar o problema de dimensionamento de lotes e programação da produção na indústria de embalagens em polpa moldada. A primeira abordagem consiste em duas formulações baseadas no Problema de Dimensionamento de Lotes Capacitado (CLSP) proposto por Almada-Lobo et al. (2007), as quais são denominadas ao longo do texto como CLSP-1 e CLSP-2. A segunda abordagem consiste em duas formulações baseadas no Problema de Dimensionamento de Lotes Geral (GLSP) proposto por Meyr (2002), as quais são denominadas GLSP-1 e GLSP-2.

A primeira abordagem estudada para representar o problema tem uma estrutura similar ao CLSP, que permite a produção de diferentes itens em cada período de tempo, e que inclui variáveis de troca para as decisões de sequenciamento dentro de cada período, conforme proposto em Almada-Lobo et al. (2007). A segunda abordagem estudada é baseada no GLSP, que divide os períodos de tempo em um conjunto de micro-períodos de tamanho variável, nos quais é permitida a produção de um único item.

4.1 Considerações para modelagem

O planejamento da produção no processo de moldagem das embalagens em polpa moldada para acondicionamento de ovos consiste, de forma geral, em determinar quais padrões de moldagem utilizar, o tempo de produção de cada padrão em cada linha e a sequência na qual estes padrões serão programados. Estas decisões devem ser definidas de modo a atender a demanda total sem atrasos, visando à minimização dos custos de trocas, custos de estocagem, e penalidades pela diferença do volume em estoque em relação às metas definidas.

Para a modelagem do problema estudado são necessários os seguintes pressupostos e considerações.

- Linhas paralelas: as três linhas de produção são capazes de produzir qualquer tipo de item, podendo ser configuradas com qualquer dos tipos de moldes disponíveis. As características técnicas, taxas de produção e tempos de preparação são iguais para todas as linhas de produção.
- Programação dos padrões de moldagem independente: 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. Isto faz com que a programação dos padrões de moldagem seja independente entre as linhas de produção, e que a configuração de determinados padrões possa ocorrer de forma simultânea.

- Períodos de tempo: cada período de produção representa uma semana do horizonte de planejamento.
- Preparação das linhas: uma preparação na modelagem pode representar três situações dentro do sistema de produção: configuração da linha para um novo ferramental de moldagem (troca de formato de produto), configuração da linha para uma troca de cor entre os diferentes produtos, ou preparação da linha para uma troca de ferramental e cor simultaneamente. No caso em que as trocas de ferramental são realizadas de forma simultânea, o tempo de preparação corresponde ao tempo máximo entre as duas atividades, no entanto, o custo associado resulta na soma dos custos associados à troca de cor e troca de ferramental.
- Tempos e custos de preparação: os tempos e custos de preparação dos diferentes padrões de moldagem em cada linha de produção são dependentes da sequência, não simétricos, e obedecem à desigualdade triangular.
- Estados de preparação: o estado de preparação de cada linha de produção deve permanecer de um período para outro (*setup carry-over*).
- Capacidade: a capacidade de cada linha de produção é dada em horas e é reduzida pelas atividades de manutenção preventiva, lubrificação e revisão, previamente planejadas, ao longo do horizonte de planejamento. A duração destas atividades envolve entre 2 horas e uma semana, portanto sua consideração na determinação da capacidade é significativa.
- Atendimento da demanda: as estimativas de demanda são dadas para cada período de tempo, e não são permitidos atrasos na entrega dos produtos.
- Níveis de estoque: para controlar o volume estocado, metas relacionadas aos níveis de estoque (nível mínimo e máximo) são definidas para cada produto. Estes níveis são estabelecidos em uma tentativa de garantir a disponibilidade de produtos com alta demanda e evitar o excesso de produtos de baixa demanda em estoque. Existem penalidades associadas ao desvio do volume em estoque em relação às metas definidas, sendo que a penalidade por unidades abaixo do nível é sempre maior que a penalidade por unidades em estoque acima do nível máximo.

4.2 Abordagem baseada no CLSP

Esta abordagem consiste em duas formulações baseadas na proposta de Almada-Lobo et al. (2007) para o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes capacitado. As formulações propostas diferenciam-se das apresentadas em Almada-Lobo et al. (2007) principalmente pela consideração de múltiplas linhas de produção, as decisões de dimensionamento e sequenciamento de lotes de processo ao invés de lotes de produtos, e a incorporação de elementos na modelagem para controlar os níveis de estoque.

O dimensionamento e sequenciamento de lotes de processo implica que os itens demandados são produzidos a partir da utilização de padrões de moldagem, que devem ser configurados nas linhas de produção, envolvendo tempos e custos de preparação dependentes da sequência. Os custos de preparação neste processo estão relacionados aos custos de mão de obra especializada do serviço de manutenção para a realização da troca dos moldes e ajustes dos equipamentos. Entretanto, o tempo de preparação está relacionado ao tempo em que a linha fica parada, sem produzir, durante a troca, o que consome uma parte considerável do tempo disponível para produção.

A quantidade de produto produzido depende do tempo de produção de cada padrão de moldagem e a sua taxa de produção. Isto é, as unidades produzidas de determinado item são obtidas pelas horas de produção de cada padrão de moldagem vezes o número de peças deste item obtidas por unidade de tempo, como indicado na equação (4.1).

$$\text{Unidades do item } k \text{ no período } t = \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^N x_{lit} p_{ki} \quad (4.1)$$

em que x_{lit} representa as horas de produção do padrão i , na linha de produção l , no período t , e p_{ki} representa as unidades do item k obtidas em uma hora de produção do padrão i .

Desta forma, o volume total produzido de determinado item em um período de tempo é a soma das unidades obtidas através da utilização dos diferentes padrões de moldagem, nas diferentes linhas de produção. Assim, os modelos baseados na abordagem CLSP podem ser apresentados como segue.

4.2.1 Modelo CLSP-1

Índices

k Tipos de produto
 i, j Padrões de moldagem

l Linhas de produção
 t Períodos de tempo

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
 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_{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
 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} Indica se na linha l há troca do padrão i para o padrão j durante o período t ($z_{lijt} = 1$), ou não ($z_{lijt} = 0$).

Variáveis auxiliares

E_{kt}^+ Unidades do item k acima do nível de estoque máximo
 E_{kt}^- Unidades do item k abaixo do nível de estoque mínimo
 f_{lit} Variável auxiliar para a eliminação de ciclos dentro da sequência de programação dos padrões, em cada linha l e em cada período de tempo t .

$$\text{Minimizar } \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K h_k I_{kt} + \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N c_{ij} z_{lijt} + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K (\alpha_k E_{kt}^+ + \beta_k E_{kt}^-) \quad (4.2)$$

Sujeito a:

$$I_{kt} = I_{k(t-1)} + \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^N p_{ki} x_{lit} - d_{kt} \quad \forall t = 1, \dots, T; k = 1, \dots, K \quad (4.3)$$

$$\sum_{i=1}^N x_{lit} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N st_{ij} z_{lijt} \leq Q_{lt} \quad \forall t = 1, \dots, T; l = 1, \dots, L \quad (4.4)$$

$$x_{lit} \leq M_{lit} \left(y_{lit} + \sum_{j=1: j \neq i}^N z_{ljit} \right) \quad \forall t = 1, \dots, T; l = 1, \dots, L; i = 1, \dots, N \quad (4.5)$$

$$\sum_{i=1}^N y_{lit} = 1 \quad \forall t = 1, \dots, T; l = 1, \dots, L \quad (4.6)$$

$$y_{lit} + \sum_{j=1: j \neq i}^N z_{ljit} = y_{li(t+1)} + \sum_{j=1: j \neq i}^N z_{ljit} \quad \forall t = 1, \dots, T; l = 1, \dots, L; i = 1, \dots, N \quad (4.7)$$

$$f_{lit} + N z_{lijt} - (N-1) - N y_{lit} \leq f_{lit} \quad \forall t = 1, \dots, T; l = 1, \dots, L; i, j = 1, \dots, N / i \neq j \quad (4.8)$$

$$I_{kt} + E_{kt}^- - E_{kt}^+ \geq I_{k(\min)} \quad \forall k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T \quad (4.9)$$

$$I_{kt} + E_{kt}^- - E_{kt}^+ \leq I_{k(\max)} \quad \forall k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T \quad (4.10)$$

$$I_{kt}, x_{lit}, f_{lit}, E_{kt}^+, E_{kt}^- \geq 0; y_{lit}, z_{lijt} \in \{0, 1\} \quad (4.11)$$

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

Como mencionado ao início desta seção, diferente dos modelos propostos para o CLSP na literatura, esta abordagem define lotes de processo, e não lotes de produto. Luche e Morabito (2005) e Luche, Morabito e Pureza (2009) estudaram também o dimensionamento e sequenciamento de lotes de processo na indústria de grãos eletrofundidos. No entanto, a configuração do sistema de produção não envolve decisões sobre o sequenciamento dos lotes, limitando-se às decisões de seleção de processos e dimensionamento de lotes em uma única máquina.

Na formulação proposta (4.2) - (4.11), observe que o volume produzido de cada produto em um período de tempo pode ser obtido de forma fracionada, a partir dos lotes dos diferentes processos, ou seja, a partir do tempo de produção dos vários padrões de moldagem utilizados nesse período. Além das considerações dos modelos clássicos, esta formulação incorpora o controle dos níveis de estoque de cada produto.

A função objetivo (4.2) 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 equações(4.3) correspondem às restrições de balanceamento de estoques, que relacionam às unidades produzidas de cada produto, sua demanda e níveis de estoque. A quantidade (lote) de produto é obtido através da 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.

O conjunto de desigualdades (4.4) refere-se 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 pelos tempos de preparação que são dependentes da sequência de troca entre diferentes padrões. A capacidade do sistema é diferente em cada linha e em cada período, visto que as atividades de manutenção preventivas já planejadas reduzem consideravelmente o tempo disponível para produção de cada linha.

As restrições (4.5) estabelecem a relação entre a produção de cada padrão de moldagem em cada linha (em termos de horas) e o estado de preparação de cada uma delas. Como em Almada-Lobo et al. (2007), esta formulação estabelece um limitante para as horas de produção que cada padrão de moldagem pode ser utilizado em cada linha e em cada período. Desta forma, para cada período de tempo t e cada linha de produção l , o padrão i só pode ser utilizado se a linha estava preparada para ele no início do período ($y_{lit} = 1$), ou houve uma preparação a partir de qualquer outro padrão j para o padrão i nesse período $\left(\sum_{j=1/ j \neq i}^N z_{tjit} = 1 \right)$. Levando em conta que não são permitidos *backlogings*, caso o padrão i seja utilizado, o número de horas máximo que este pode ser utilizado em cada linha e em cada período pode ser obtido pela expressão (4.12).

$$M_{lit} = \min \left\{ Q_{lt}, \max_{k: p_{ki} \neq 0} \frac{\sum_{h=t}^T d_{kh}}{p_{ki}} \right\} \quad \forall l = 1, \dots, L; i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (4.12)$$

As equações (4.12) 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 máximo tempo que requer o atendimento da demanda remanescente para todos os itens que podem ser obtidos através do padrão i .

As restrições (4.6) garantem que cada linha de produção seja preparada para um único padrão de moldagem, ao início de cada período de tempo. As igualdades (4.7) definem o sequenciamento dos lotes de produção. Observe que elas estabelecem a relação entre os estados iniciais de preparação da linha, e as trocas ao longo de cada período, como proposto em Almada-Lobo et al. (2007).

As equações (4.8) correspondem às restrições de eliminação de ciclos desconexos, que podem se formar no sequenciamento dos padrões de moldagem em cada período de tempo, como descrito na seção 3.1.1. As desigualdades (4.9) e (4.10) 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.

Considere, por exemplo, o item k , cujos níveis de estoque mínimo e máximo são definidos como $I_{k(\min)} = 100 \text{ unidades}$ e $I_{k(\max)} = 500 \text{ unidades}$. Considere também o caso em que o volume em estoque resulte $I_{kt} = 1800 \text{ unidades}$, logo a restrição (4.10) faz com que a variável $E_{kt}^+ = 1300 \text{ unidades}$, entretanto a restrição (4.9) é também factível, como mostrado a seguir. A mesma lógica é aplicada também, no caso em que o volume em estoque resulta menor que o nível mínimo definido.

$$I_{kt} + E_{kt}^- - E_{kt}^+ \geq I_{k(\min)} \quad \rightarrow \quad 1.800 + E_{kt}^- - 1.300 \geq 100$$

$$I_{kt} + E_{kt}^- - E_{kt}^+ \leq I_{k(\max)} \quad \rightarrow \quad 1800 + E_{kt}^- - 1300 \leq 500$$

Estas restrições permitem o controle dos níveis de estoque, dado que as variáveis E_{kt}^+ e E_{kt}^- estão na função objetivo, que é de minimização.

Finalmente as expressões (4.11) 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.

4.2.2 Modelo CLSP-2

A formulação CLSP-2 compreende a formulação original apresentada na seção anterior (Seção 4.2.1), formada pelas equações (4.2) - (4.11), e o conjunto de desigualdades válidas propostas em Almada-Lobo et al. (2007) adaptadas para o problema em estudo. Estas desigualdades são apresentadas como segue.

$$y_{lit} \leq \sum_{j=1, j \neq i}^N z_{lijt} + w_{lt} \quad \forall i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T; l = 1, \dots, L \quad (4.13)$$

$$y_{lit} \leq \sum_{j=1, j \neq i}^N z_{lji(t-1)} + w_{l(t-1)} \quad \forall i = 1, \dots, N; t = 2, \dots, T; l = 1, \dots, L \quad (4.14)$$

$$1 - w_{lt} \leq \sum_{i, j=1, j \neq i}^N z_{lijt} \quad \forall t = 1, \dots, T; l = 1, \dots, L \quad (4.15)$$

$$w_{lt} \leq 1 - \frac{\sum_{i, j=1, j \neq i}^N z_{lijt}}{N} \quad \forall t = 1, \dots, T; l = 1, \dots, L \quad (4.16)$$

em que w_{lt} assume o valor de 0, se no mínimo uma preparação é realizada na linha l , no período t , e $w_{lt} = 1$ se não há preparação nenhuma nesse período.

As restrições (4.13) relacionam o estado de preparação inicial, as trocas ao longo de cada período e a variável w_{lt} , fazendo esta última igual 1, no caso em que a linha l esteja

preparada para o padrão i no período t e $\sum_{j=1}^N z_{lijt} = 0$. Para o período imediatamente anterior, as

desigualdades (4.14) estabelecem que se $y_{lit} = 1$, necessariamente houve uma troca de

qualquer outro padrão j , para o padrão i em $t-1$ $\left(\sum_{j=1}^N z_{lji(t-1)} = 1 \right)$, ou o estado de preparação foi

preservado desde o período $t-1$ ($y_{li(t-1)} = 1$), fazendo $w_{l(t-1)} = 0$. As restrições (4.15) e (4.16)

são impostas de modo que a variável w_{lt} assumam obrigatoriamente o valor 0 nos casos em que

$\sum_{j=1}^N z_{lijt} = 1$ ou $\sum_{j=1}^N z_{lji(t-1)} = 1$. Desta forma, a formulação CLSP-2 é apresentada como segue.

$$\text{Minimizar } \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K h_k I_{kt} + \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N c_{ij} z_{lijt} + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K (\alpha_k E_{kt}^+ + \beta_k E_{kt}^-) \quad (4.17)$$

Sujeito a: (4.3) - (4.10), (4.13) - (4.16)

$$\begin{aligned} I_{kt}, x_{lit}, f_{lit}, E_{kt}^+, E_{kt}^- \geq 0; y_{lit}, z_{lijt}, w_{lt} \in \{0,1\} \\ \forall i, j = 1, \dots, N; l = 1, \dots, L; k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T \end{aligned} \quad (4.18)$$

4.3 Abordagem baseada no GLSP

Esta abordagem é baseada no modelo de máquinas paralelas de Meyr (2002), no qual múltiplos padrões de moldagem podem ser utilizados em um período de tempo, porém estes períodos são divididos em períodos menores (micro-períodos), nos quais um único padrão pode ser configurado. O número de micro-períodos pertencentes a cada período em cada linha é um parâmetro, no entanto, o tamanho de cada um deles é uma variável de decisão, expressa pelas horas de produção da linha sob a configuração de um determinado padrão de moldagem. É possível que, para cada linha em cada período de tempo, ocorra o caso em que um ou mais micro-períodos tenham tamanho zero.

O número de micro-períodos que cada linha possui em cada período de tempo pode ser estimado com base na capacidade disponível e no número máximo de padrões de conformação que poderiam ser utilizados, considerando a demanda de cada período. Para o caso particular da indústria de embalagens abordada neste trabalho, em que os tempos de preparação são consideravelmente grandes, assume-se que no máximo quatro padrões de moldagem diferentes podem ser programados em cada período de tempo, ou seja, em cada semana. Em comparação com a abordagem baseada no CLSP, as formulações baseadas no GLSP requerem a definição prévia do número máximo de padrões que podem ser configurados em cada período, que, apesar de ser estimado de forma cautelosa, limita o número de trocas possíveis em cada período. Os modelos baseados na abordagem CLSP apresentados na Seção 4.2 não limitam o número de padrões que podem ser utilizados em cada linha em cada período e, portanto, não limitam o número de trocas possíveis.

Similar aos modelos baseados no CLSP, a capacidade de cada linha deve ser reduzida pelo tempo de produção sob a configuração dos padrões de moldagem programados nesse período, e os tempos de preparação dependentes da sequência em que estes são programados. Considerando os índices e parâmetros já definidos na Seção 4.2.1, as formulações baseadas no modelos GLSP podem ser apresentados como se segue.

4.3.1 Modelo GLSP-1

Índice

s Micro-períodos

Parâmetros

S Número total de micro-períodos.

S_t Conjunto dos micro-períodos pertencentes ao período t .

Variáveis de decisão

x_{lis} Horas de produção da máquina l , sob a configuração do padrão i , no micro-período s .

y_{lis} Indica se a linha l está configurada para o padrão i no início do micro-período s ($y_{lis} = 1$), ou não ($y_{lis} = 0$).

z_{lij} Indica se na linha l há troca do padrão i para o padrão j no início do micro-período s ($z_{lij} = 1$), ou não ($z_{lij} = 0$).

$$\text{Minimizar } \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K h_k I_{kt} + \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{s=1}^S c_{ij} z_{lij} + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K (\alpha_k E_{kt}^+ + \beta_k E_{kt}^-) \quad (4.19)$$

Sujeito a: (4.9), (4.10),

$$I_k = I_{k(t-1)} + \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^N \sum_{s \in S_t} p_{ki} x_{lis} - d_{kt} \quad \forall t=1, \dots, T; k=1, \dots, K \quad (4.20)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{s \in S_t} x_{lis} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{s \in S_t} st_{ij} z_{lij} \leq Q_t \quad \forall t=1, \dots, T; l=1, \dots, L \quad (4.21)$$

$$x_{lis} \leq M_{li} y_{lis} \quad \forall l=1, \dots, L; i=1, \dots, N; s=1, \dots, S \quad (4.22)$$

$$\sum_{i=1}^N y_{lis} = 1 \quad \forall l=1, \dots, L; s=1, \dots, S \quad (4.23)$$

$$y_{li(s-1)} + y_{ljs} - 1 \leq z_{lij} \quad \forall l=1, \dots, L; i, j=1, \dots, N; s=1, \dots, S \quad (4.24)$$

$$I_{kt}, x_{lis}, E_{kt}^+, E_{kt}^- \geq 0; y_{lis}, z_{lij} \in \{0, 1\} \quad (4.25)$$

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

Da mesma forma que na abordagem CLSP, esta formulação define lotes de processo, e não de lotes de produto como no GLSP clássico, além de incorporar decisões sobre o controle nos níveis de estoque de cada produto. Assim como nas formulações apresentadas na abordagem CLSP, este modelo visa à minimização dos custos de estocagem, custos de

preparação, e as penalidades do desvio do volume em estoque, em relação às metas de estoque definidas (4.19).

O conjunto de restrições (4.20) representa o balanceamento de estoques de cada item em cada período, relacionando as horas de produção de cada padrão de moldagem em cada micro-período, as demandas por produto e os níveis de estoque de cada um destes. Note que as equações (4.20) comparadas às restrições (4.3) dos modelos da abordagem CLSP consideram as horas de produção de cada padrão em cada micro-período pertencente ao período considerado, visto que em cada micro-período é utilizado um único padrão e, portanto a soma das horas de produção do padrão utilizado em cada um deles totaliza as horas de produção dos padrões de moldagem no período t .

As restrições (4.21) impõem para cada linha e período de tempo, que as horas de produção dos diferentes padrões, mais o tempo consumido nas operações de preparação, não excedam a capacidade disponível da linha nesse período. As restrições (4.22) garantem que um padrão de moldagem possa ser utilizado, se e somente se, a linha estiver configurada para esse padrão nesse micro-período. O número máximo de horas que qualquer padrão pode ser utilizado em cada micro-período pode ser aproximado também pela expressão (4.12). As restrições (4.23) garantem que cada linha esteja configurada para um único padrão de moldagem em cada micro-período de tempo.

As restrições (4.24) relacionam as variáveis de troca junto como estado de preparação inicial das linhas em cada micro-período, garantido que existe uma troca de i para j no início do micro-período s , se e somente se, a linha estava configurada no micro-período anterior para o padrão i , e no micro-período atual passa a estar configurada para o período j . Finalmente, as restrições (4.9) e (4.10) contabilizam as unidades em estoque fora das metas estabelecidas, e as restrições (4.25) definem o domínio das variáveis.

4.3.2 Modelo GLSP-2

Este modelo consiste na formulação apresentada na seção anterior 4.3.1, e na reformulação para as restrições de sequenciamento clássicas do GLSP conforme propostas em Ferreira et al. (2012) como descritas na Seção 3.1.2 no capítulo de revisão de literatura. Esta reformulação para as restrições de sequenciamento consistem nas equações apresentadas a seguir.

$$\sum_{i=1}^N z_{ljs} \leq y_{ljs} \quad \forall l = 1, \dots, L; j = 1, \dots, N; s = 1, \dots, S \quad (4.26)$$

$$y_{li(s-1)} = \sum_{j=1}^N z_{lij_s} \quad \forall l = 1, \dots, L; i = 1, \dots, N; s = 1, \dots, S \quad (4.27)$$

$$\sum_{j=1}^N z_{lij_s} = y_{lis} \quad \forall l = 1, \dots, L; i = 1, \dots, N; s = 1, \dots, S \quad (4.28)$$

As restrições (4.26) relacionam as os estados de preparação de cada micro-período, com as variáveis de troca. As restrições (4.27) e (4.28) garantem o fluxo de configurações das linhas de produção, e a preservação do estado de preparação entre os micro-períodos e macro-períodos de tempo. Assim, o modelo GLSP-2 pode ser apresentado como segue.

$$\text{Minimizar } \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K h_k I_{kt} + \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{s=1}^S c_{ij} z_{lij_s} + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K (\alpha_k E_{kt}^+ + \beta_k E_{kt}^-) \quad (4.29)$$

Sujeito a: (4.20) - (4.23), (4.9), (4.10), (4.26) - (4.28),

$$\begin{aligned} I_{kt}, x_{lis} &\geq 0; y_{lis}, z_{lij_s} \in \{0, 1\} \\ \forall i, j &= 1, \dots, N; l = 1, \dots, L; k = 1, \dots, K; s = 1, \dots, S; t = 1, \dots, T \end{aligned} \quad (4.30)$$

De forma geral, os modelos das abordagens CLSP e GLSP diferenciam-se principalmente nas suas estruturas para as decisões de sequenciamento na programação dos padrões de moldagem em cada linha. Nos modelos da abordagem CLSP são permitidas várias trocas em um mesmo período de tempo, utilizando uma variável binária que relaciona o estado inicial da linha, e as trocas realizadas ao longo do período, respeitando as relações de precedência entre os padrões de moldagem. Adicionalmente, são consideradas restrições de eliminação de ciclos, de modo que para cada linha em cada período não se apresentem ciclos não conexos. Por outro lado, nos modelos da abordagem baseada no GLSP, a divisão dos períodos de tempo em micro-períodos é definida justamente para relacionar as trocas em cada período. Desta forma, as variáveis relacionadas às trocas entre os padrões de conformação estão relacionadas aos estados de preparação iniciais em cada micro-período, de modo que, caso exista uma mudança no padrão de moldagem utilizado, uma única troca seja contabilizada ao início do micro período e o tempo envolvido seja atribuído à duração do mesmo.

A limitação do número de trocas nos modelos baseado no GLSP, através da definição de um número máximo de micro-períodos (S), pode evitar que a capacidade remanescente em cada período de tempo seja utilizada para realizar preparações para o próximo período, como permite-se nos modelos baseados no CLSP.

Além das diferenças relacionadas às decisões de dimensionamento e sequenciamento de lotes nos dois modelos, o número de variáveis e o número de restrições em cada um deles são diferentes, como apresentados na tabelas Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Número de variáveis e restrições envolvidas nas abordagens propostas

	MODELO	VARIÁVEIS BINÁRIAS	VARIÁVEIS CONTÍNUAS	NÚMERO DE RESTRIÇÕES
Abordagem CLSP	CLSP-1	$LNT + LN^2T$	$3KT + 2LNT$	$3KT + 2LT + LNT + LN^2T$
	CLSP-2	$LNT + LN^2T + LT$	$3KT + 2LNT$	$3KT + 4LT + 3LNT + LN^2T$
Abordagem GLSP	GLSP-1	$LNS + LN^2S$	$3KT + LNS$	$3KT + LT + LS + LN^2S$
	GLSP-2	$LNS + LN^2S$	$3KT + LNS$	$3KT + LT + LS + 4LNS$

Observe na Tabela 4.1 que, o número total de variáveis nas formulações da abordagem GLSP (modelos GLSP-1 e GLSP-2) é o mesmo. No entanto, na abordagem CLSP existem diferenças entre o número de variáveis totais, sendo que o CLSP-2 tem LT variáveis a mais que o modelo CLSP-1, devido à variável w_{it} acrescentada para a formulação das desigualdades válidas.

Considerando que a abordagem GLSP é considerada um modelo *big bucket*, a definição de mais de um micro-período por período de tempo é necessária para garantir a possibilidade de produzir mais de um produto por período, portanto, considera-se $|S_t| > 1 \quad \forall t = 1, \dots, T$.

Assumindo $|S_t| = 2 \quad \forall t = 1, \dots, T$, temos que $S = 2T$, e o número de variáveis para os modelos GLSP-1 e GLSP-2 pode ser definido como segue.

$$3KT + 2LNS + LN^2S$$

$$3KT + 4LNT + 2LN^2T$$

Ou seja, qualquer um dos modelos GLSP-1 ou GLSP-2 possui, no mínimo, $LNT + LN^2T$ variáveis a mais que o modelo CLSP-1 e $LNT + LN^2T - LT$ variáveis a mais que o CLSP-2.

Em relação ao número de restrições das formulações propostas apresentadas na Tabela 4.1, observe que quanto à abordagem CLSP, o modelo CLSP-2 possui $2LT + 2LNT$ que o CLSP-1, como esperado ao acrescentar o conjunto de desigualdades válidas. No entanto, em relação aos modelos GLSP-1 e GLSP-2, a diferença no número de variáveis entre estes corresponde a $4LNS - LN^2S$. No entanto, a comparação em relação ao número de restrições não é direta, dado que depende do tamanho do exemplar tratado, especificamente do número de padrões de moldagem disponíveis.

5. ESTUDOS COMPUTACIONAIS

O objetivo deste capítulo é apresentar as soluções geradas pelas formulações propostas e avaliar a adequação das mesmas para representar o problema de planejamento e programação da produção na indústria de embalagens moldadas. Os experimentos computacionais realizados são apresentados em três seções. A primeira seção apresenta os planos de produção gerados pelos modelos CLSP-1 e GLSP-1 propostos para o problema em estudo. Nesta primeira seção estuda-se particularmente a adequação dos modelos para representar as decisões de planejamento e programação da produção, assim como a capacidade de gerar planos de produção viáveis e representativos para o sistema estudado. Na segunda seção, estas formulações (CLSP-1 e GLSP-1) são adaptadas, de modo que os atrasos com respeito às previsões de demanda sejam permitidos. Estas alterações são testadas com o objetivo de que os planos de produção resultantes das abordagens propostas sejam totalmente comparáveis com o programa de produção da fábrica, que apresentam atrasos em relação às previsões de demanda, e presentes planos de produção alternativos para serem implementados na prática. Por fim, a terceira seção apresenta comparações entre as abordagens CLSP e GLSP em relação ao seu comportamento na resolução do problema em estudo. Nesta seção é analisado inicialmente o desempenho computacional dos modelos CLSP-1 e GLSP-1 sobre um conjunto de exemplares reais. Em seguida, o desempenho dos modelos CLSP-2 e GLSP-2 é avaliado, para verificar se estas formulações incorrem em melhorias significativas para a resolução do problema estudado, quando comparados com as primeiras formulações propostas (CLSP-1 e GLSP-1).

Todos os exemplares testados nos estudos computacionais consistem em informações reais da fábrica, para o qual foram coletados os seguintes dados: número de itens fabricados; padrões de moldagem disponíveis para produção; taxa de produção de cada padrão de moldagem em relação a cada produto; previsões de demanda; níveis de estoque inicial; níveis de estoque mínimo e máximo; tempos de preparação entre os diferentes padrões de moldagem; e, capacidade das linhas de produção. Em relação aos custos, foram obtidas informações sobre o lucro dos itens fabricados; o custo por hora para as operações de preparação das linhas, que inclui custo de oportunidade associado à parada das máquinas e o custo de mão de obra especializada; e, informações sobre valor dos estoques. A partir destas informações foram estimados os custos de atraso; os custos de estocagem, como o custo de oportunidade associado ao valor do estoque no período; e, as penalidades para as unidades

acima do nível máximo e abaixo do nível mínimo de estoque, definidas em termos do custo de estocagem. O Anexo A- apresenta todos os dados coletados.

Os exemplares utilizados representam dados de diferentes meses, ao longo de um horizonte de tempo de um mês. Cada exemplar representa quatro períodos de produção, ou seja, quatro semanas, nas quais três linhas de produção estão disponíveis 24 horas por dia, sete dias por semana. Cada exemplar contém informação sobre previsões de demanda e níveis de estoque iniciais para a produção de 14 produtos, os quais podem ser obtidos a partir de um conjunto de 19 padrões de moldagem.

Todos os experimentos computacionais realizados foram executados na linguagem algébrica 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.

5.1 Planos de produção gerados pelos modelos CLSP-1 e GLSP-1

Este estudo computacional tem como objetivo verificar a capacidade das formulações propostas para gerar planos de produção viáveis do ponto de vista prático, para exemplares reais do sistema de produção. Como a disponibilidade de informações sobre os planos de produção definidos pela fábrica é limitada, os estudos apresentados nesta seção e na Seção 5.2 comparam detalhadamente os diferentes planos de produção para um único exemplar em particular.

Neste estudo foram considerados os estados de preparação inicial das linhas de produção e as manutenções programadas ao longo do horizonte de planejamento, conforme as informações do exemplar. Em relação às penalidades pelas unidades em estoque fora dos níveis estabelecidos, nesta seção considera-se os valores $\alpha = 2h$ e $\beta = 4h$, assim como nos experimentos apresentados na Seção 5.2, ou seja, a penalização por estoque acima do nível máximo corresponde a duas vezes o custo de estoque (h) e a penalização por estoque abaixo do nível mínimo corresponde a quatro vezes. As soluções obtidas correspondem às soluções dos modelos CLSP-1 e GLSP-1 após 3 horas de execução, que embora não sejam ótimas, permitem verificar a coerência das soluções em relação às decisões envolvidas no sistema de produção estudado. Para o exemplar estudado, o modelo CLSP-1 apresenta 5.184 variáveis e 4.752 restrições, entretanto o modelo GLSP-1 apresenta 19.320 variáveis e 17.556 equações.

Os programas de produção resultantes das abordagens CLSP-1 e GLSP-1 são apresentados na Figura 5.1 e

Figura 5.2, correspondentemente.

Figura 5.1 - Plano de produção obtido através do modelo CLSP-1

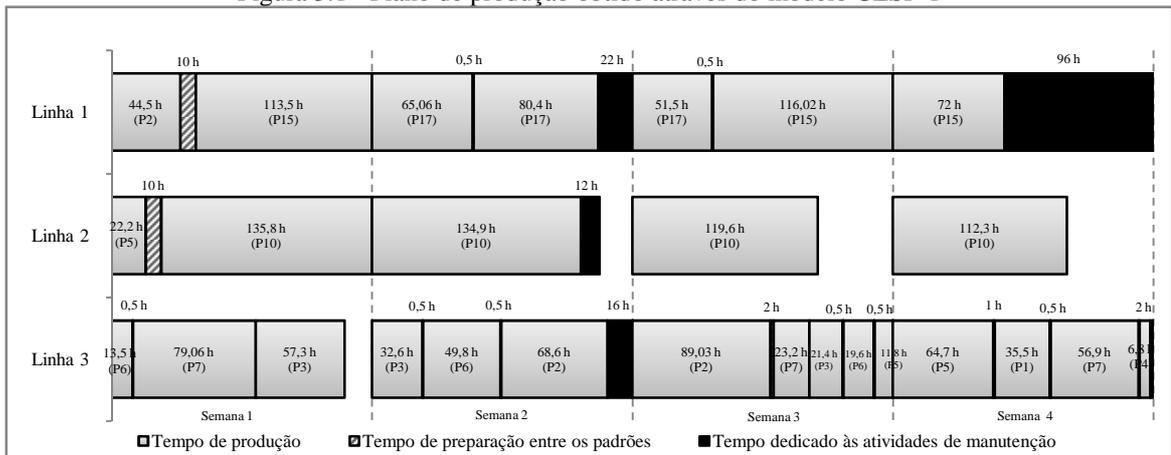
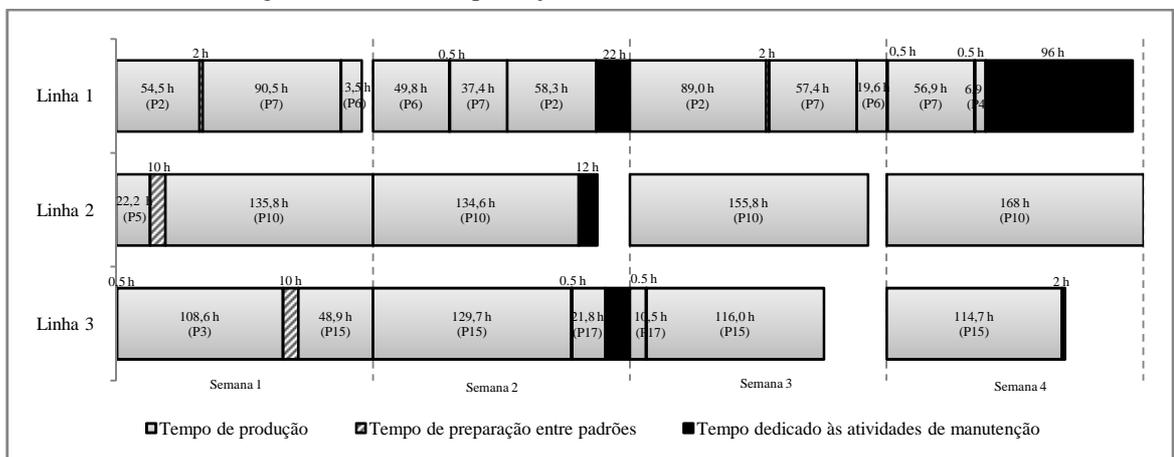


Figura 5.2 - Plano de produção obtido através do modelo GLSP-1



Os planos de produção apresentados mostram para cada linha de produção, ao longo do horizonte, o tempo de produção dedicado a cada padrão de moldagem, o tempo dedicado às operações de preparação nas linhas, e o tempo dedicado às operações de manutenção programadas. Observe que os dois planos de produção são diferentes, portanto foram analisados cada elemento envolvido nos planos de produção para verificar a adequação de cada um deles ao problema estudado.

A Tabela 5.1 apresenta o consumo de capacidade de cada linha e do sistema de produção total, ao longo do horizonte de planejamento, para cada um dos modelos estudados. Os planos de produção obtidos a partir do CLSP-1 e GLSP-1 não apresentam diferenças consideráveis quanto ao consumo de capacidade. Considerando cada uma das linhas de produção, observe que todas tem uma porcentagem de aproveitamento de capacidade que varia entre 81% e 100%, independentemente da abordagem considerada.

Tabela 5.1 - Consumo de capacidade nos planos de produção resultantes das abordagens propostas

Plano de produção	Linha 1	Linha 2	Linha 3	Total do sistema de produção
CLSP-1	100 %	81 %	97,3 %	92,36 %
GLSP-1	97,34 %	94,91 %	85,88 %	92,47 %

Dos programas de produção apresentados na Figura 5.1 e Figura 5.2 observe que, tanto o plano de produção resultante do CLSP-1, quanto o plano resultante do GLSP-1, indica a utilização de aproximadamente os mesmos padrões de moldagem na fabricação dos diferentes itens, porém estes são sequenciados de forma diferente em cada programa de produção. Observe também que, apesar do sequenciamento dos padrões de moldagem ser distinto, os planos de produção resultantes de ambos os modelos dedicam a mesma quantidade de tempo às operações de preparação do sistema de produção completo, como indicado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Tempo dedicado às operações de preparação nos planos de produção CLSP-1 e GLSP-1

Plano de produção	Linha 1	Linha 2	Linha 3	Total do sistema de produção
CLSP-1	10,5 h (1,89%)	10 h (1,87%)	6,5 h (1,02%)	27 h (1,57%)
GLSP-1	5,5 h (1,02%)	10 h (1,59%)	11,5 h (2,04%)	27 h (1,56%)

Observe que, tanto o plano de produção resultante do CLSP-1 como o plano obtido através do GLSP-1, dedicam 27 horas da capacidade total utilizada para as operações de preparação das linhas de produção. Este tempo resulta em uma pequena proporção em relação ao consumo de capacidade, representando aproximadamente 1,57% da capacidade utilizada no caso do modelo CLSP-1, e 1,56% da capacidade utilizada no caso do GLSP-1.

Outro aspecto importante a ser analisado nos resultados das abordagens propostas é a forma como a demanda é atendida em cada plano de produção. A Tabela 5.3 e Tabela 5.4 apresentam as unidades produzidas de cada produto, assim como o volume em estoque ao final de cada período de tempo nos modelos CLSP-1 e GLSP-1, correspondentemente.

Tabela 5.3 - Atendimento da demanda (Modelo CLSP-1)

Itens	Estoque inicial	<u>Semana 1</u>			<u>Semana 2</u>			<u>Semana 3</u>			<u>Semana 4</u>		
		Demanda	Unidades produzidas	Estoque final	Demanda	Unidades produzidas	Estoque final	Demanda	Unidades produzidas	Estoque final	Demanda	Unidades produzidas	Estoque final
1	921.865	960.000	831.479	793.344	950.000	476.658,9	320.002,9	850.000	849.999,2	320.002	840.000	840.000,8	320.002,9
2	183.053	275.000	391.225,9	299.278,9	742.320	611.836	168.794,9	782.680	782.680,3	168.795,2	-	-	168.795,2
3	211.700	365.600	503.900,1	350.000,1	496.400	286.401,99	140.002,1	88.000	188.004,3	140.006,4	-	-	140.006,4
4	339.794	-	-	339.794	-	-	339.794	-	-	339.794	360.000	60.209,6	40.003,6
5	350.025	1.178.000	1.189.982,7	362.007,7	950.000	987.991,7	399.999,3	980.000	980.005,5	400.004,8	1.392.000	1.391.998,8	400.003,6
6	31.243	-	118.757,6	150.000,6	528.000	438.002,8	60.003,4	172.000	171.995,9	59.999,3	-	-	59.999,3
7	54.495	450.000	695.025,3	299.520,3	668.800	589.274,1	219.994,4	581.200	581.197,7	219.992,1	500.000	499.996,9	219.989
8	177.850	-	-	177.850	-	-	177.850	-	-	177.850	-	-	177.850
9	10.173	-	-	10.173	-	-	10.173	-	-	10.173	-	-	10.173
10	31.005	230.000	198.995,4	0,35	74.150	197.571,4	123.421,7	-	175.228,7	298.650,4	-	164.579,6	463.229,9
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	179.125	-	-	179.125	131.500	-	47.625	-	-	47.625	-	-	47.625
13	-	-	-	-	-	117.838,7	117.838,7	-	75.410,9	193.249,6	-	-	193.249,6
14	491.431	500.000	166.273,1	157.704,1	226.000	95.318,8	27.022,9	-	169.976,6	196.999,5	-	105.480	302.479,5
Total	2.981.759	3.958.600	4.095.639	3.118.798	4.767.170	<u>3.800.894,3</u>	2.152.522,	3.553.880	<u>3.974.499</u>	2.573.141,3	3.092.000	<u>3.062.265,7</u>	2.543.407,1

Tabela 5.4–Atendimento da demanda (Modelo GLSP-1)

Itens	Estoque inicial	<u>Semana 1</u>			<u>Semana 2</u>			<u>Semana 3</u>			<u>Semana 4</u>		
		Demanda	Unidades produzidas	Estoque final	Demanda	Unidades produzidas	Estoque final	Demanda	Unidades produzidas	Estoque final	Demanda	Unidades produzidas	Estoque final
1	921.865	960.000	358.131,5	319.996,5	950.000	949.999,1	319.995,6	850.000	849.999,2	319.994,7	840.000	839.999,2	319.993,9
2	183.053	275.000	481.949	390.002	742.320	512.321,9	160.003,9	782.680	782.680,3	160.004,2	-	-	160.004,2
3	211.700	365.600	954.834,5	800.934,5	496.400	-	304.534,5	88.000	-	116.534,5	-	-	116.534,5
4	339.794	-	-	339.794	-	-	339.794	-	-	339.794	360.000	60.209,6	40.003,6
5	350.025	1.178.000	1.189.982,7	362.007,7	950.000	987.991,7	399.999,3	980.000	1.141.229,6	561.229	1.392.000	1.230.768	399.997
6	31.243	-	118.757,6	150.000,6	528.000	438.002,8	60.003,4	172.000	171.995,9	59.999,3	-	-	59.999,3
7	54.495	450.000	795.647	400.142	668.800	488.664,6	220.006,6	581.200	581.201,1	220.007,7	500.000	499.996,9	220.004,6
8	177.850	-	-	177.850	-	-	177.850	-	-	177.850	-	-	177.850
9	10.173	-	-	10.173	-	-	10.173	-	-	10.173	-	-	10.173
10	31.005	230.000	198.995,4	0,35	74.150	197.571,3	123.421,7	-	228.214,8	351.636,5	-	246.120	597.756,5
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	179.125	-	-	179.125	131.500	-	47.625	-	-	47.625	-	-	47.625
13	-	-	-	-	-	31.973,6	31.973,6	-	15.312,2	47.285,8	-	-	47.285,8
14	491.431	500.000	71.616,5	63.047,53	226.000	189.973,9	27.021,4	-	169.976,6	196.998	-	167.976,9	364.974,9
Total	2.981.75	3.958.600	<u>4.169.914,2</u>	<u>3.193.073</u>	4.767.170	3.796.498,8	<u>2.222.402</u>	3.553.880	3.940.609,7	<u>2.609.131,7</u>	3.092.000	3.045.070,5	<u>2.562.202,2</u>

De forma geral, nos planos de produção dos modelos CLSP-1 e GLSP-1 (Tabela 5.3 e Tabela 5.4) a produção de alguns produtos é nula ao longo do horizonte de planejamento, mais especificamente no caso dos itens 8, 9, 11 e 12. Observando estes itens em particular, podemos dizer que a sua produção é nula como resposta a duas situações específicas: ou não existe demanda para estes itens ao longo do horizonte de planejamento, como é o caso dos produtos 8, 9, e 11 (Ver Tabela A.6 - Anexo A-), ou os níveis de estoque iniciais são suficientes para atender a demanda que se apresenta ao longo destes períodos de tempo, como é o caso do item 12.

Observe também que, embora alguns itens não apresentem demanda em alguns períodos, estes são produzidos em quantidades consideráveis. Isto ocorre porque a quantidade em estoque é muito inferior ao nível mínimo estabelecido e, portanto, esta quantidade deve ser aumentada. Observe por exemplo, o produto 6, cujo estoque inicial é de 31.243 unidades. Tanto no plano de produção do CLSP-1, quanto no plano do GLSP-1, é indicada a produção de 118.757 unidades aproximadamente, de modo que o estoque ao final da Semana 1 resulta em 150.000 unidades, que corresponde especificamente ao nível mínimo de estoque definido para esse produto (Tabela A.1– Anexo A-). Por outro lado, a produção de alguns itens com demanda nula acontece também pela utilização de padrões de moldagem que permitem a produção simultânea de itens com diferentes demandas. Observe, por exemplo, o produto 13 na Semana 2, onde a quantidade em estoque encontra-se dentro dos níveis de estoque definidos, e a demanda é nula. Neste caso, os planos de produção sugerem a produção destes itens como consequência da utilização nesse período do padrão de moldagem P17, que contém moldes para a produção dos produtos 13 e 7, simultaneamente (Tabela A.2 - Anexo A-).

Em relação aos níveis de estoque ao final do horizonte de planejamento, perceba que o estoque final da maioria dos produtos é menor em relação ao seu nível inicial, em qualquer um dos planos de produção estudados. Isto indica que a quantidade em estoque no início do período é importante para o atendimento da demanda de alguns produtos. No entanto, observe também que o estoque final dos produtos 6, 7, 10 e 13, aumenta em relação aos níveis iniciais de estoque, tanto nos planos do CLSP-1 como no GLSP-1. Isto acontece em vista da utilização de padrões de moldagem que permitem a produção de mais um produto simultaneamente, e da necessidade de controlar os níveis de estoque para cada item.

A fim de analisar com detalhe os níveis de estoque em cada período e verificar o seu estado em relação aos níveis mínimo e máximo de estoque definidos, a Tabela 5.5 apresenta estas informações para os planos de produção resultantes dos modelos CLSP-1 e GLSP-1. Nesta tabela, apresenta-se o nível de estoque inicial, e as quantidades em estoque resultantes de cada plano de produção, ao final de cada período de tempo. As quantidades sublinhadas indicam o desvio em unidades em relação ao nível máximo de estoque (quantidade positiva), e nível mínimo de estoque (quantidade negativa). Para o caso em que as unidades em estoque estão dentro do intervalo definido para cada produto (Tabela A.1 - Anexo A-), o desvio é definido como zero.

Tabela 5.5 - Níveis de estoque e desvio (*unds.*) em relação ao nível mínimo e máximo para cada produto resultante do modelo CLSP-1

Itens				<u>Semana 1</u>			<u>Semana 2</u>			<u>Semana 3</u>			<u>Semana 4</u>		
	I_{k0}	E_{k0}^+	E_{k0}^-	I_{k1}	E_{k1}^+	E_{k1}^-	I_{k2}	E_{k2}^+	E_{k2}^-	I_{k3}	E_{k3}^+	E_{k3}^-	I_{k4}	E_{k4}^+	E_{k4}^-
1	921.865	121.865	-	793.344	-	-	320.002,9	-	-	320.002	-	-	320.002,9	-	-
2	183.053	-	-	299.278,9	-	-	168.794,9	-	-	168.795,2	-	-	168.795,2	-	-
3	211.700	-	-	350.000,1	-	-	140.002,1	-	-	140.006,4	-	-	140.006,4	-	-
4	339.794	239.794	-	339.794	239.794	-	339.794	239.794	-	339.794	239.794	-	40.003,6	-	-
5	350.025	-	49.975	362.007,7	-	37.992,3	399.999,3	-	-	400.004,8	-	-	400.003,6	-	-
6	31.243	-	28.757	150.000,6	-	-	60.003,4	-	-	59.999,3	-	-	59.999,3	-	-
7	54.495	-	165.505	299.520,3	-	-	219.994,4	-	5,6	219.992,1	-	7,9	219.989	-	11
8	177.850	77.850	-	177.850	77.850	-	177.850	77.850	-	177.850	77.850	-	177.850	77.850	-
9	10.173	-	-	10.173	-	-	10.173	-	-	10.173	-	-	10.173	-	-
10	31.005	-	18.995	0,35	-	50.000	123.421,7	23.421,7	0	298.650,4	198.650,4	-	463.229,9	363.229,9	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	179.125	-	-	179.125	-	-	47.625	-	52.375	47.625	-	52.375	47.625	-	52.375
13	-	-	-	-	-	-	117.838,7	-	-	193.249,6	-	-	193.249,6	-	-
14	491.431	-	-	157.704,1	-	42.295,9	27.022,9	-	172.977,1	196.999,5	-	3.000,5	302.479,5	-	-
Total	2.981.759	439.509	263.232	3.118.798	317.644	100.287,3	2.152.522	341.065,7	255.357,7	2.573.141,3	516.294,4	55.383,4	2.543.407,1	441.079,99	52.386

Tabela 5.6 - Níveis de estoque e desvio (*unds.*) em relação ao nível mínimo e máximo para cada produto resultante do modelo GLSP-1

Itens				<u>Semana 1</u>			<u>Semana 2</u>			<u>Semana 3</u>			<u>Semana 4</u>		
	I_{k0}	E_{k0}^+	E_{k0}^-	I_{k1}	E_{k1}^+	E_{k1}^-	I_{k2}	E_{k2}^+	E_{k2}^-	I_{k3}	E_{k3}^+	E_{k3}^-	I_{k4}	E_{k4}^+	E_{k4}^-
1	921.865	121.865	-	319.996,5	-	3,5	319.995,6	-	3,4	319.994,7	-	5,3	319.993,9	-	6,1
2	183.053	-	-	390.002	2	-	160.003,9	3,9	-	160.004,2	4,2	0	160.004,2	4,2	-
3	211.700	-	-	800.934,5	450.934,5	-	304.534,5	-	-	116.534,5	-	23.465,5	116.534,5	-	23.465,5
4	339.794	239.794	-	339.794	239.794	-	339.794	239.794	-	339.794	239.794	-	40.003,6	-	-
5	350.025	-	49.975	363.007,7	-	37.993,3	399.999,3	-	-	561.229	-	-	399.997	-	-
6	31.243	-	28.757	150.000,6	-	-	60.003,4	-	-	59.999,3	-	-	59.999,3	-	-
7	54.495	-	165.505	400.142	-	-	220.006,6	6,6	-	220.007,7	7,7	-	220.004,6	-	-
8	177.850	77.850	-	177.850	77.850	-	177.850	77.850	-	177.850	77.850	-	177.850	77.850	-
9	10.173	-	-	10.173	-	-	10.173	-	-	10.173	-	-	10.173	-	-
10	31.005	-	18.995	0,4	-	50.000	123.421,7	23.421,7	-	351.636,5	251.636,5	-	597.756,5	497.756,5	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	179.125	-	-	179.125	-	-	47.625	-	52.375	47.625	-	52.375	47.625	-	52.375
13	-	-	-	-	-	-	31.973,6	-	-	47.285,8	-	-	47.285,8	-	-
14	491.431	-	-	63.047,5	-	136.52,5	27.021,4	-	172.978,6	196.998	-	3,002	364.974,9	-	-
Total	2.981.759	439.509	263.232	3.193.073	768.580,5	224.948,3	2.222.402	331.079,6	225.537	2.609.131,7	569.292,4	78.847,8	2.562.202,2	575.610,7	75.849,6

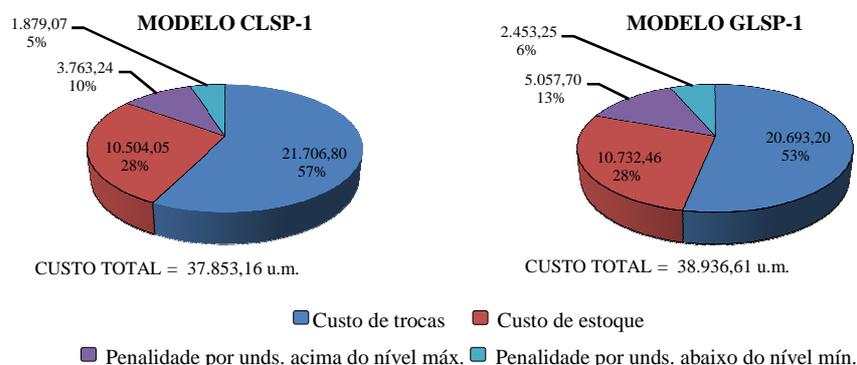
Observe que a quantidade de estoque inicial de 50% dos produtos encontra-se fora dos níveis mínimo e máximo especificados para cada produto, totalizando 489.509 unidades acima do nível máximo e 263.232 unidades abaixo do nível mínimo, como indicado ao início da última linha da Tabela 5.5 e Tabela 5.6. Note que, tanto o plano de produção gerado a partir do CLSP-1 como o plano de produção gerado a partir da abordagem GLSP-1 tentam reduzir o número de produtos com estoque fora dos níveis estabelecidos, reduzindo também as quantidades desviadas.

O plano CLSP-1 consegue manter um maior controle dos níveis de estoque ao final do horizonte de planejamento, em comparação aos níveis de estoque finais do programa de produção do GLSP-1. Segundo o resultado da abordagem CLSP-1, 10 dos 14 produtos apresentam estoque final dentro dos níveis estabelecidos para cada um deles, e entre os produtos cujo estoque encontra-se fora destes níveis, são indicadas aproximadamente 441.080 unidades acima e 52.386 abaixo dos níveis de estoque definidos. Além do número de produtos com estoque controlado aumentar as quantidades fora dos limites (especialmente as unidades abaixo dos níveis mínimos definidos) são reduzidas ao final do período de tempo segundo o programa de produção resultante do CLSP-1.

Quanto ao programa de produção resultante do GLSP-1, observe que a metade dos itens considerados apresenta níveis de estoque sob controle ao final do horizonte de planejamento. No entanto, pode se considerar também a quantidade em estoque dos itens 1, 2 e 5 é aceitável, visto que as quantidades desviadas não representam uma diferença considerável em comparação com os volumes de produção e estoque usualmente manipulados. Neste plano de produção, apesar da quantidade em estoque estar controlada para um maior número de produtos em comparação com a situação inicial, o programa de produção do GLSP-1 indica um total de aproximadamente 575.610 unidades acima dos níveis máximos e 75.840 unidades abaixo do nível mínimo. Isto representa um maior volume acima dos níveis de estoque máximo, em comparação com a situação inicial e os resultados do plano de produção do CLSP-1.

Outro aspecto importante na comparação entre resultados dos modelos propostos para o exemplar em particular, são os custos envolvidos em cada programa de produção. A Figura 5.3 apresenta informações sobre os custos de troca, custos de estocagem, penalidades associadas ao desvio do volume em estoque em relação às metas definidas, e os custos totais de cada programa de produção.

Figura 5.3 - Comparação de custos entre os programas de produção obtidos através dos modelos CLSP-1 e GLSP-1



Observe que, de forma geral os custos de troca, estocagem e penalidades associados ao desvio em relação aos níveis de estoque, apresentam aproximadamente as mesmas proporções nos programas de produção resultantes dos modelos CLSP-1 e GLSP-1. No entanto, o programa de produção fornecido pelo modelo CLSP-1 resulta em um custo total de aproximadamente 1.083 unidades monetárias a menos em comparação com o custo total envolvido no programa de produção obtido através do modelo GLSP-1.

A Figura 5.3 mostra que ambos os planos de produção apresentam aproximadamente igual proporção nos custos considerados. Observe que tanto no plano de produção do modelo CLSP-1 como no plano do GLSP-1, a maior proporção dos custos totais deve-se aos custos de preparação dependentes da sequência (57% e 53% dos custos totais, respectivamente). Os custos de estoque representam 28% dos custos totais nos dois planos de produção, entretanto as penalidades por quantidade fora dos níveis estabelecidos de estoque apresentam aproximadamente as mesmas proporções nos custos totais, para os dois planos de produção.

Desta forma, a partir das informações apresentadas sobre o resultado dos modelos propostos, podemos ressaltar que tanto o modelo CLSP-1 como o GLSP-1 fornecem planos de produção adequados e representativos do sistema de produção estudado. Observou-se que ambos os planos são similares quanto ao consumo de capacidade e quanto aos custos envolvidos no plano de produção sugerido. Estes planos atendem a totalidade da demanda sem atrasos e tendem a controlar os níveis de estoques finais em cada período, ao longo do horizonte de planejamento.

5.2 Comparação com o plano de produção da fábrica

Este estudo computacional tem com objetivo comparar os planos de produção obtidos a partir dos modelos propostos com o plano de produção da fábrica, para o exemplar estudado na seção anterior (Seção 5.1).

A geração de programas de produção de acordo com as previsões de demanda representa um desafio para os tomadores de decisão neste sistema de produção. Por isto, muitas vezes os planos de produção definidos na fábrica apresentam atrasos em relação às previsões de demanda. A fim de realizar comparações entre os programas de produção de forma adequada e coerente, os modelos CLSP-1 e GLSP1 foram adaptados de modo que sejam permitidos atrasos em relação às previsões de demanda. Uma nova variável positiva é acrescentada, e a função objetivo e as restrições de balanceamento de estoque são alteradas em cada uma das formulações, como segue.

$$\text{Minimizar } \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K (h_k I_{kt} + g_k I_{kt}^-) + \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N c_{ij} z_{lijt} + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K (\alpha_k E_{kt}^+ + \beta_k E_{kt}^-) \quad (5.1)$$

$$I_{kt} - I_{kt}^- = I_{k(t-1)} - I_{k(t-1)}^- + \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^N p_{ki} x_{lit} - d_{kt} \quad \forall t=1, \dots, T; k=1, \dots, K \quad (5.2)$$

$$I_{kt}^- \geq 0 \quad \forall k=1, \dots, K; t=1, \dots, T \quad (5.3)$$

em que I_{kt}^- representam as unidades em atraso do produto k ao final do período t , e g_k representa o custo unitário de atraso associado a cada produto. Desta forma, o modelo CLSP-1 com considerações de atraso corresponde às equações (5.1), (5.2), (4.4) - (4.11), e (5.3).

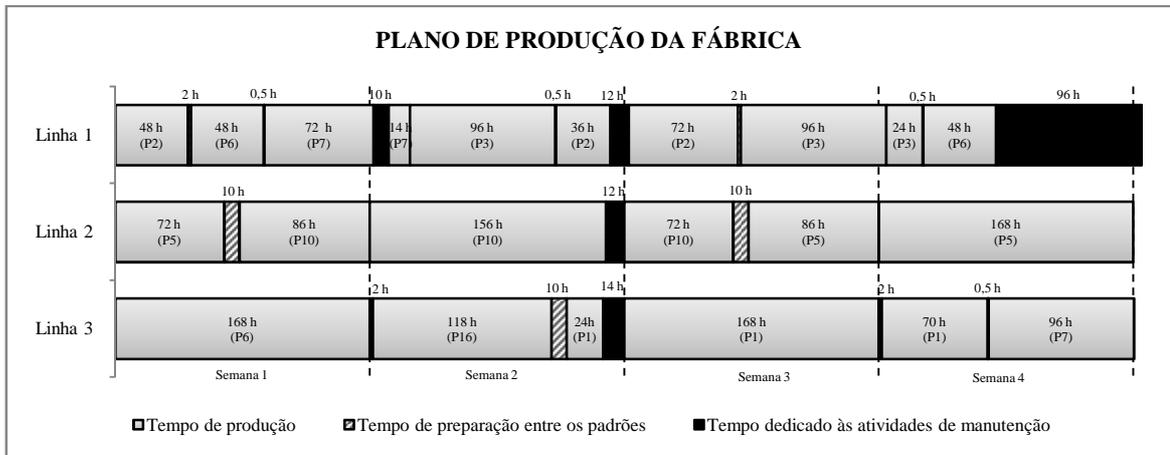
Da mesma forma, o modelo GLSP-1 com considerações de atrasos compreende as equações (5.4), (5.5), (4.15)-(4.21) e (5.3).

$$\text{Minimizar } \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K (h_k I_{kt} + g_k I_{kt}^-) + \sum_{s=1}^S \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N c_{ij} z_{lijts} + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K (\alpha_k E_{kt}^+ + \beta_k E_{kt}^-) \quad (5.4)$$

$$I_{kt} - I_{kt}^- = I_{k(t-1)} - I_{k(t-1)}^- + \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^N \sum_{s \in S_t} p_{ki} x_{lits} - d_{kt} \quad \forall t=1, \dots, T; k=1, \dots, K \quad (5.5)$$

Para facilitar as comparações entre o plano de produção da fábrica e os planos de produção obtidos a partir das diferentes abordagens, o programa de produção da fábrica foi formatado como um gráfico de Gantt, como apresentado na Figura 5.4.

Figura 5.4 - Plano de produção da fábrica



Observe que o programa de produção da fábrica ultrapassa o horizonte de planejamento, pois desconsidera o tempo envolvido em algumas trocas de padrões de moldagem no plano de produção original da fábrica. Estes tempos foram incluídos no programa de produção da Figura 5.4, de modo que os planos de produção sejam comparáveis em termos de volume de produção e custos de trocas.

A Figura 5.5 e Figura 5.6 mostram o plano de produção obtido a partir das abordagens CLSP-1 e GLSP-1 para o exemplar em particular, respectivamente, quando os atrasos em relação às previsões de demanda são permitidos. Da mesma forma que no estudo computacional apresentado na seção anterior, os estados de preparação inicial de cada linha e o tempo dedicado às operações de preparação foram considerados. Estes planos de produção correspondem à solução ótima encontrada por parte do modelo CLSP-1, a qual foi encontrada em aproximadamente 9 minutos de execução, envolvendo 5.240 variáveis. Por outro lado, o plano de produção do modelo GLSP-1 corresponde à solução final após de 3 horas de execução, envolvendo 19.208 variáveis em total.

Note que o tempo total dedicado às atividades de manutenção em cada linha e em cada período é considerado nos planos de produção das abordagens propostas, no entanto, estes tempos são apresentados de forma diferente ao plano da fábrica. Por exemplo, no plano de produção da fábrica são programadas duas atividades de manutenção para a Linha 1 na Semana 2: a primeira com duração de 10 horas programada ao início da semana, e a segunda com duração de 12 horas programada ao final da mesma semana. Os planos das abordagens CLSP-1 e GLSP-1 apresentam estas atividades de manutenção de forma consolidada ao final do período (Figura 5.5 e Figura 5.6). Considerando que as atividades de manutenção independem do padrão de moldagem utilizado na linha, estas são incorporadas na modelagem

como uma redução da capacidade disponível, de modo que estas atividades podem ser realizadas sem alterações no resultado dos programas de produção obtidos através das abordagens propostas.

Figura 5.5 - Plano de produção resultante do modelo CLSP-1, com considerações de atrasos

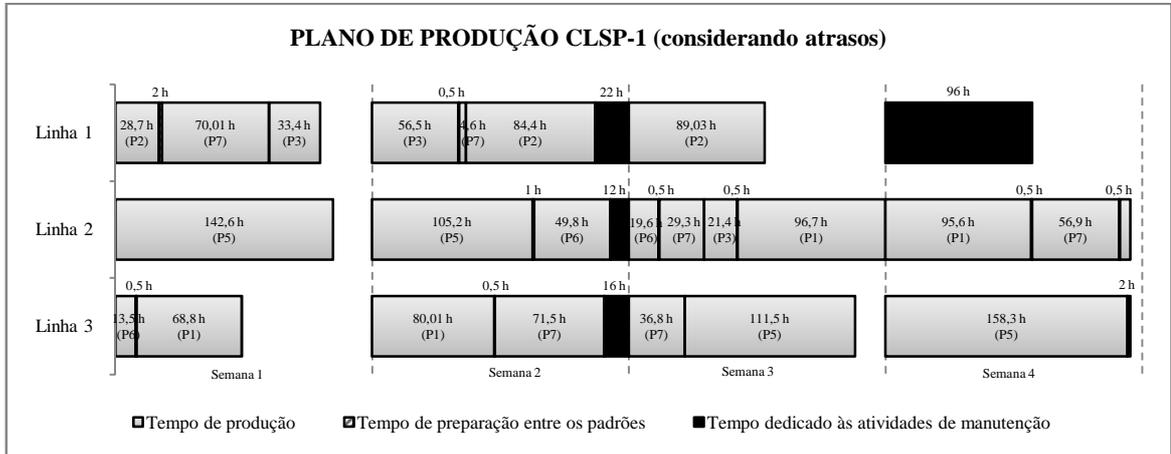
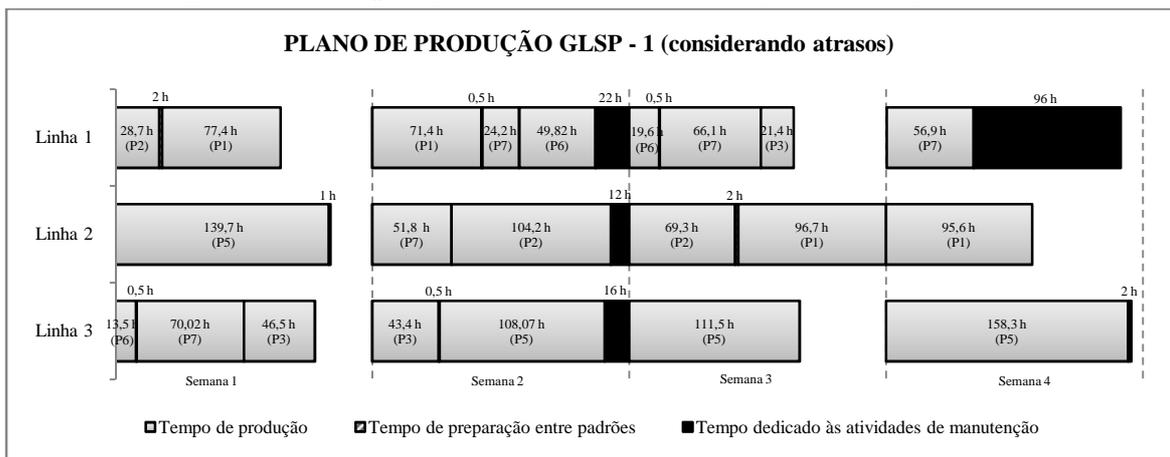


Figura 5.6 - Plano de produção resultante do modelo GLSP-1, com considerações de atrasos



A análise dos diferentes planos de produção mostra que o programa da fábrica incorre na utilização total da capacidade, entretanto os planos gerados pelas abordagens propostas apresentam um menor consumo da mesma. A Tabela 5.7 apresenta a utilização de capacidade em cada plano de produção, especificado para cada linha e para o sistema de produção completo.

Tabela 5.7 - Consumo de capacidade dos programas de produção, com permissão de atrasos.

PLANO DE PRODUÇÃO	CONSUMO DE CAPACIDADE			Total do sistema de produção
	Linha 1	Linha 2	Linha 3	
Fábrica	100,99 %	100 %	100,08 %	100,32 %
CLSP-1 (com atrasos)	66,63 %	94,98 %	82,78 %	82,30 %
GLSP-1 (com atrasos)	75,63 %	84,88 %	84,45 %	81,99 %

O programa de produção da fábrica incorre em um maior consumo da capacidade total do sistema, inclusive resulta em um consumo de capacidade adicional de 0,32%, por causa dos tempos para operações de trocas entre padrões que não foram considerados no programa de produção original da fábrica. As abordagens CLSP-1 e GLSP-1 geram planos de produção similares em relação ao consumo de capacidade do sistema de produção, utilizando aproximadamente 18% a menos da capacidade indicada no plano da fábrica. Note também que, embora a abordagem GLSP-1 apresente um menor consumo na capacidade total, a abordagem CLSP-1 programa a produção de modo que a Linha 1 e a Linha 2 incorrem no menor consumo de capacidade em comparação com os demais planos de produção.

A Tabela 5.8 apresenta o tempo dedicado à preparação das linhas, ou seja, quando são realizadas trocas entre os padrões de moldagem e a porcentagem deste tempo em relação à capacidade total utilizada. Para todas as situações, o programa de produção da fábrica indica um maior tempo de preparação. Perceba também que, tanto o plano de produção resultante do modelo CLSP-1, como do modelo GLSP-1, utilizam apenas 6,5 horas para operações de preparação nas linhas, o que corresponde aproximadamente 18,05% do tempo dedicado para as mesmas operações no plano de produção da fábrica (36 horas).

Tabela 5.8 - Tempo dedicado às operações de preparação em cada plano de produção, com permissão de atrasos.

Plano de produção	Linha 1	Linha 2	Linha 3	Total do sistema de produção
Fábrica	5,5 h (0,94%)	20 h (3,03%)	10,5 h (1,60%)	36 h (1,921%)
CLSP-1 (com atrasos)	2,5 h (0,68%)	3 h (0,48%)	1 h (0,18%)	6,5 h (0,42%)
GLSP-1 (com atrasos)	3,5 h (0,84%)	2 h (0,44%)	1 h (0,22%)	6,5 h (0,42%)

As diferenças entre os tempos de preparação dos planos de produção estudados podem ser explicadas pela escolha de diferentes padrões de moldagem no plano de produção da fábrica, que resultam em um maior tempo de preparação das linhas de produção.

Considerando que os modelos CLSP e GLSP foram adaptados para permitir atrasos, a Tabela B.1, Tabela B.2 e Tabela B.3 no Apêndice B- são apresentadas para analisar o volume produzido e o atendimento da demanda em cada um dos planos de produção. Estas tabelas apresentam para cada período, as unidades produzidas de cada item (primeira coluna), o volume em estoque (segunda coluna), e a proporção da demanda que foi atendida sem atrasos nesse período (terceira coluna). Outros elementos a serem considerados correspondem aos níveis de estoque ao final de cada período são analisados em relação aos níveis de estoque definidos, tanto no plano de produção da fábrica como nos planos de produção resultantes dos modelos CLSP-1 e GLSP-1, apresentados na Tabela B.4, Tabela B.5 e Tabela B.6 no

Apêndice B-. A Tabela 5.9 apresenta de forma resumida as informações relacionadas ao volume total produzido, unidades em estoque, unidades em atraso e o desvio dos volumes em estoque em relação aos níveis estabelecidos, ao final do horizonte de planejamento, para cada abordagem.

Tabela 5.9 - Volume total produzido, níveis de estoque e atrasos ao final do horizonte de planejamento

	FÁBRICA	CLSP-1	GLSP-1
Volume total produzido	16.157.858	13.457.825	13.397.616
Nível de estoque ao final do horizonte	4.579.267	1.575.648	1.535.645
Volume em atraso ao final do horizonte	811.058	507.714	527.920
Unidades em estoque acima do nível máximo de estoque no final do horizonte	1.521.469	77.850	77.850
Unidades em estoque abaixo do nível mínimo de estoque no final do horizonte	472.375	302.389	343.389

Quando observamos o atendimento da demanda produto a produto no plano de produção da fábrica (Tabela B.1 - Apêndice B-), notamos que a demanda da maioria dos produtos é atendida sem atrasos, em cada período de tempo. No entanto, quando compararmos com os planos de produção resultantes dos modelos CLSP-1 e GLSP-1, notamos que ao final do horizonte de planejamento, o volume em atraso sugerido pela fábrica é consideravelmente maior que a quantidade em atraso sugerida nos programas dos modelos propostos, resultando em 811.058 unidades, que corresponde a 59,75% a mais que a quantidade atrasada no plano resultante do modelo CLSP-1, e 53,63% a mais que a quantidade registrada nos resultados do modelo GLSP-1.

Outros elementos importantes nos planos de produção para serem são a quantidade produzida e o volume mantido em estoque, ao final do horizonte de planejamento. Como esperado, ao analisar o consumo da capacidade o plano de produção da fábrica indica a produção de um maior volume de produtos, assim como mantém uma maior quantidade de produtos em estoque ao longo do horizonte de planejamento. Note que o plano de produção da fábrica indica um volume de produção aproximadamente de 3.000.000 unidades a mais que o volume de produção indicado nos planos CLSP-1 e GLSP-1, assim como os níveis de estoque desta são aproximadamente três vezes maiores ao final do horizonte de planejamento, em comparação às abordagens propostas.

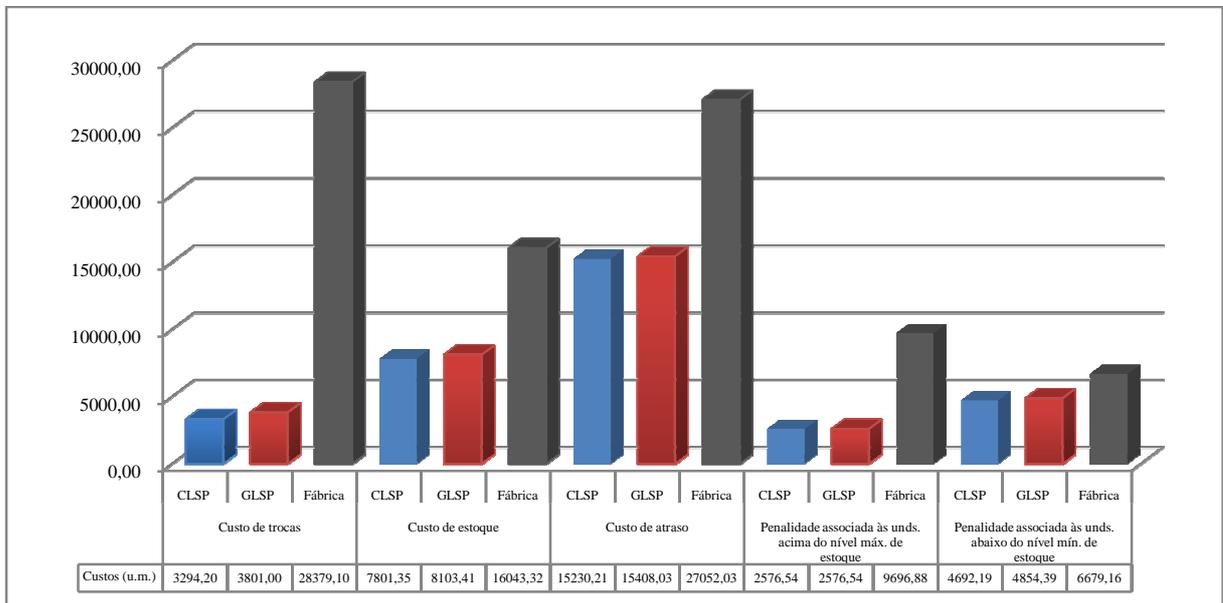
Por outro lado, comparações entre o plano de produção da fábrica e os resultados dos modelos propostos, em relação aos níveis mínimo e máximo de estoque mostram que, ao longo do horizonte de planejamento, os modelos mantêm os níveis de estoque dentro dos níveis definidos para um maior número de produtos, em comparação com o plano da fábrica

(Tabela B.4, Tabela B.5 e Tabela B.6). Ao final do horizonte de planejamento (Tabela 5.9) note que, aproximadamente 33% do volume mantido em estoque no plano de produção da fábrica encontra-se acima do nível máximo de estoque definido, entretanto nos planos de produção do CLSP-1 e GLSP-1 esta proporção corresponde unicamente ao 4,5% e 5,1%, respectivamente. Da mesma forma, os planos CLSP-1 e GLSP-1 sugerem níveis de estoque com menores desvios em relação ao nível mínimo definido ao final do horizonte de planejamento.

Analisando-se os custos envolvidos nos diferentes planos de produção, temos que o plano de produção da fábrica consiste em um custo total de 87.850 u.m., enquanto o CLSP-1 resulta em um custo total de 33.594 u.m., e o GLSP-1 em 34.743 u.m. Note que, o custo total dos programas de produção dos modelos propostos é aproximadamente 61,76% menor que o custo total da fábrica no caso do CLSP-1, e 60,45% menor no caso do GLSP-1.

A Figura 5.7 apresenta uma comparação entre os custos de troca entre padrões, custos de atraso, custos de estocagem, e penalidades associadas ao desvio de estoque para cada plano de produção.

Figura 5.7 - Comparação de custos entre o plano de produção da fábrica e os planos resultantes dos modelos propostos, com considerações de atraso.



De forma geral, os programas de produção resultantes das abordagens propostas incorrem em custos de trocas, estoque e atraso, consideravelmente menores que os custos envolvidos no plano de produção da fábrica. Perceba que no plano de produção da fábrica, a maior parte dos custos totais corresponde aos custos de trocas (32,30%) e os custos de atraso (30,79%). No entanto, nas abordagens CLSP-1 e GLSP-1 a maioria dos custos é por causa dos

atrasos (45,34% e 44,35%, respectivamente), seguido pelos custos de estocagem, que representam aproximadamente 23% dos custos totais nas duas abordagens.

A maior diferença entre os custos dos diferentes programas de produção apresenta-se nos custos de troca, sendo que os planos obtidos a partir das abordagens CLSP-1 e GLSP-1 apresentam um custo de troca aproximadamente 88,39% e 86,60% menor que o custo de troca envolvido no programa de produção da fábrica, respectivamente. Esta diferença de custos é grande devido ao alto custo de preparação e às diferenças na programação dos padrões nos diferentes planos de produção.

Como esperado, a partir dos altos volumes de estoque e atrasos indicados no programa da fábrica, os custos relacionados às unidades em estoque e unidades em atraso também são maiores no plano de produção da fábrica. Isto também acontece em relação às penalidades associadas ao desvio do volume em estoque.

De forma geral, podemos concluir que os modelos CLSP e GLSP com considerações de atrasos, propõem programas de produção de menor custo que o plano de produção indicado pela fábrica. Além disso, os programas de produção obtidos através dos modelos propostos, embora não atendam totalmente a demanda, mostram um menor volume atrasado em cada período, em comparação com o plano de produção da fábrica. Os planos de produção resultantes dos modelos estudados mostram também um menor consumo de capacidade, produzem um volume menor de produto e mantém um maior controle nos níveis de estoque de cada produto, em comparação com a situação da fábrica.

No caso em que os atrasos são permitidos, os planos de produção dos modelos CLSP-1 e GLSP-1 são diferentes, porém as diferenças registradas são mínimas. Estes planos apresentam diferenças mínimas quanto aos custos envolvidos, consumo de capacidade, os níveis de produção e de estoque. Em relação ao tempo dedicado às operações de preparação das linhas, volume de produto em atraso e volume de estoque fora dos níveis estabelecidos, os resultados dos modelos propostos são praticamente iguais

Em relação aos resultados apresentados na Seção 5.1, aonde os atrasos não são permitidos, percebemos que os planos de produção apresentados nesta seção apresentam custo total menor. Ao comparar os custos de atrasos e trocas entre estas duas situações, notamos que o fato de permitir atrasos em relação às previsões de demanda, faz com que os modelos estudados tendem a incorrer em atrasos para minimizar os tempos de preparação. Isto se reflete no volume atrasado e na redução dos tempos de preparação para 6,5 horas, em relação às 27 horas de preparação sugeridas por ambos os modelos quando não são permitidos

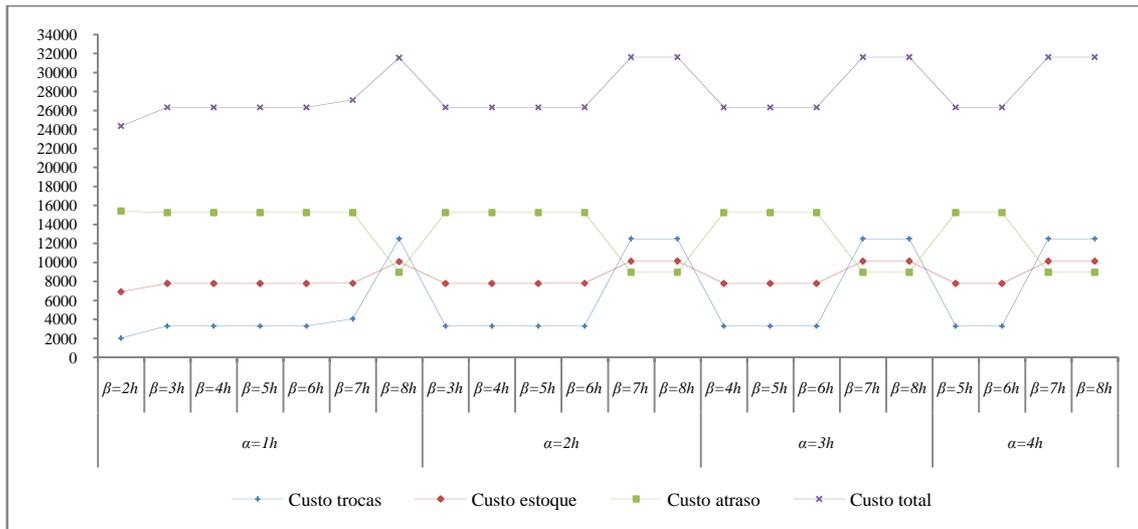
atrasos. Segundo o critério dos responsáveis pelo planejamento da produção da fábrica em estudo, os planos de produção obtidos a partir das abordagens propostas (com atrasos e sem atrasos) representam alternativas de planejamento viáveis de serem implementadas na prática, envolvendo vantagens em relação aos custos e tempos de preparação e flexibilidade na utilização da capacidade, o que permite a adequação de atividades de manutenção e produção não previstas que podem se apresentar ao longo do horizonte de planejamento.

5.2.1 Avaliação de diferentes penalidades no desvio dos níveis de estoque

Na prática da fábrica, o desvio do volume em estoque em relação aos níveis mínimo e máximo não incorre necessariamente em custos reais, porém representam uma situação indesejável que precisa ser controlada. Desta forma, a definição das penalidades para as unidades acima e abaixo dos níveis de estoque pode ou não ter influência no plano de produção resultante. Nos experimentos apresentados nas Seções 5.1 e 5.2 os valores destas penalidades foram fixados em $\alpha = 2h$ e $\beta = 4h$. Portanto, para verificar a possível influência destas penalidades no custo total da solução, várias configurações destes parâmetros foram testadas, mantendo a lógica que a penalidade por unidades abaixo do nível mínimo é maior que a penalidade por unidades acima do nível máximo de estoque. Ou seja, a falta é mais crítica que excesso de produtos. Estas configurações foram testadas no modelo CLSP-1, pois embora com diferença mínima, este modelo apresentou melhores resultados nos estudos das seções anteriores. Neste contexto, para este estudo foram testados 4 valores diferentes para α , e 7 valores diferentes para β , todos expressos em função do custo unitário de estoque h . Sendo que α corresponde à penalidade por unidades acima do nível máximo de estoque, e β corresponde à penalidade por unidades abaixo do nível mínimo de estoque.

A Figura 5.8 apresenta o custo de trocas, o custo de estoque, o custo de atraso e o custo total da solução obtida através da abordagem CLSP-1 para o exemplar estudado, considerando diversas configurações nos parâmetros α e β .

Figura 5.8 - Variação dos custos totais da solução conforme variações nos parâmetros α e β (CLPS-1 com considerações de atraso)



A partir do gráfico, pode-se notar uma variação significativa dos custos somente para os maiores valores de β . Para este caso foram isolados os custos relacionados ao desvio em relação aos níveis de estoque desejados, de modo que os custos totais apresentados na Figura 5.8 correspondem à soma dos custos de estoque, custos de trocas, e custos de atrasos. De forma geral note que, os custos totais envolvidos variam somente nos casos em que $\beta = 7h$ e $\beta = 8h$ independentemente dos valores de α .

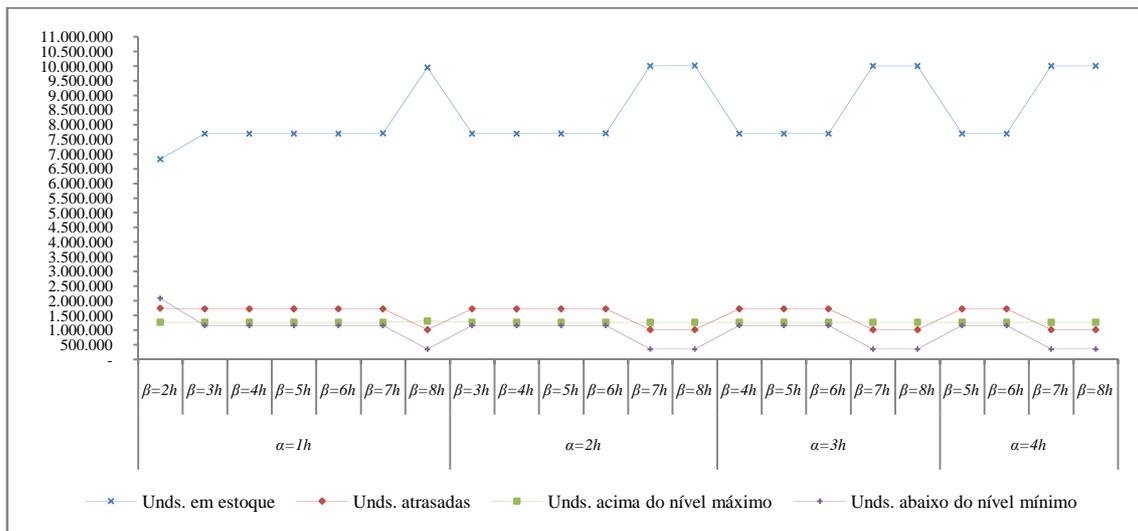
Considerando que os atrasos correspondem também a desvios em relação ao nível mínimo de estoque, a quantidade em atraso e, portanto, os custos relacionados diminuem para os maiores valores de β . Note que estes custos são os únicos que apresentam comportamento decrescente, entretanto os demais custos, inclusive os totais, aumentam. No caso em que $\beta = 7h$ e $\beta = 8h$, os custos de atraso são reduzidos em grande proporção, diminuindo aproximadamente 48%. Por outro lado, tanto os custos de trocas, como os custos de estoque aumentam em diferentes proporções. Os custos de troca para os casos em que $\beta = 7h$ e $\beta = 8h$ são até aproximadamente quatro vezes maiores que os custos de troca em outras configurações de parâmetros, entretanto os custos de estocagem aumentam aproximadamente 30%.

De modo geral, os custos totais aumentam conforme a penalidade por unidades abaixo do nível mínimo de estoque é maior do que $7h$, ou seja, quando a formulação é manipulada de modo a exercer um maior controle sobre os níveis mínimos de estoque, conforme as prioridades da fábrica. O aumento nestes custos totais deve-se principalmente aos custos de trocas, os quais aumentam em maior proporção que os custos de estoque. Em contrapartida,

para a mesma configuração dos parâmetros α e β , os custos de atraso diminuem o que indica uma redução nas unidades atrasadas ao longo do horizonte de planejamento.

Além dos custos, analisou-se também o impacto das alterações nos parâmetros α e β , em relação às quantidades em estoque, as unidades atrasadas, e as unidades fora dos níveis de estoque definidos. A Figura 5.9 apresenta estas informações da mesma forma que na Figura 5.8, sendo que as unidades indicadas correspondem se referem ao volume total, independentemente do tipo de produto.

Figura 5.9 - Variação das unidades em estoque, unidades atrasadas, e o desvio em relação aos níveis de estoque definidos, conforme variações nos parâmetros α e β (CLSP-1 com considerações de atraso)



Note que, o comportamento nos volumes de estoque é similar ao comportamento dos custos totais apresentados na Figura 5.8. Para valores de $\beta \geq 7h$, independentemente dos valores de α , o volume em estoque aumenta na mesma proporção que os custos de estoque, o qual é aproximadamente 30%. Como esperado, a partir dos custos de atraso, as unidades atrasadas ao longo do horizonte de planejamento também diminuem aproximadamente 48%, quando a penalidade por unidades abaixo dos níveis mínimos de estoque é maior ou igual que $7h$.

Observe que, o volume de produto acima do nível máximo de estoque definido se mantém o mesmo, independentemente das variações na penalidade para estes experimentos ($\alpha=1, 2, 3$ e 4). Entretanto, as unidades abaixo do nível mínimo de estoque apresentam reduções de aproximadamente 70% nos casos em que a penalidade é maior ou igual a $7h$.

De forma geral, podemos concluir que os níveis de estoque e os custos totais apresentam variações significativas apenas nos casos em que a penalidade por unidades abaixo do nível mínimo (β) é maior ou igual do que sete vezes o custo de estoque,

independentemente dos valores designados às penalidades por unidades acima do nível máximo (α). Como resposta às maiores penalidades nas unidades abaixo do nível de estoque (β), o volume total de estoque aumenta. Este aumento no volume em estoque implica na produção de um maior volume de produto, o que resulta em um maior número de trocas e na utilização de novos padrões de moldagem, fazendo com que os custos totais derivados do plano de produção aumentem aproximadamente 20%. Neste sentido, o tomador de decisões possui alternativas que permitem comparar planos de produção que apresentam um custo total menor, no entanto com níveis de estoque distantes dos níveis estabelecidos, e planos de produção que incorrem em um maior custo, no entanto implicam em um maior controle nos níveis de estoque.

5.3 Comparação entre as abordagens CLSP-1 e GLSP-1

Esta seção tem como objetivo apresentar os testes realizados sobre um conjunto de exemplares que contém informações reais do sistema de produção estudado, a fim de descrever o comportamento e as diferenças no desempenho das abordagens CLSP-1 e GLSP-1. A comparação é realizada com base em 12 exemplares, cada um dos quais é resolvido pelas abordagens originalmente propostas (sem considerações de atraso), dentro de um limite de 3 horas no tempo de execução computacional.

Os exemplares testados compreendem o mesmo número de itens, períodos de tempo, padrões de moldagem e linhas de produção disponíveis (informações apresentadas no Anexo A-), no entanto, as previsões de demanda e níveis de estoque iniciais variam de um exemplar para outro, afetando a resolução do problema. Todas as informações relacionadas a cada exemplar correspondem a informações reais da fábrica e são apresentadas no Anexo B-.

A Tabela 5.10 apresenta o valor da função objetivo da solução final, o melhor limitante encontrado por cada abordagem, o *gap* dado pelo CPLEX ao término da resolução do exemplar, e a diferença de custos entre as soluções apresentadas pelas abordagens propostas.

Tabela 5.10- Comparação entre as soluções resultantes das abordagens CLSP-1 e GLSP-1

Exemp.	CLSP-1			GLSP-1			Diferença entre as soluções CLSP-1 e GLSP-1 (u.m.)
	Solução final (u.m.)	Melhor limitante (u.m.)	gap	Solução final (u.m.)	Melhor limitante (u.m.)	gap	
1	63.379,60	15.556,32	75,46%	99.312,47	8.035,07	91,91%	35.932,86
2	22.588,62	21.963,70	2,77%	23.367,62	18.282,31	21,76%	779,01
3	19.325,65	17.921,78	7,26%	24.839,57	13.019,65	47,59%	5.513,92
4	<u>38.164,13</u>	<u>30.997,54</u>	<u>18,78%</u>	<u>38.193,14</u>	<u>34.025,27</u>	<u>10,91%</u>	<u>29,01</u>
5	23.882,86	20.143,76	15,66%	27.890,56	15.128,19	45,76%	4.007,7
6	36.485,34	26.434,21	27,55%	43.781,27	19.949,47	54,43%	7.295,93
7	41.304,55	23.958,31	41,99%	41.683,36	17.876,89	57,11%	378,81
8	20.432,04	19.159,91	6,23%	20.639,77	15.046,56	27,10%	207,73
9	31.554,20	16.921,09	46,37%	35.036,83	9.367,72	73,26%	3.482,63
10	26.323,58	14.238,95	45,91%	33.254,40	7.649,75	76,99%	6.930,81
11	20.891,42	17.181,62	17,75%	22.035,90	13.734,09	37,67%	1.144,48
12	26.611,89	20.357,23	23,50%	30.140,38	14.578,77	51,63%	3.528,50

De forma geral, observe que as duas abordagens propostas não conseguem encontrar a solução ótima do problema dentro do limite de 3 horas de execução, para nenhum dos exemplares testados. Note que, para todos os exemplares, a solução incumbente fornecida pela abordagem CLSP-1 apresenta um custo significativamente menor que o custo da solução obtida através do GLSP-1. Observe na última coluna que a maior diferença entre as soluções obtidas apresenta-se no primeiro exemplar, em que o GLSP-1 apresenta uma solução, cujo custo apresenta 35.932,86 u.m. a mais que o custo da solução apresentada pelo CLSP-1. Isto é, o programa de produção apresentado pelo GLSP-1 é 56,69% mais caro.

Para o exemplar 4, as abordagens apresentam soluções com custo total similar, sendo que a solução incumbente obtida através da abordagem GLSP-1 é somente 29,01 u.m. maior que o custo da solução do CLSP-1. Note que o exemplar 4, como destacado na Tabela 5.10, é o único caso em que o GLSP-1 apresenta o melhor limitante inferior, sendo este de 34.025,27 u.m. em comparação com o limitante do CLSP de 30.997,54 u.m. De forma geral, os limitantes das duas abordagens para cada um dos exemplares são muito diferentes entre si e a menor diferença acontece no exemplar 11.

Em relação ao *gap* apresentado na Tabela 5.10, este corresponde ao *gap* indicado pelo CPLEX definido pela expressão (5.6), em que *BF* (*Best Found*) corresponde ao valor da função objetivo da solução encontrada e *BP* (*Best Possible*) à melhor solução inteira possível.

$$gap = \frac{|BF - BP|}{1^{-10} + |BF|} \quad (5.6)$$

Desta forma, o *gap* apresentado indica o quão distante encontra-se a solução incumbente da melhor solução inteira possível, com base no valor da função objetivo da solução final do exemplar considerado. Como esperado ao observar os valores das soluções, e os limitantes de cada abordagem, o *gap* das soluções obtidas a partir do GLSP-1 é maior que o *gap* das soluções geradas pelo CLSP-1 para todos os exemplares, com exceção do número 4, em que a diferença entre as soluções finais é mínima, e a diferença entre os melhores limitantes é considerável.

Com base nos exemplares testados, a abordagem GLSP-1 apresenta maior dificuldade na resolução do problema estudado. Para melhorar a análise comparativa, o número de iterações realizadas, o número de nós e o tempo que cada abordagem leva em encontrar a solução final resultante para cada exemplar são apresentados na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 - Comparação entre as abordagens CLSP-1 e GLSP-1 em relação ao número iterações e de nós explorados

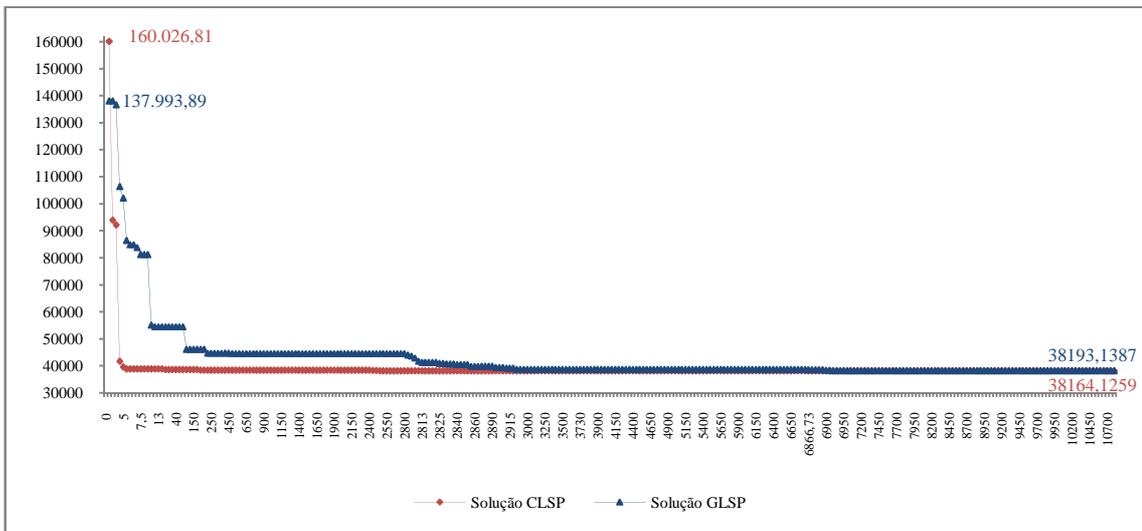
Exemp.	CLSP-1			GLSP-1		
	Número de iterações	Número de nós	Tempo aprox. em que a solução final foi encontrada	Número de iterações	Número de nós	Tempo aprox. em que a solução final foi encontrada
1	73.134.466	1.715.817	7.595, 4 seg.	95.330.301	1.625.982	10.130,15 seg.
2	107.856.687	2.423.980	9.738,6 seg.	95.451.880	482.200	7.407 seg.
3	172.549.191	3.159.853	489,6 seg.	116.831.809	1.793.658	9.029,92 seg.
4	73.474.726	1.964.520	2.514 seg.	133.601.406	2.571.915	6.919,3 seg.
5	151.875.185	15.106.766	172,9 seg.	107.235.128	2.256.200	10.495,03 seg.
6	63.008.335	1.458.281	10.105,2 seg.	106.906.609	2.837.113	10.721,39 seg.
7	55.762.552	1.453.266	8.027,4 seg.	108.292.814	1.241.474	9.750 seg.
8	81.633.167	1.484.691	1.961,4 seg.	101.417.885	1.930.742	9.898,06 seg.
9	71.247.364	1.382.816	2.177,4 seg.	98.395.503	2.532.021	10.642,23 seg.
10	68.093.840	1.459.286	7.224,6 seg.	115.549.394	2.101.085	8.338,24 seg.
11	1.033.966.665	1.414.462	7.717,02 seg.	111.918.756	1.656.009	9.738,97seg.
12	67.160.798	1.519.365	10.763,04 seg.	109.698.512	1.924.901	6.739,85seg.

De acordo às informações apresentadas, note que na maioria dos casos, o modelo GLSP-1 apresenta um maior número de iterações e um maior número de nós explorados que o modelo CLSP-1. Excepcionalmente, nos exemplares 2 e 3, a abordagem CLSP-1 apresenta um maior número de nós e iterações que a abordagem GLSP-1. Estes resultados mostram a maior dificuldade na resolução de problemas deste tipo por parte do modelo GLSP-1, em comparação com o CLSP-1.

Outro aspecto importante é o tempo em que cada uma das abordagens demora em encontrar a solução final apresentada, como apresentado na Tabela 5.11. Note que em todos os casos, exceto no último exemplar, o CLSP-1 encontra a solução final de forma mais rápida que o GLSP-1. Em nenhum dos exemplares os modelos propostos encontram a solução ótima ou apresentam a mesma solução final, no entanto, a análise do tempo aproximado em que a

solução final foi encontrada pode ser interessante para analisar o desempenho computacional dos modelos propostos. Observe, por exemplo, o exemplar em que a diferença entre as soluções do CLSP-1 e GLSP-1 é mínima (exemplar 4). Note que o CLSP-1 encontra a solução final em aproximadamente 41 minutos, entretanto o GLSP-1 demora quase 2 horas. A fim de observar melhor a forma em que cada abordagem encontra a solução final ao longo do tempo de execução, a Figura 5.10 apresenta o desempenho computacional de cada abordagem para o exemplar 4, em que a diferença entre as soluções finais das duas abordagens é mínima.

Figura 5.10- Desempenho computacional das abordagens CLSP-1 e GLSP-1 na resolução do exemplar 4



Observe que, apesar da busca na região factível por parte da abordagem CLSP-1 começar com uma solução de custo muito alto, inclusive maior que o custo da primeira solução encontrada pelo GLSP-1, após 5 segundos de execução o CLSP-1 encontra uma solução cujo custo é 75% menor que o custo da primeira encontrada. No mesmo intervalo de tempo, o GLSP-1 apresenta uma solução com custo aproximadamente 48% menor que o custo da primeira solução. Como indicado na Tabela 5.11, o CLSP-1 encontra a solução apresentada ao término do limite no tempo de execução em aproximadamente 42 minutos, enquanto o GLSP-1 encontra a solução apresentada ao final, em aproximadamente 2 horas.

Na busca de melhorias no desempenho das abordagens testadas, e nos limitantes gerados pelas mesmas, foram também testados os modelos CLSP-2 e GLSP-2 que consistem em algumas reformulações e desigualdades válidas adequadas aos modelos CLSP-1 e GLSP-1. A próxima seção apresenta os resultados dos experimentos realizados.

5.4 Comparação entre os modelos CLSP-2 e GLSP-2

As formulações CLSP-2 e GLSP-2 foram testadas no conjunto de exemplares a partir dos quais foram testados os modelos CLSP-1 e GLSP-1 na seção anterior. Estes resultados são apresentados na Tabela 5.12 e Tabela 5.13.

Tabela 5.12 - Comparações entre as soluções das abordagens CLSP-2 e GLSP-2

Exemp.	CLSP-2			GLSP-2		
	Solução final (u.m.)	Melhor limitante (u.m.)	gap	Solução final (u.m.)	Melhor limitante (u.m.)	gap
1	63.379,60	23.908,45	62,28%	71.568,38	26.872,47	62,45%
2	22.562,54	22.562,54	-	22.562,54	22.562,54	-
3	19.325,65	18.924,78	2,07%	19.325,65	19.325,66	-
4	38.031,73	38.031,73	-	38.031,73	38.031,73	-
5	23.882,86	23.535,58	1,45%	23.882,86	23.882,86	-
6	36.508,88	27.747,56	24%	36.290,37	35.485,97	2,27%
7	39.743,95	25.438,68	36%	35.718,47	35.445,11	0,77%
8	20.432,04	20.432,04	-	20.432,04	20.432,04	-
9	31.554,20	18.628,44	40,97%	31.554,20	29.783,99	5,61%
10	33.548,76	15.359,68	54,22%	25.568,23	19.379,25	24,20%
11	20.891,42	17.181,62	17,76%	20.476,83	20.476,83	-
12	26.549,15	25.287,31	4,75%	26.727,71	25.037,12	6,32%

A Tabela 5.12 mostra melhores soluções e melhores limitantes nas duas formulações propostas nesta seção, em relação aos resultados apresentados na Seção 5.3. Observe que, diferente dos resultados dos modelos CLSP-1 e GLSP-1 testados na seção anterior, em que nenhum dos exemplares é resolvido de forma ótima por nenhum dos modelos, o CLSP-2 encontra a solução ótima em três dos exemplares testados, entretanto o GLSP-2 resolve otimamente seis exemplares.

Observe que, de forma geral, o GLSP-2 fornece melhores resultados que o CLSP-2 no conjunto de exemplares testados, gerando melhores soluções em todos eles, com exceção do Exemplar 1 e Exemplar 12. Em relação aos melhores limitantes testados, note que o GLSP-2 fornece melhores limitantes nos exemplares 1-11, sendo que estes resultam maiores ou iguais que os melhores limitantes resultantes do CLSP-2.

A superioridade do GLSP-2 nas soluções encontradas e nos melhores limitantes ao término da resolução dos exemplares é também refletido no *gap* gerado pelo CPLEX. Observe que o GLSP-2 apresenta um *gap* menor que o CLSP-2 em todos os exemplares, com exceção do Exemplar 1 e Exemplar 12. Isto acontece pois no Exemplar 1 o custo da solução gerada pelo CLSP-2 é 11,44% menor que a obtida através do GLSP-2, embora o GLSP-2

apresente um melhor limitante. Já no Exemplar 12, tanto o melhor limitante e a solução encontrada pelo CLSP-2 são melhores que no GLSP-2.

Quando comparados os resultados dos modelos CLPS-2 e GLSP-2 da Tabela 5.12 com os resultados das primeiras formulações testadas (CLSP-1 e GLSP-1) da Tabela 5.10, temos que o GLSP-2 melhora a solução encontrada em todos os exemplares, em comparação com as soluções encontradas pelo GLSP-1. Em relação às formulações do tipo CLSP, notamos que em 50% dos exemplares testados, a solução do CLSP-1 é igual à solução encontrada pelo CLSP-2, no entanto os limitantes melhoram consideravelmente. Observe também que a solução encontrada pelo CLSP-2 é melhor que a solução anterior para 4 dos 12 exemplares testados. Embora o CLSP-2 apresente soluções finais de menor qualidade que a primeira formulação testada para dois dos exemplares (Exemplar 6 e 10), a abordagem CLPS-2 resulta vantajosa em comparação com o CLSP-1, porém o GLSP-2 apresenta melhores resultados de forma geral.

A Tabela 5.13 também mostra o melhor desempenho da formulação GLSP-2 em comparação com a abordagem CLSP-2. Note que, de modo geral, o CLSP-2 explora um maior número de nós que o GLSP-2 em todos os exemplares, com exceção do exemplar 8, assim como também apresenta um maior número de iterações em aproximadamente 50% dos exemplares.

Tabela 5.13 - Comparações entre as abordagens CLSP-2 e GLSP-P2, em relação ao número de iterações e nós explorados

Ex.	CLSP-2				GLSP-2			
	Número de iterações	Número de nós	Tempo de execução	Tempo aprox. em que a solução final foi encontrada	Número de iterações	Número de nós	Tempo de execução	Tempo aprox. em que a solução final foi encontrada
1	40.830.833	874.662	3h 1,8seg.	2.388 seg..	51.576.119	139.020	3h 1,2seg.	6.971,4 seg.
2	10.610.888	115.179	1h 11min. 56,6seg.	2.244 seg.	1.640.163	29.081	1min 58,7seg.	90 seg.
3	124.611.649	2.624.087	3h 1,2seg.	10.314 seg.	80.613.583	783.791	1h 37min. 36,9seg.	3.858 seg.
4	17.623.538	563.382	23min. 31,1seg.	816 seg.	5.336.901	51.260	7 min. 13,5seg.	301,2 seg.
5	118.822.964	2.136.184	3h 1seg.	5.052 seg.	29.172.337	276.485	37min. 57,3seg.	2.250 seg.
6	57.661.848	998.301	3h 1,1seg.	183 seg.	70.351.473	613.338	3h 1,5seg.	4.980 seg.
7	60.764.798	1.353.695	3h 1,6seg.	2.196 seg.	131.387.377	2.572.569	3h 2,2seg.	3.610,8 seg.
8	17.204.574	386.019	21min. 16,8seg.	156 seg.	19.914.302	595.261	26min. 31seg.	390 seg.
9	81.897.099	1.307.486	3h 1,5seg.	4.248 seg.	101.973.465	355.892	3h 0,9seg.	3.780 seg.
10	67.439.020	1.783.652	3h 1,9seg.	84 seg.	149.666.748	959.170	3h 1,4seg.	6.024 seg.
11	1.033.966.665	1.414.462	3h 1,3seg.	564 seg.	65.306.238	624.583	1h 46min. 2seg.	1.044 seg..
12	102.720.966	2.090.188	3h 1,5seg.	396 seg.	134.990.655	662.521	3h 1,1seg.	1.022,4 seg.

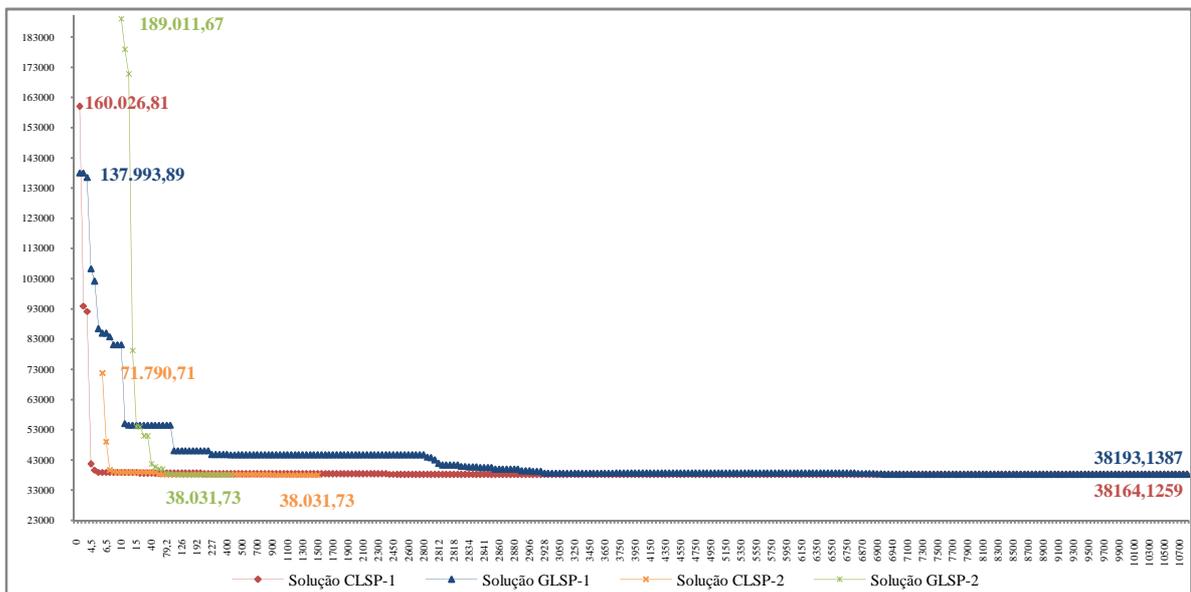
Da mesma forma que nos estudos da seção anterior, o tempo de execução foi limitado para 3 horas, no entanto, diferente aos resultados apresentados na Tabela 5.11 para os modelos CLSP-1 e GLSP-1, o tempo de resolução dos exemplares resulta menor nos casos em

que a solução ótima é encontrada. Observe que, nos casos em que a solução ótima é encontrada pelas duas abordagens, em dois dos três casos o GLSP-2 encontra esta solução em um tempo consideravelmente menor que o CLSP-2 (Exemplares 2 e 4).

Perceba que, nos casos em que os exemplares são resolvidos de forma ótima pela abordagem GLSP-2, os tempos de execução são pequenos, sendo que o melhor caso apresenta-se no Exemplar 4, em que a solução ótima é encontrada após aproximadamente 7 minutos de execução. Já no Exemplar 3, o tempo de execução resulta em aproximadamente 3.858 segundos, que é um tempo aceitável para a geração de um plano de produção que envolve decisões no nível tático e operacional, como as envolvidas no sistema de produção estudado.

Nos casos em que a solução ótima não é encontrada pelas formulações propostas, o CLSP-2 encontra esta de forma mais rápida que o GLSP-2. Para ilustrar este comportamento, da mesma forma que na seção anterior, a Figura 5.11 ilustra o desempenho computacional de todas as abordagens propostas para o exemplar 4.

Figura 5.11- Desempenho das formulações propostas para o Exemplar 4



Observe que, as abordagens CLSP-2 e GLSP-2, demoram poucos segundos a mais para encontrar uma solução inicial factível, porém esta é significativamente melhor que as soluções iniciais encontradas pelas abordagens inicialmente propostas somente para o caso do CLSP-2.

Observe que a solução inicial encontrada pelo CLSP-2 apresenta um custo total aproximadamente 63% menor que a solução encontrada pelo GLSP-2. Além disso, esta

solução é aproximadamente 55,14% melhor em termos de custos, em comparação com a solução inicial encontrada pelo CLSP-1 (160.027 u.m.). Quanto ao comportamento do GLSP-2, observe que a solução inicial encontrada apresenta um custo aproximadamente 36,97% mais alto que a solução inicial encontrada pelo GLSP-1, porém esta abordagem encontra soluções melhores rapidamente, obtendo a solução ótima em tempo de execução pequeno (433 segundos aproximadamente). Note que o modelo CLSP-2 encontra a solução ótima mais rapidamente que o GLSP-2, no entanto só consegue provar otimalidade aproximadamente 16 minutos depois que o GLSP-2.

Os resultados apresentados nesta seção demonstraram as melhorias no desempenho e na qualidade das soluções obtidas, através das reformulações dos modelos CLSP-1 e GLSP-1 testadas. De modo geral, os tempos de execução e os melhores limitantes encontrados na resolução dos exemplares são significativamente melhores e as reformulações são capazes de resolver de forma ótima alguns dos exemplares que representam o sistema de produção real, o que não foi possível quando testadas as formulações CLSP-1 e GLSP-1. Os resultados mostram também a superioridade no desempenho na abordagem GLSP-2 em comparação com as demais testadas, embora o desempenho da primeira formulação deste tipo (GLSP-1) resultou em desvantagem quando comparada com os resultados da formulação CLSP-1 (conforme apresentado na Seção 5.3). No entanto, estes resultados são particulares para o conjunto de dados estudados, pois em alguns trabalhos da literatura, como por exemplo, em Almada-Lobo et al. (2007) e Ferreira et al. (2012), abordagens baseadas no CLSP apresentam melhor desempenho que abordagens baseadas GLSP.

Para uma análise mais completa em relação ao desempenho das abordagens propostas para o problema em estudo, foram realizados experimentos computacionais sobre um conjunto de exemplares aleatórios, cujos resultados apresentam-se no Apêndice C-. Os conjuntos de dados foram gerados com base em Haase (1996) e Fleischman e Meyr (1997), e consistem em quatro grupos diferentes, cada um com dez exemplares. O procedimento para a geração destes exemplares é também descrito no Apêndice C-.

Os resultados dos estudos computacionais sobre o conjunto de exemplares aleatórios mostram que, apesar da abordagem baseada no GLSP mostrar-se competitiva, a abordagem baseada no CLSP apresenta um melhor desempenho em todos os exemplares testados. Esta última abordagem resolve todos os exemplares de forma ótima, em um tempo computacional de, no máximo, 8 minutos na maioria dos exemplares. Por outro lado, a abordagem baseada no GLSP resolve de forma ótima somente os exemplares pertencentes aos dois primeiros

grupos de instâncias, e apresenta um *gap* médio de 40,52% para o Grupo 3 e 25,48% para o Grupo 4.

Desta forma, o desempenho da abordagem GLSP é superior à abordagem CLSP somente no conjunto de exemplares representativos do sistema de produção real. Este conjunto de exemplares apresenta características importantes que podem influenciar no desempenho das abordagens propostas, como por exemplo: capacidade ajustada, tempos de preparação significativos e o fato que cada produto pode ser produzido a partir de um número reduzido de padrões de moldagem. Por exemplo, no conjunto de exemplares testados nesta seção (representativos do sistema de produção real) considerou-se 19 padrões de moldagem disponíveis, no entanto, cada produto pode ser obtido a partir de no máximo 3 desses padrões.

Adicionalmente, algumas considerações do sistema de produção real inseridas na modelagem do problema podem influenciar significativamente no desempenho das abordagens propostas, como por exemplo, a definição do número máximo de preparações por período. Neste estudo, foram definidas como suficientes 4 preparações por período, o qual influencia no desempenho da abordagem GLSP, visto que o número de variáveis e restrições nestes modelos dependem do número de micro-períodos, que é definido *a priori*.

6. CONCLUSÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho consistiu no estudo do problema de planejamento e programação da produção na indústria de embalagens em polpa moldada. A representação e descrição do sistema de produção deste tipo de indústria foram apresentadas com base no sistema de produção de uma fábrica de embalagens moldadas para acondicionamento de ovos e frutas, cujo processo é representativo para o tipo de indústria estudado. Desta forma, as abordagens de planejamento propostas podem ser estendidas para outras situações produtivas semelhantes.

Para abordar o problema, inicialmente foram propostas duas abordagens baseadas nas formulações clássicas para o dimensionamento de lotes e programação de produção CLSP e GLSP. Dentro de cada abordagem foram propostos dois modelos, os quais se diferenciam na reformulação de algumas restrições e a inclusão de algumas desigualdades válidas. Foram realizados estudos computacionais baseados em um exemplar em particular, o que permitiu comparar todos os elementos dos planos de produção gerados, verificando-se a adequação das abordagens propostas para representar as decisões envolvidas no problema estudado. Estes estudos mostraram que as abordagens propostas geram planos de produção plausíveis para o sistema de produção, apresentando-se diferenças mínimas entre os planos de produção gerados pelas duas abordagens propostas.

Similarmente, os planos de produção gerados pelas abordagens propostas foram comparados também com o plano de produção sugerido pela fábrica. Estes estudos computacionais mostraram que as abordagens CLSP-1 e GLSP-1 geram planos de produção com custo total aproximadamente 61,76% e 60,45% menores que o custo total envolvido no plano de produção da fábrica. Os resultados obtidos mostram também que os programas de produção das abordagens propostas incorrem em um menor consumo de capacidade e menor volume de produto em estoque, ao mesmo tempo em que exercem maior controle sobre os níveis de estoque em relação aos níveis estabelecidos, assim como atendem de forma mais eficaz as previsões de demanda. O plano de produção da empresa prevê uma maior utilização da capacidade produtiva, o que deve indicar uma maior preocupação com as oscilações de demanda em períodos futuros.

A fim de verificar o desempenho das abordagens propostas em relação à capacidade de resolução de exemplares para o problema em estudo, experimentos computacionais foram realizados sobre um conjunto de exemplares com informações reais. Estes estudos mostraram

que, ao término de 3 horas de execução, nenhuma das formulações inicialmente propostas (CLSP-1 e GLSP-1) conseguiu resolver de forma ótima nenhum dos exemplares considerados, e que as diferenças entre as soluções encontradas e os limitantes são significativamente grandes. No entanto, a formulação CLSP-1 apresentou melhores soluções e melhores limitantes na maioria dos exemplares, e encontrou estas soluções de forma mais rápida que o modelo GLSP-1 nestes primeiros testes.

Em uma tentativa de aprimorar o desempenho das formulações inicialmente propostas, foram incorporadas reformulações e desigualdades válidas para as formulações do tipo CLSP e GLSP propostas na literatura (CLSP-2 e GLSP-P2). Os resultados destes experimentos mostram melhorias no desempenho das formulações originalmente propostas, de modo que tanto o CLSP-2 como o GLSP-P2 resultaram em soluções finais significativamente melhores que as resultantes nas formulações iniciais, para a maioria dos exemplares testados. O modelo GLSP-2 mostrou-se superior sobre as demais formulações propostas, pois consegue a solução ótima para 50% dos exemplares, além de apresentar melhores soluções e limitantes nos demais casos em que o limite de tempo foi atingido. Por outro lado, a formulação CLSP-2 apresentou melhorias no seu desempenho em comparação com o modelo inicialmente proposto, visto que consegue resolver de forma ótima alguns dos exemplares, e os limitantes são melhores na maioria deles. Como a solução final de 50% dos exemplares permanece igual às soluções resultantes da formulação inicialmente proposta, o seu desempenho é superado pelos resultados do GLSP-2. Desta forma, o GLSP-2 foi a melhor abordagem para o problema estudado.

7. PERSPECTIVAS PARA FUTURAS PESQUISAS

Os resultados encontrados nesta pesquisa, bem como as particularidades do sistema de produção representativo da indústria de embalagens em polpa moldada, instigam o desenvolvimento de pesquisa futuras em relação às decisões de planejamento e programação da produção aplicada à indústria.

Primeiramente, as formulações do tipo CLSP e GLSP demonstram ser adequadas para representar as decisões envolvidas no problema estudado, especialmente quando consideradas desigualdades válidas e reformulações propostas na literatura. O desempenho destas formulações deve ser testado sobre um conjunto de exemplares maior e de diversos tamanhos, de modo que possa ser verificado até que ponto as formulações estudadas são viáveis para a resolução destes problemas de forma exata.

Na revisão de literatura (Capítulo 3) indica limitações nas soluções obtidas através da formulação CLSP estudada, em relação ao aproveitamento da capacidade ao final de cada período para a realização de preparações para qualquer produto. Portanto a generalização desta formulação de modo que um maior número de possíveis soluções possa ser considerado representa uma perspectiva para pesquisas futuras.

Esta pesquisa focou o processo de moldagem, que consiste no gargalo do sistema e baseou-se em formulações monoestágio para abordar o problema. A inclusão das decisões envolvidas no segundo estágio do processo de produção (processo de estampagem) através de abordagens de múltiplos estágios, e as comparações entre formulações deste tipo e abordagens de monoestágio também motivam o desenvolvimento de trabalhos futuros.

No sistema de produção estudado, as atividades de manutenção envolvem um consumo significativo da capacidade e devem ser programadas ao longo do horizonte de planejamento, levando em conta o horário de serviço da equipe de manutenção e a frequência em que estas devem ser executadas. Neste trabalho considerou-se que estas atividades foram planejadas e definidas previamente, sendo assim um dado de entrada para o planejamento e programação da produção. Desta forma, perspectivas para pesquisa futuras envolvem o problema integrado de planejamento de manutenção e programação da produção.

Finalmente, os resultados das comparações entre os planos de produção resultantes das abordagens propostas e o programa de produção da fábrica apresentaram diferenças na escolha dos padrões de moldagem utilizados. Isto sugere que a escolha dos padrões de moldagem e a conformação destes em relação aos moldes incluídos parece influenciar os

resultados dos planos de produção. Considerando que estes padrões de moldagem podem ser montados, dependendo da disponibilidade de um conjunto de moldes, as decisões de montagem dos padrões a serem utilizados podem ser integradas às decisões de planejamento e programação da produção.

REFERÊNCIAS

- ABSI, N. Models and methods for capacitated lot-sizing problems. **4OR-Q J Oper Res**, Berlim, v.6, p.311-315, 2008.
- AKSEN, D.; ALTINKEMER, K.; CHAND, S. The single-item lot-sizing problem with immediate lost sales. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v.147, n.3, p.558-566, 2003.
- ALMADA-LOBO et al. Single machine multi-product capacitated lot sizing with sequence-dependent setups. **International Journal of Production Research**, Londres, 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**, Amsterdam, v.114, p.363-375, 2008.
- ANILY, S.; TZUR, M.; WOLSEY, L. A. Multi-item lot-sizing with joint set-up costs. **Mathematical Programming**, Amsterdam, v.119, Ser. A, p.79-94, 2009.
- ARAUJO, S. A. **Modelos e métodos para o planejamento e programação da produção aplicados no setor de fundições**. 2003. 143f. Tese (Doutorado em Ciências de Computação e Matemática Computacional) - Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, ICMC-USP, São Paulo, 2003.
- ARAUJO, S. A.; ARENALES, M. N. Problema de Dimensionamento de Lotes Monoestágio com Restrição de Capacidade: Modelagem, Método de Resolução e Resultados Computacionais. **Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro, v.20, n.2, 2000.
- ARAUJO, S. A.; ARENALES, M. N.; CLARK, A. R. Joint rolling-horizon scheduling of materials processing and lot-sizing with sequence-dependent setups. **Journal of Heuristics**, Boston, v.13, p.337-358, 2007.
- ARAUJO, S. A.; ARENALES, M. N.; CLARK, A. R. Dimensionamento de lotes e programação do forno numa fundição de pequeno porte. **Gestão & Produção**, São Carlos, v.11, n.2, p.165-176, 2004.
- ARENALES, M. et al. **Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro: Elsevier Editora, 2007. 544p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL -BRASELPA 2012. Disponível em: < <http://www.braselpa.org.br>>. Acesso em: 19 dez. 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMBALAGENS - ABRE 2013. **Dados do mercado**. Disponível em:< <http://www.abre.org.br>>. Acesso em: 10 dez. 2012; 01 ago. 2013.

BERNADES, E. D.; ARAUJO, S. A.; RANGEL, S. Reformulação para um Problema Integrado de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes. **Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro, v.30, n.3, p.637-655, 2010.

BRASIL. Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas - BRT. **Dossiê Técnico, Produção de Embalagens de Papel**, 2008. Disponível em:
<<http://www.respostatecnica.org.br>> Acesso em: 20/02/2013.

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, F. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operation & Production Management**, Bradford, v.2, n.2, p.241-264, 2002.

BOUCHRIHA, H.; OUHIMMOU, M.; D'AMOURS, S. Lot sizing problem on a paper machine under a cyclic production approach. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v.105, p.318-328, 2007.

BRAHIMI, N. et al. A. Single item lot sizing problems. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v.168, n.1, p.1-16, 2006.

BRÜGGEMANN, W.; JAHNKE, H. The discrete lot-sizing and scheduling problem: Complexity and modification for batch availability. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v.124, p.511-528, 2000.

CAMARGO, V. C. B. **Optimization of process in textile industry: models and solutions methods**. 2012. 119 f. Tese (Doutorado em Ciência da computação e matemática computacional) - Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação - ICMC - USP, São Carlos, 2012.

CLARK, A. R.; CLARK, S. J. Rolling-horizon lot-sizing when set-up times are sequence-dependent. **International Journal of Production Research**, Londres, v.8, n.10, p.2287-2307, 2000.

CLARK, A.; MAHDIEH, M. Production Lot Sizing and Scheduling with Non-Triangular Sequence-Dependent Setup Times. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 43, 2011, Ubatuba. **Proceedings...**[S.1.]; SOBRAPO, 2011. p.3470-3481.

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**, Nova York, v.13, n.2, p.111-121, 2010.

DAVIS, M.; CHASE, R. B.; AQUILANO, N. J. **Fundamentos da Administração da Produção**. 3 ed. São Paulo: Bookman, 2001. 598p.

DEFALQUE, C. M. **Estratégias para incorporação das decisões de sequenciamento em um problema integrado de produção de bebidas**. 2010. 106 f. Dissertação (Mestrado em Matemáticas) - Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", São José de Rio Preto, 2010.

DREXL, A.; HAASE, K. Proportional lot sizing and scheduling. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v.40, n.1, p.73-87, 1995.

DREXL, A.; KIMMS, A. Lot sizing and scheduling - Survey and extensions. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v.99, n.2, p.221-235, 1997.

ERLENKOTTER, D. Ford Whitman Harris and the economic order quantity model. **Operations Research**, Basingstoke, v.38, p.937-946, 1990.

FANDEL, G.; STAMMEN-HEGENE, C. Simultaneous lot sizing and scheduling for multi-product multi-level production. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v.104, p.308-316, 2006.

FERREIRA, D. et al. Single-stage formulations for synchronised two-stage lot sizing and scheduling in soft drink production. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v.136, p.255-265, 2012.

FERREIRA, D. et al. Heuristic and meta-heuristics for lot sizing and scheduling in the soft drinks industry: a comparison study. In: XHAFIA, F.; ABRAHAM, A. (Ed.) **Metaheuristics for scheduling in industrial and manufacturing applications** [S.l.]: Springer, 2008. p.169-210. (Studies in Computational Intelligence, v.128).

FERREIRA, D.; MORABITO, R.; RANGEL, S. Um modelo de otimização inteira mista e heurísticas *relax and fix* para a programação da produção de fábricas de refrigerantes de pequeno porte. **Produção**, São Paulo, v.18, n.1, p.76-88, 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**, Amsterdam, v.196, p.697-706, 2009.

FERREIRA, D.; MORABITO, R.; RANGEL, S. Relax and fix heuristics to solve one-stage one-machine lot-scheduling models for small-scale soft drink plants. **Computers & Operation Research**, Nova York, v.37, p.684-691, 2010.

FLEISCHMANN, B. The discrete lot-sizing and scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v.44, n.3, p.337-348, 1990.

FLEISCHMANN, B.; MEYER, H. The General Lot-sizing and Scheduling Problem. **Operation Research Spectrum**, Berlin, v.19, n.1, 1997.

GICQUEL, C.; MINOUX, M.; DALLERY, Y. Capacitated lot sizing models: a literature review. **HyperArticles en Ligne** 2008. Disponível em <<http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00255830/>>. Acesso em: 15/03/2013.

GICQUEL, C.; MINOUX, M.; DALLERY, Y. On the discrete lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent changeover times. **Operations Research Letters**, Amsterdam, v.37, n.1, p.32-36, 2009.

GOPALAKRISHNAN, M. A modified framework for modeling setup carryover in the capacitated lot-sizing problem. **International Journal of Production Research**, Londres, v.38, n.14, p.3421-3424, 2000.

- GOPALAKRISHNAN, M. et al. Tabu-Search Heuristic for the Capacitated Lot-Sizing Problem with Set-up Carryover. **Management Science**, Providence, v.47, n.6, p.851-863, 2001.
- GUPTA, D.; MAGNUSSON, T. The capacitated lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent setup costs and setup times. **Computers & Operations Research**, Nova York, v.32, n.4, p.727-747, 2005.
- GOPALAKRISHNAN, M.; MILLER, D. M.; SCHMIDT, C. P. A framework for modelling setup carryover in the capacitated lot sizing problem. **International Journal of Production Research**, Londres, v. 33, n. 7, p. 1973-1988, 1995.
- HAASE, K. Capacitated lot-sizing with sequence dependent setup costs. **Operation Research Spectrum**, Berlim, v.18, p.51-59, 1996.
- HAASE, K.; KIMMS, A. Lot sizing and scheduling with sequence-dependent setup costs and times and efficient rescheduling opportunities. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v.66, p.159-169, 2000.
- HANS, E.; VAN DE VELDE, S. The lot sizing and scheduling of sand casting operations. **International Journal of Production Research**, Londres, v.49, n.9, p.2481-2499, 2011.
- HAX, A.; CANDEA, D. **Production and inventory management**. New Jersey: Prentice Hall; Englewood Cliff, 1984. 199.
- HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introduction to operations research**. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 2002. 1197 p.
- KARIMI, B; GHOMI, S. M. T. F.; WILSON, J. M. The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms. **Omega**, Elmsford, v.31, n.5, p.365-378, 2003.
- KOÇLAR, A.; SÜRAL, H. A note on “The general Lot sizing and scheduling problem”. **Operation Research Spectrum**, Berlim, v.27, p.145-146, 2005.
- KOVÁCS, A.; BROWN, K. N.; TARIM, S. A. An efficient MIP model for the capacitated lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent setups. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v.118, p.282-291, 2009.
- LUCHE, J. R. D.; MORABITO, R. Otimização na programação da produção de grãos eletrofundidos: um estudo de caso. **Gestão & Produção**, São Carlos, v.12, n.1, p.135-149, 2005.
- LUCHE, J. R. D.; MORABITO, R.; PUREZA, V. Combining process selection and lot sizing models for production scheduling of electrofused grains. **Asia-Pacific Journal of Operational Research**, Singapore, v.26, n.3, p.421-443, 2009.
- LUSTOSA, L. et al. **Planejamento e Controle da Produção**. Elsevier Brasil, 2008. 355p. (Coleção CAMPUS- ABEPRO)

- 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**, Amsterdam, v.150, p.177-192, 2007.
- MENEZES, A. A.; CLARK, A.; ALMADA-LOBO, B. Capacitated Lot-sizing and Scheduling with Sequence-dependent, Period Overlapping and Non Triangular. **Journal of scheduling**, Nova York, v.14, n.2, p.209-219, 2011.
- MEYR, H. Simultaneous lotsizing and scheduling on parallel machines. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v.139, p.277-292, 2002.
- MORABITO, R.; PUREZA, V. Modelagem e Simulação In: MIGUEL, P. A. C. (Ed.) **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. Rio de Janeiro: Campus/Elsevier, 2009.p.165-195
- PATTLOCH, M.; SCHMIDT, G.; KOVALYOV, M. Y. Heuristic algorithms for lotsize scheduling with application in the tobacco industry. **Computers & Industrial Engineering**, Nova York, 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**, Rio Grande do Sul, v.2, 2010.
- POCHET, Y.; WOLSEY, L. A. **Production Planning by Mixed Integer Programming**. [S.l.]: Springer, 2006.477 p.
- POLDI, K. C.; ARENALES, M. N. O problema de corte de estoque unidimensional multiperíodo. **Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro, v.30, n.1, p.153-174, 2010.
- QUADT, D.; KUHN, H. Capacitated lot-sizing with extensions: a review. **4OR-Q J Oper Res**, Berlim v.6, p.61-83, 2008.
- SALOMON, M. et al. Solving the discrete lotsizing and scheduling problem with sequence dependent set-up times using the Travelling Salesman Problem with time windows. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v.100, p. 494-513, 1997.
- SANTOS, M. O.; ALMADA-LOBO, B. Integrated pulp and paper mill planning and scheduling. **Computers & Industrial Engineering**, Nova York, v.63, p.1-12, 2012.
- SANTOS-MEZA, E.; SANTOS, M. O.; ARENALES, M. N. A lot-sizing in an automated foundry. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v.139, p.490-500, 2002.
- SILVA, C.; MAGALHAES, J. M. Heuristic lot size scheduling on unrelated parallel machines with applications in the textile industry. **Computers & Industrial Engineering**, Nova York, v.50, p. 76-89, 2006.
- SOX, C. R.; GAP, Y. The capacitated lot sizing problem with setup carry-over. **III Transactions**, Norcross, v.31, p.173-181, 1999.

STAGGEMEIER, A. T.; CLARK, A. R. A survey of lot-sizing and scheduling models. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 33., 2001, Campos de Jordão. **Proceedings...** [S. 1.]: SOBRAPO, 2001.

SURIE, C. Modeling of period overlapping setup times. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v.174, p.874-886, 2006.

SURIE, C.; STADTLER, H. The Capacitated Lot-Sizing Problem with linked Lot Sizes. **Management Science**, Providence, v.49, n.8, p.1039-1054, 2003.

TOLEDO, C. F. M. et al. Um modelo de otimização para o problema integrado de dimensionamento de lotes e programação da produção em fábrica de refrigerantes. **Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro, v. 17, n.1, p.155-186, 2007.

TOLEDO, C. F. M. et al. Multi-population genetic algorithm to solve the synchronized and integrated two-level lot sizing and scheduling problem. **International Journal of Production Research**, Londres, v. 47, n. 11, p.3097-3119, 2009.

TOLEDO, C. F. M.; ARANTES, M. D.; FRANÇA, P. M. Tabu search to solve the synchronized and integrated two-level lot sizing and scheduling problem. In: ANNUAL CONFERENCE ON GENETIC AND EVOLUTIONARY COMPUTATION, 13., 2011. Dublin. **Proceedings...**[S.1.]:ACM, 2011. p.443-448.

TOSO, E. A. V.; MORABITO, R.; CLARK, A. Combinação de abordagens GLSP e ATSP para o dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção de suplementos para nutrição animal. **Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro, v.28, n.3, p.423-450, 2008.

TOSO, E. A. V.; MORABITO, R.; CLARK, A. Lotsizing and sequencing optimization at an animal-feed plant. **Computers & Industrial Engineering**, Nova York, v.57, p.813-821, 2009.

TRASCHEL, S. et al. A hybrid general lot-sizing and scheduling formulation for a production process with a two-stage product structure. **International Journal of Production Research**, Londres, v.19, n.9, p.2463-2480, 2011.

VANDERBECK, F. Lot-Sizing with Star-Up Times. **Management Science**, Providence, v.44, n.10, p.1409-1425, 1998.

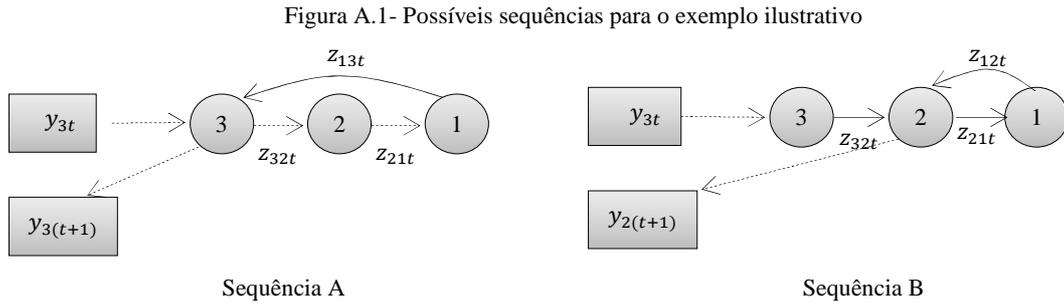
VOß, S.; WOODRUFF, D. L. **Introduction to computational optimization models for production planning in a supply chain**. 2nd [S.1.]: Springer, 2003. 233 p.

APÊNDICES

A- Exemplo ilustrativo para verificação das restrições de eliminação de ciclos desconexos na formulação CLSP.

O exemplo a seguir apresenta o caso descrito na Seção 3.1.1 do Capítulo 3, em que as restrições de eliminação de ciclos desconexos da formulação apresentada para o CLSP, não consideram soluções em que, caso exista uma preparação ao final do período para aproveitar a capacidade remanescente, esta possa ser realizada para qualquer outro item diferente ao primeiro programado.

Considere as duas sequências apresentadas na Figura A.1. A seguir são apresentadas as restrições (3.18) e (3.20) para eliminação de ciclos desconexos, considerando especificamente as possíveis soluções representadas pelas sequências A e B. Desta forma, mostra-se que a solução representada pela Sequência B não satisfazem estas restrições.



▪ Restrições para eliminação de ciclos desconexos - CLSP(3.18)

$$f_{it} + N \cdot z_{ijt} - (N - 1) - N \cdot y_{it} \leq f_{jt} \quad \forall 1 \leq i, j \leq N / i \neq j; 1 \leq t \leq T$$

Sequência A

Para $i=1$ e $j=2$:

$$f_{1t} + N \cdot z_{12t} - (N - 1) - N \cdot y_{1t} \leq f_{2t} \Rightarrow f_{1t} - N + 1 \leq f_{2t} \Rightarrow f_{1t} + 1 \leq f_{2t} + N \quad [1]$$

Para $i=1$ e $j=3$:

$$f_{1t} + N \cdot z_{13t} - (N - 1) - N \cdot y_{1t} \leq f_{3t} \Rightarrow f_{1t} - 2N + 1 \leq f_{3t} \Rightarrow f_{1t} + 1 \leq f_{3t} + 2N \quad [2]$$

Para $i=2$ e $j=1$:

$$f_{2t} + N \cdot z_{21t} - (N - 1) - N \cdot y_{2t} \leq f_{1t} \Rightarrow f_{2t} - N + 1 \leq f_{1t} \Rightarrow f_{2t} + 1 \leq f_{1t} + N \quad [3]$$

Para $i=2$ e $j=3$:

$$f_{2t} + N \cdot z_{23t} - (N - 1) - N \cdot y_{2t} \leq f_{3t} \Rightarrow f_{2t} + 1 \leq f_{3t} \quad [4]$$

Parai=3 e j=1:

$$f_{3t} + N \cdot z_{31t} - (N-1) - N \cdot y_{3t} \leq f_{1t} \Rightarrow f_{3t} + 1 \leq f_{1t} \quad [5]$$

Parai=3 e j=2:

$$f_{3t} + N \cdot z_{32t} - (N-1) - N \cdot y_{3t} \leq f_{2t} \Rightarrow f_{3t} - N + 1 \leq f_{2t} \Rightarrow f_{3t} + 1 \leq f_{2t} + N \quad [6]$$

Das equações [4] e [5] temos que $f_{2t} + 1 \leq f_{3t}$ e $f_{3t} + 1 \leq f_{1t}$, ou seja:

$$f_{2t} + 1 \leq f_{3t} + 1 \leq f_{1t} \Rightarrow f_{2t} \leq f_{3t} \leq f_{1t} - 1 \quad [7]$$

Logo, a partir da equação [7] podem ser definidos valores para f_{2t}, f_{3t} e f_{1t} , sendo $f_{2t} = 0$, $f_{3t} = 1$ e $f_{1t} = 2$. Observe que estes valores das variáveis f_{it} satisfazem o conjunto de desigualdades [1] - [6], portanto, esta possível solução é permitida pelas restrições de eliminação de ciclos desconexos.

Sequência B

Parai=1 e j=2:

$$f_{1t} + N \cdot z_{12t} - (N-1) - N \cdot y_{1t} \leq f_{2t} \Rightarrow f_{1t} - N + 1 \leq f_{2t} \Rightarrow f_{1t} + 1 \leq f_{2t} + N \quad [8]$$

Parai=1 e j=3:

$$f_{1t} + N \cdot z_{13t} - (N-1) - N \cdot y_{1t} \leq f_{3t} \Rightarrow f_{1t} - 2N + 1 \leq f_{3t} \Rightarrow f_{1t} + 1 \leq f_{3t} + 2N \quad [9]$$

Parai=2 e j=1:

$$f_{2t} + N \cdot z_{21t} - (N-1) - N \cdot y_{2t} \leq f_{1t} \Rightarrow f_{2t} - N + 1 \leq f_{1t} \Rightarrow f_{2t} + 1 \leq f_{1t} + N \quad [10]$$

Parai=2 e j=3:

$$f_{2t} + N \cdot z_{23t} - (N-1) - N \cdot y_{2t} \leq f_{3t} \Rightarrow f_{2t} + 1 \leq f_{3t} \quad [11]$$

Parai=3 e j=1:

$$f_{3t} + N \cdot z_{31t} - (N-1) - N \cdot y_{3t} \leq f_{1t} \Rightarrow f_{3t} + 1 \leq f_{1t} + N \Rightarrow f_{3t} + 1 \leq f_{1t} + N \quad [12]$$

Parai=3 e j=2:

$$f_{3t} + N \cdot z_{32t} - (N-1) - N \cdot y_{3t} \leq f_{2t} \Rightarrow f_{3t} + 1 \leq f_{2t} \quad [13]$$

Observe que as desigualdades finais nas expressões [8] - [11] são iguais às obtidas nas expressões [1] - [5] da Sequência A. Das equações [11] e [13] temos que $f_{2t} + 1 \leq f_{3t}$ e $f_{3t} + 1 \leq f_{2t}$, ou seja:

$$f_{2t} + 1 \leq f_{3t} + 1 \leq f_{2t} \Rightarrow f_{2t} \leq f_{3t} \leq f_{2t} - 1 \quad [14]$$

Logo, a expressão [14] é contraditória, pois se $f_{2t} \leq f_{3t}$, a expressão $f_{3t} \leq f_{2t} - 1$ não é válida, e vice-versa. Portanto, soluções como a representada na Sequência B não são permitidas pelas restrições de eliminação de ciclos desconexos estudadas.

▪ **Restrição para eliminação de ciclos desconexos – CLSP (3.20)**

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \notin S} z_{ijt} + \sum_{i \in S} y_{i(t+1)} \geq \sum_{j=1}^N z_{jkt} \quad \forall 1 \leq t \leq T, k \in S, S \subseteq [N]$$

Sequência A

Sendo $S = \{1, 2, 3\}$, temos que:

Para $k=1$:

$$0 + (y_{1(t+1)} + y_{2(t+1)} + y_{3(t+1)}) \geq (z_{11t} + z_{21t} + z_{31t}) \quad [15]$$

Como $y_{1(t+1)} = 1$ e $z_{31t} = 1$, logo a desigualdade [15] é satisfeita ($1 \geq 1$).

Para $k=2$:

$$0 + (y_{1(t+1)} + y_{2(t+1)} + y_{3(t+1)}) \geq (z_{12t} + z_{22t} + z_{32t}) \quad [16]$$

Como $y_{1(t+1)} = 1$ e $z_{12t} = 1$, logo a desigualdade [16] é satisfeita ($1 \geq 1$).

Para $k=3$:

$$0 + (y_{1(t+1)} + y_{2(t+1)} + y_{3(t+1)}) \geq (z_{13t} + z_{23t} + z_{33t}) \quad [17]$$

Como $y_{1(t+1)} = 1$ e $z_{23t} = 1$, logo a desigualdade [17] é satisfeita ($1 \geq 1$).

Logo a solução representada pela Sequência A, é permitida pela restrição de eliminação de ciclos desconexos estudada.

Sequência B

Sendo $S = \{1, 2, 3\}$, temos que:

Para $k=1$:

$$0 + (y_{1(t+1)} + y_{2(t+1)} + y_{3(t+1)}) \geq (z_{11t} + z_{21t} + z_{31t}) \quad [18]$$

Como $y_{1(t+1)} = 1$ e o lado direito da desigualdade é igual zero, logo [18] é satisfeita ($1 \geq 0$).

Para $k=2$:

$$0 + (y_{1(t+1)} + y_{2(t+1)} + y_{3(t+1)}) \geq (z_{12t} + z_{22t} + z_{32t}) \quad [19]$$

Como $y_{1(t+1)} = 1$, $z_{12t} = 1$ e $z_{32t} = 1$ logo a desigualdade [19] não é satisfeita, pois $1 \geq 2$ é um absurdo.

Para $k=3$:

$$0 + (y_{1(t+1)} + y_{2(t+1)} + y_{3(t+1)}) \geq (z_{13t} + z_{23t} + z_{33t}) \quad [20]$$

Como $y_{1(t+1)} = 1$ e $z_{23t} = 1$, logo a desigualdade [20] é satisfeita ($1 \geq 1$).

Logo, a partir do anteriormente mostrado e considerando o caso quando $k=2$ notamos que, a solução representada pela Sequência B não é permitida pela restrição de eliminação de ciclos desconexos estudada.

B- Comparações entre os planos de produção resultante das abordagens propostas e o plano de produção da fábrica

Tabela B.1 - Volume produzido, unidades em estoque e atrasos no plano de produção da fábrica

Itens	<u>Semana 1</u>			<u>Semana 2</u>			<u>Semana 3</u>			<u>Semana 4</u>		
	Unidades produzidas	Estoque final	Demanda atendida sem atrasos	Unidades produzidas	Estoque final	Demanda atendida sem atrasos (%)	Unidades produzidas	Estoque final	Demanda atendida sem atrasos (%)	Unidades produzidas	Estoque final	Demanda atendida sem atrasos (%)
1	984.816	946.765	100%	902.700	899.465	100 %	1.476.888	1.526.465	100 %	615.370	1.301.865	100 %
2	421.968	330.053	100%	316.476	-95.767	87,09 %	632.952	-245.447	68,64%	-	-245.447	-
3	-	-153.900	47,90%	843.936	193.700	100 %	843.936	849.700	100%	210.984	1.060.700	-
4	-	339.794	-	-	339.794	-	-	339.794	-	-	-20.206	94,39 %
5	1.262.988	435.025	100%	1.142.856	627.725	100 %	1.283.498	931.225	100%	1.476.888	1.016.225	100 %
6	421.968	453.243	-	-	-74.757	92,13%	-	-246.757	0 %	421.968	175.243	-
7	632.952	237.495	100%	123.074	-308.205	53,91%	-	-889.405	0%	843.936	-545.405	0 %
8	-	177.850	-	-	177.850	-	-	177.850	-	-	177.850	-
9	-	10.173	-	-	10.173	-	-	10.173	-	-	10.173	-
10	125.990	-72.895	68,30%	228.540	81.755	100 %	105.480	187.355	-	-	187.355	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	-	179.125	-	-	47.625	100 %	-	47.625	-	-	47.625	-
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	492.072	483.531	100 %	345.622	603.231	100 %	-	603.231	-	-	603.231	-
Total	4.342.754	3.592.818 (-226.795)		3.903.204	2.980.838 (-478.729)		4.342.754	4.672.640 (-1.381.609)		3.569.146	4.579.267 (-811.058)	

Tabela B.2 - Volume produzido, unidades em estoque e atrasos no programa de produção do CLSP-1

Itens	<u>Semana 1</u>			<u>Semana 2</u>			<u>Semana 3</u>			<u>Semana 4</u>		
	Unidades produzidas	Estoque final	Demanda atendida sem atrasos	Unidades produzidas	Estoque final	Demanda atendida sem atrasos (%)	Unidades produzidas	Estoque final	Demanda atendida sem atrasos (%)	Unidades produzidas	Estoque final	Demanda atendida sem atrasos (%)
1	604.724,1	566.589,1	100%	703.403,1	319.992,2	100%	850.001,8	319.993,9	100%	839.997,6	319.991,6	100%
2	251.950,1	160.003,1	100%	742.320,8	160.003,9	100%	782.680,3	160.004,2	100%	-	160.004,2	-
3	293.900,7	140.000,7	100%	496.401,4	140.002,1	100%	188.004,3	140.006,4	100%	-	140.006,4	-
4	-	339.794	-	-	339.794	-	-	339.794	-	60.209,5	40.003,6	100%
5	1.253.368	425.393	100%	924.602,2	399.995,5	100%	980.003,1	399.998,4	100%	1.392.002,1	400.000,5	100%
6	118.757,6	150.000,6	-	438.002,8	60.003,4	100%	171.995,9	59.999,3	100%	-	59.999,3	-
7	615.501,9	219.996,9	100%	668.801,7	219.998,6	100%	581.199,4	219.997,9	100%	499.996,9	219.994,9	100%
8	-	177.850	-	-	177.850	-	-	177.850	-	-	177.850	-
9	-	10.173	-	-	10.173	-	-	10.173	-	-	10.173	-
10	-	-198.995	13,48%	-	-273.145	0%	-	-273.145	-	-	-273.145	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	-	179.125	-	-	47.625	100%	-	47.625	-	-	47.625	-
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	-	-8.569	98,28%	-	-234.569	0%	-	-234.569	-	-	-234.569	-
Total	3.138.202,4	2.368.925,4 (-207.564)		3.973.532	1.875.437,4 (-507.714)		3.553.884,8	1.875.442,2 (-507.714)		2.792.206,2	1.575.648,4 (-507.714)	

Tabela B.3 - Volume produzido, unidades em estoque e atrasos no plano de produção do GLSP-1

Itens	<u>Semana 1</u>			<u>Semana 2</u>			<u>Semana 3</u>			<u>Semana 4</u>		
	Unidades produzidas	Estoque final	Demanda atendida sem atrasos	Unidades produzidas	Estoque final	Demanda atendida sem atrasos (%)	Unidades produzidas	Estoque final	Demanda atendida sem atrasos (%)	Unidades produzidas	Estoque final	Demanda atendida sem atrasos (%)
1	680.142,1	642.007,1	100%	627.993,9	320.001	100%	850.001,8	320.002,8	100%	839.997,6	320.000,4	100%
2	251.950,1	160.003,1	100%	915.696,9	333.380	100%	609.304,2	160.004,2	100%	-	160.004,2	-
3	408.465	254.565	100%	381.837,1	140.002	100%	188.004,4	140.006,4	100%	-	140.006,4	-
4	-	339.794	-	-	339.794	-	-	339.794	-	-	- 20.206	94,39%
5	1.227.970,8	399.995,8	100%	949.999,4	399.995,2	100%	980.003,1	399.998,4	100%	1.392.002,1	400.000,5	100%
6	118.757,6	150.000,6	-	438.002,8	60.003,4	100%	171.995,9	59.999,3	100%	-	59.999,3	-
7	615.501,9	219.996,9	100%	668.792,9	219.989,8	100%	581.199,4	219.989,1	100%	499.996,9	219.986,1	100%
8	-	177.850	-	-	177.850	-	-	177.850	-	-	177.850	-
9	-	10.173	-	-	10.173	-	-	10.173	-	-	10.173	-
10	-	-198.995	13,48%	-	- 273.145	0%	-	-273.145	-	-	- 273.145	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	-	179.125	-	-	47.625	100%	-	47.625	-	-	47.625	-
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	-	-8.569	98,28%	-	- 234.569	0%	-	- 234.569	-	-	- 234.569	-
Total	3.302.787,4	2.533.510,5 (-207.564)		3.982.323	2.048.813,5 (-507.714)		3.380.508,7	1.875.442,2 (-507.714)		2.731.996,7	1.535.645 (-527.920)	

Tabela B.4 - Unidades em estoque e desvio (em unidades) em relação aos níveis estabelecidos, resultantes do plano de produção da fábrica

Itens	<u>Semana 1</u>			<u>Semana 2</u>			<u>Semana 3</u>			<u>Semana 4</u>		
	I_{k1}	E_{k1}^+	E_{k1}^-	I_{k2}	E_{k2}^+	E_{k2}^-	I_{k3}	E_{k3}^+	E_{k3}^-	I_{k4}	E_{k4}^+	E_{k4}^-
1	946.681	146.681	-	899.381	99.381	-	1.526.269	726.269	-	1.301.639	501.639	-
2	330.021	-	-	-95.823	-	160.000	-245.551	-	160.000	-245.551	-	160.000
3	-153.900	-	140.000	193.636	-	-	849.572	499.572	-	1.060.556	710.556	-
4	339.794	239.794	-	339.794	239.794	-	339.794	239.794	-	-20.206	-	40.000
5	435.013	-	-	627.869	-	-	931.367	-	-	1.016.255	16.255	-
6	453.211	303.211	-	-74.789	-	60.000	-246.789	-	60.000	175.179	25.179	-
7	237.447	-	-	-308.279	-	220.000	-889.479	-	220.000	-545.543	-	220.000
8	177.850	77.850	-	177.850	77.850	-	177.850	77.850	-	177.850	77.850	-
9	10.173	-	-	10.173	-	-	10173	-	-	10.173	-	-
10	-73.005	-	50.000	81.385	-	-	186.865	86.865	-	186.865	86.865	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	179.125	-	-	47.625	-	52.375	47.625	-	52.375	47.625	-	52.375
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	483.503	-	-	603.125	103.125	-	603.125	103.125	-	603.125	103.125	-
Total		2.867.536	190.000		520.150	492.375		1.733.475	492.375		1.521.469	472.375

Tabela B.5 - Unidades em estoque e desvio (em unidades) em relação aos níveis estabelecidos, resultantes no plano de produção do modelo CLSP-1

Itens	<u>Semana 1</u>			<u>Semana 2</u>			<u>Semana 3</u>			<u>Semana 4</u>		
	I_{k1}	E_{k1}^+	E_{k1}^-	I_{k2}	E_{k2}^+	E_{k2}^-	I_{k3}	E_{k3}^+	E_{k3}^-	I_{k4}	E_{k4}^+	E_{k4}^-
1	566.589,1	-	-	319.992,2	-	7,8	319.994	-	6	319.991,6	-	8,4
2	160.003,1	-	-	160.003,9	-	-	160.004,2	-	-	160.004,2	-	-
3	140.000,7	-	-	140.002,1	-	-	140.006,4	-	-	140.006,4	-	-
4	339.794	239.794	-	339.794	239.794	-	339.794	239.794	-	40.003,6	-	-
5	425.393	-	-	399.995,3	-	4,7	399.998,4	-	1,6	400.000,5	-	-
6	150.000,6	-	-	60.003,4	-	-	59.999	-	1	59.999,3	-	0,6
7	219.996,9	-	3,1	219.998,6	-	1,4	219.998	-	2	219.994,9	-	5,1
8	177.850	77.850	-	177.850	77.850	-	177.850	77.850	-	177.850	77.850	-
9	10.173	-	-	10.173	-	-	10.173	-	-	10.173	-	-
10	-198.995	-	50.000	-273.145	-	50.000	-273.145	50.000	-	-273.145	-	50.000
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	179.125	-	-	47.625	-	52.375	47.625	-	52.375	47.625	-	52.375
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	-8.569	-	200.000	-234.569	-	200.000	-234.569	-	200.000	-234.569	-	200.000
Total		317.644	250.003,1		317.644	302.388,		317.644	302.385,6		77.850	302.389,1

Tabela B.6 - Unidades em estoque e desvio (em unidades) em relação aos níveis estabelecidos, resultantes do plano de produção do GLSP-1

Itens	<u>Semana 1</u>			<u>Semana 2</u>			<u>Semana 3</u>			<u>Semana 4</u>		
	I_{k1}	E_{k1}^+	E_{k1}^-	I_{k2}	E_{k2}^+	E_{k2}^-	I_{k3}	E_{k3}^+	E_{k3}^-	I_{k4}	E_{k4}^+	E_{k4}^-
1	642.007,1	-	-	320.001	-	-	320.002,8	-	-	320.000,4	-	-
2	160.003,1	-	-	333.380	-	-	160.004,2	-	-	160.004,2	-	-
3	254.565	-	-	140.002,1	-	-	140.006,4	-	-	140.006,4	-	-
4	339.794	239.794	-	339.794	239.794	-	339.794	239.794	-	-20.206	-	40.000
5	399.995,8	-	-	399.995,3	-	4,7	399.998,4	-	1,6	400.000,5	-	-
6	150.000,6	-	-	60.003,4	-	-	59.999,3	-	0,7	59.999,3	-	0,7
7	219.996,9	-	3,1	219.989,8	-	10,2	219.989,2	-	0,8	219.986,1	-	13,9
8	177.850	77.850	-	177.850	77.850	-	177.850	77.850	-	177.850	77.850	-
9	10.173	-	-	10.173	-	-	10.173	-	-	10.173	-	-
10	- 198.995	-	50.000	-273.145	-	50.000	- 273.145	-	50.000	- 273.145	-	50.000
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	179.125	-	-	47.625	-	52.375	47.625	-	52.375	47.625	-	52.375
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	-8.569	-	200.000	- 234.569	-	200.000	-234.569	-	200.000	- 234.569	-	200.000
Total		317.644	250.003,1		317.644	302.390		317.644	302.378,1		77.850	342.389,6

C- Resultados dos experimentos computacionais para instâncias aleatórias

As instâncias geradas aleatoriamente para a avaliação complementar dos modelos propostos neste trabalho foram criadas com base nas indicações propostas em Haase (1996) e Fleischman e Meyr (1997). Para este estudo computacional foram geradas quatro grupos de exemplares, com as características indicadas na Tabela C.7.

Tabela C.7- Características das instâncias geradas 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%

Os parâmetros que conformam cada uma das instâncias foram estimados como segue:

- **Capacidade (Q_t):** considerou-se constante para cada linha de produção (l) em cada período de tempo (t), de modo que $Q_t = 5N$.
- **Custos de estocagem (h_k):** considerou-se igual para cada tipo de produto, sendo $h_k = 1 \quad \forall k = 1, \dots, K$
- **Custos de preparação dependentes da sequência (c_{ij}):** aleatório entre 100-200 e que obedecem à desigualdade triangular.
- **Tempos de preparação dependentes da sequência (st_{ij}):** calculado como $st_{ij} = \frac{c_{ij}}{100}$.
- **Previsões de demanda (d_{kt}):** aleatório entre 200-500
- **Taxa de produção dos padrões de moldagem (p_{ki}):** calculou-se como
$$p_{ki} = \frac{\text{aleatório entre 200-500}}{U \cdot Q_t}$$
- **Número de micro-períodos para a abordagem GLSP (S):** a fim de realizar comparações mais justas, e de acordo a Fleischman e Meyr (1997), o número de micro-períodos em cada macro-período de tempo é considerado igual ao número de padrões de moldagem disponíveis. Logo, o número total de micro-períodos $S = N \cdot T$.

Tabela C.8 - Resultados do Grupo 1 de instâncias aleatórias

Instância	CLSP				GLSP			
	Solução	Melhor limitante	Gap	Tempo Computacional	Solução	Melhor limitante	Gap	Tempo Computacional
1	700,45	700,45	-	6,9s	700,45	571,45	18%	3h
2	1.098,81	1.098,81	-	0,7s	1.098,81	1.098,81	-	26min. 28,6s
3	740,15	740,15	-	23,9s	740,15	464,98	37,17%	3h
4	648,11	648,11	-	2,7s	648,11	648,11	-	2h 17min. 46,8s
5	742,64	742,64	-	4,6s	742,64	742,64	-	42min. 48,4 s
6	731,22	731,22	-	8,5s	731,22	600,42	17,88%	3h
7	711,24	711,24	-	2,1s	711,24	711,24	-	7min. 35,687s
8	799,22	799,22	-	7,3s	799,22	799,22	-	3h
9	1.184,36	1.184,36	-	2,1s	1.184,36	1.184,36	-	8min. 52,9s
10	749,89	749,89	-	2,3s	749,89	749,89	-	13min. 14,7s

Tabela C.9 - Resultados do Grupo 2 de instâncias aleatórias

Instância	CLSP				GLSP			
	Solução	Melhor limitante	Gap	Tempo Computacional	Solução	Melhor limitante	Gap	Tempo Computacional
1	2.104,85	2.104,85	-	1,6s	2.104,85	2.104,85	-	2min. 6,2s
2	911,15	911,15	-	7,0s	911,15	740,45	18,73%	3h
3	747,72	747,72	-	5,3s	747,71	747,71	-	2h 46min. 50,7s
4	866,91	866,91	-	1,9s	866,91	866,91	-	1min. 3,6s
5	547,43	547,43	-	3,5s	547,43	547,43	-	11min. 47,3s
6	814,62	814,62	-	1,4s	814,62	814,62	-	2min. 27,8s
7	532,90	532,90	-	2,6s	532,90	532,90	-	36min. 59,3s
8	759,16	759,16	-	7,4s	759,16	667,19	12,11%	3h
9	877,97	877,97	-	3,3s	877,97	877,97	-	1h 10min. 6,9s
10	899,28	899,28	-	2,8s	899,28	899,28	-	1h 55min. 43,5s

Tabela C.10 - Resultados do Grupo 3 de instâncias aleatórias

Instância	CLSP				GLSP			
	Solução	Melhor limitante	Gap	Tempo Computacional	Solução	Melhor limitante	Gap	Tempo Computacional
1	1.978,51	1.978,51	-	2min 8,3s	2.041,95	1.239,27	39,30%	3 h
2	1401,08	1401,08	-	47,1s.	1.401,08	879,34	37,23%	3 h
3	1.701,28	1.701,28	-	2h 2min. 9,5s	1.738,88	768,58	55,80%	3 h
4	1.442,77	1.442,77	-	8min. 19,2s	1.442,77	692,51	52,00%	3 h
5	1.431,43	1.431,43	-	38min. 20,01s	1.52,04	645,56	57,58%	3h
6	1859,39	1859,39	-	15,7s	1.859,39	1.371,54	26,24%	3 h
7	1.530,67	1.530,67	-	38,5s	1.530,67	1.115,93	27,09%	3h
8	1.692,59	1.692,59	-	3min. 8,8s	1.817,05	1.297,38	28,59%	3 h
9	1.398,65	1.398,65	-	3min. 8,5s	1.433,98	699,66	51,20%	3 h
10	1.402,48	1.402,48	-	2min. 8,7s	1.402,48	979,51	30,15%	3 h

Tabela C.11 - Resultados do Grupo 4 de instâncias aleatórias

Instância	<u>CLSP</u>				<u>GLSP</u>			
	Solução	Melhor limitante	Gap	Tempo Computacional	Solução	Melhor limitante	Gap	Tempo Computacional
1	2.515,33	2.515,33	-	3,4s	2.515,33	2.515,33	-	2h 47min. 52,04s
2	1.334,64	1.334,64	-	1min. 27,5s	1.334,64	1.334,64	-	3 h
3	1.317,4	1.317,4	-	2min. 52,7s	1.317,4	683,30	48,13%	3 h
4	3.175,61	3.175,61	-	11,7s	3.175,61	2.909,12	8,39%	3 h
5	3.735,91	3.735,91	-	9,9s	3.735,91	3.444,51	7,79%	3 h
6	1.881,17	1.881,17	-	1min. 10,8s	1.881,17	1.234,70	34,36%	3 h
7	1.425,6	1.425,6	-	2min. 10,05s	1.425,6	723,97	49,22%	3h
8	1.456,23	1.456,23	-	6min. 15,3s	1.456,23	747,15	48,69%	3 h
9	1.465,82	1.465,82	-	26,2s	1.465,82	1.041,10	28,97%	3 h
10	1.878,77	1.878,77	-	42,6s	1.878,77	1.330,08	29,20%	3 h

ANEXOS

A- Informações do sistema de produção real utilizadas nos estudos computacionais.

Este anexo apresenta as informações da fábrica em estudo utilizadas nos estudos computacionais, assim como os dados relacionados com o exemplar em particular para as comparações entre os diferentes programas de produção.

- *Número total de produtos (K):* 14
- *Número total de padrões de moldagem disponíveis (N):* 19
- *Número de linhas de produção disponíveis (M):* 3
- *Número de períodos de tempo no horizonte de planejamento (T):* 4
- *Custo de estocagem (h_k):* 0,0010138 u.m. $\forall 1 \leq k \leq K$.
- *Custo de atraso (g_k):* 0,0088 u.m. $\forall 1 \leq k \leq K$.

Tabela A.1 - Níveis de estoque para cada produto

Produtos	Estoque mínimo (unidades)	Estoque máximo (unidades)
1	320.000	800.000
2	160.000	390.000
3	140.000	350.000
4	40.000	100.000
5	400.000	1.000.000
6	60.000	150.000
7	220.000	550.000
8	40.000	40.000
9	-	-
10	50.000	100.000
11	-	-
12	100.000	300.000
13	-	-
14	200.000	500.000

Tabela A.2. Taxas de produção dos padrões de moldagem em relação a cada produto (unidades /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	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.326	5.862	-	-	7.326	5.862	-	-	4.395
2	-	8.791	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	8.791	-	-	-	-	-	4.395	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	8.791	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	8.791	-	-	-	-	7.326	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	8.791	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	8.791	4.395	-	-	-	-	7.326	5.862	-	-	7.326	5.862	-
8	-	-	-	-	-	-	-	3.295	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	3.295	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.465	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.465	2.929	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.465	2.929	-	-	-	-	-	-	1.465
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.465	2.929	-
14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.465	2.929	-	-	2929

Tabela A.3. Tempos de preparação entre os diferentes padrões de moldagem (horas)

Padrões	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	0	0,5	0,5	2	0,5	0,5	0,5	48	48	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
2	2	0	2	2	2	2	2	48	48	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
3	0,5	0,5	0	2	0,5	0,5	0,5	48	48	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
4	2	2	2	0	2	2	2	48	48	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
5	1	1	1	2	0	1	1	48	48	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
6	0,5	0,5	0,5	2	0,5	0	0,5	48	48	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
7	0,5	0	0	0,5	0	0	0	48	48	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
8	48	48	48	48	48	48	48	0	0	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48
9	48	48	48	48	48	48	48	0,5	0	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48
10	10	10	10	10	10	10	10	48	48	0	10	10	10	10	10	10	10	10	10
11	10	10	10	10	10	10	10	48	48	10	0	10	0,5	10	10	10	10	10	10
12	10	10	10	10	10	10	10	48	48	10	10	0	10	0,5	10	10	10	10	10
13	10	10	10	10	10	10	10	48	48	10	0,5	10	0	10	10	10	10	10	10
14	10	10	10	10	10	10	10	48	48	10	10	0,5	10	0	10	10	10	10	10
15	10	10	10	10	10	10	10	48	48	10	10	10	10	10	0	10	0,5	10	10
16	10	10	10	10	10	10	10	48	48	10	10	10	10	10	10	0	10	0,5	10
17	10	10	10	10	10	10	10	48	48	10	10	10	10	10	0,5	10	0	10	10
18	10	10	10	10	10	10	10	48	48	10	10	10	10	10	10	0,5	10	0	10
19	10	10	10	10	10	10	10	48	48	10	10	10	10	10	10	10	10	10	0

Tabela A.4. Custos de preparação entre os diferentes padrões de moldagem (unidades monetárias)

Padrões	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	0	253,4	253,4	1.013,6	253,4	253,4	253,4	40.794,68	40.794,68	8.699,5	8.446,1	8.446,1	8.699,5	8.699,5	8.446,1	8.446,1	8.699,5	8.699,5	8.446,1
2	1.013,6	0	1.013,6	1.013,6	1.013,6	1.013,6	1.013,6	41.554,88	41.554,88	9.459,7	9.459,7	9.459,7	9.459,7	9.459,7	9.459,7	9.459,7	9.459,7	9.459,7	9.459,7
3	253,4	253,4	0	1.013,6	253,4	253,4	253,4	40.794,68	40.541,28	8.699,5	8.699,5	8.699,5	8.699,5	8.699,5	8.699,5	8.699,5	8.699,5	8.699,5	8.699,5
4	1.013,6	1.013,6	1.013,6	0	1.013,6	1.013,6	1.013,6	41.554,88	41.554,88	9.459,7	9.459,7	9.459,7	9.459,7	9.459,7	9.459,7	9.459,7	9.459,7	9.459,7	9.459,7
5	506,8	506,8	506,8	1.013,6	0	506,8	506,8	41.048,08	41.048,08	8.446,1	8.952,9	8.952,9	8.952,9	8.952,9	8.952,9	8.952,9	8.952,9	8.952,9	8.952,9
6	253,4	253,4	253,4	1.013,6	253,4	0	253,4	40.794,68	40.794,68	8.699,5	8.699,5	8.699,5	8.699,5	8.699,5	8.699,5	8.699,5	8.699,5	8.699,5	8.699,5
7	253,4	0	0	253,4	0	0	0	40.541,28	40.541,28	8.446,1	8.699,5	8.699,5	8.446,1	8.446,1	8.699,5	8.699,5	8.446,1	8.446,1	8.699,5
8	40.794,68	40.541,28	40.541,28	40.794,68	40.541,28	40.541,28	40.541,28	0	0	40.541,3	40.794,7	40.794,7	40.541,3	40.541,3	40.794,7	40.794,7	40.541,3	40.541,3	40.794,7
9	40.794,68	40.794,68	40.541,28	41.554,88	40.794,68	40.794,68	40.794,68	253,4	0	40.794,7	40.794,7	40.794,7	40.794,7	40.794,7	40.794,7	40.794,7	40.794,7	40.794,7	40.794,7
10	8.952,9	8.952,9	8.952,9	9.459,7	8.446,1	8.952,9	8.952,9	41.048,08	41.048,08	0	8.952,9	8.952,9	8.952,9	8.952,9	8.952,9	8.952,9	8.952,9	8.952,9	8.952,9
11	8.446,1	8.699,5	8.699,5	9.459,7	8.699,5	8.699,5	8.699,5	40.794,68	40.794,68	8.699,5	0	8.446,1	253,4	8.699,5	8.446,1	8.446,1	8.699,5	8.699,5	8.446,1
12	8.446,1	8.699,5	8.699,5	9.459,7	8.699,5	8.699,5	8.699,5	40.794,68	40.794,68	8.699,5	8.446,1	0	8.699,5	253,4	8.446,1	8.446,1	8.699,5	8.699,5	8.446,1
13	8.699,5	8.446,1	8.446,1	8.699,5	8.446,1	8.446,1	8.446,1	40.541,28	40.541,28	8.446,1	253,4	8.699,5	0	8.446,1	8.699,5	8.699,5	8.446,1	8.446,1	8.699,5
14	8.699,5	8.446,1	8.446,1	8.699,5	8.446,1	8.446,1	8.446,1	40.541,28	40.541,28	8.446,1	8.699,5	253,4	8.446,1	0	8.699,5	8.699,5	8.446,1	8.446,1	8.699,5
15	8.446,1	8.699,5	8.699,5	9.459,7	8.699,5	8.699,5	8.699,5	40.794,68	40.794,68	8.699,5	8.446,1	8.446,1	8.699,5	8.699,5	0	8.446,1	253,4	8.699,5	8.446,1
16	8.446,1	8.699,5	8.699,5	9.459,7	8.699,5	8.699,5	8.699,5	40.794,68	40.794,68	8.699,5	8.446,1	8.446,1	8.699,5	8.699,5	8.446,1	0	8.699,5	253,4	8.446,1
17	8.699,5	8.446,1	8.446,1	8.699,5	8.446,1	8.446,1	8.446,1	40.541,28	40.541,28	8.446,1	8.699,5	8.699,5	8.446,1	8.446,1	253,4	8.699,5	0	8.446,1	8.699,5
18	8.699,5	8.446,1	8.446,1	8.699,5	8.446,1	8.446,1	8.446,1	40.541,28	40.541,28	8.446,1	8.699,5	8.699,5	8.446,1	8.446,1	8.699,5	253,4	8.446,1	0	8.699,5
19	8.446,1	8.699,5	8.699,5	9.459,7	8.699,5	8.699,5	8.699,5	40.794,68	40.794,68	8.699,5	8.446,1	8.446,1	8.699,5	8.699,5	8.446,1	8.446,1	8.699,5	8.699,5	0

Tabela A.5. Capacidade disponível para o exemplar de comparação entre os planos de produção (horas)

Linhas	Períodos de tempo			
	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
Linha 1	168	146	168	72
Linha 2	168	156	168	168
Linha 3	168	152	168	166

Tabela A.6. Previsão de demanda para o exemplar de comparações entre os planos de produção (unidades)

Itens	Períodos de tempo				
	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Total
1	960.000	950.000	850.000	840.000	3.600.000
2	275.000	742.320	782.680	-	1.800.000
3	365.600	496.400	188.000	-	1.050.000
4	-	-	-	360.000	360.000
5	1.178.000	950.000	980.000	1.392.000	4.500.000
6	-	528.000	172.000	-	700.000
7	450.000	668.800	581.200	500.000	2.200.000
8	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-
10	230.000	74.150	-	-	304.150
11	-	-	-	-	-
12	-	131.500	-	-	131.500
13	-	-	-	-	-
14	500.000	226.000	-	-	726.000

Tabela A.7. Níveis de estoques iniciais para o exemplar de comparação entre os planos de produção

Produtos	Unidades
1	921.865
2	183.053
3	211.700
4	339.794
5	350.025
6	31.243
7	54.495
8	177.850
9	10.173
10	31.005
11	0
12	179.125
13	0
14	491.431

B- Informações relacionadas com os exemplares testados, para comparações entre as abordagens CLSP e GLSP.

Tabela B.1 - Estoques iniciais para os exemplares estudados

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	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
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	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
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 B.2 - Previsões de demanda para a Semana 1

Produtos	Ex. 1	Exe. 2	Ex. 3	Ex. 4	Ex. 5	Ex. 6	Ex. 7	Ex. 8	Ex.9	Ex.10	Ex. 11	Ex. 12
1	960.000	960.000	760.000	860.000	960.000	960.000	876.600	825.000	960.000	850.000	960.000	760.000
2	-	275.000	275.000	750.000	215.000	215.000	525.000	525.000	-	350.000	275.000	275.000
3	-	365.600	365.600	365.600	-	-	-	-	350.000	420.000	365.600	265.600
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	1.018.400	1.178.000	1.178.000	1.178.000	1.018.400	1.018.400	1.054.280	1.062.000	1.220.000	800.000	1.178.000	1.178.000
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	660.000	450.000	450.000	450.000	700.000	700.000	752.000	752.000	700.000	600.000	450.000	450.000
8	-	-	-	-	-	100.000	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	48.000	-	-	-	-	-	-
10	-	230.000	-	304.500	-	-	-	-	150.000	-	230.000	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	150.000	-	-	-	210.000	-	-	-	-	112.000	-	-
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	463.000	500.000	500.000	500.000	490.000	-	-	-	-	430.000	500.000	500.000

Tabela B.3 - Previsões de demanda para a Semana 2

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	1.050.000	950.000	950.000	950.000	1.050.000	1.050.000	904.320	825.000	850.000	800.000	950.000	950.000
2	601.720	742.320	742.320	450.000	802.320	802.320	525.000	525.000	780.000	350.000	742.320	742.320
3	666.400	496.400	526.400	526.400	666.400	666.400	477.000	477.000	548.000	510.000	496.400	526.400
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	1.050.000	950.000	950.000	950.000	1.210.000	1.050.000	818.436	1.062.000	1.200.000	800.000	950.000	950.000
6	573.200	528.000	528.000	528.000	500.000	500.000	-	-	-	-	528.000	528.000
7	690.200	668.800	668.800	668.800	734.800	734.800	748.000	748.000	700.000	600.000	668.800	668.800
8	-	-	-	-	-	-	66.000	60.000	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	24.000	12.000	-	-	-	-
10	150.000	74.150	-	-	-	-	197.250	197.250	176.000	-	74.150	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	137.675	131.000	105.000	105.000	70.000	145.000	-	-	-	141.500	131.500	105.000
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	421.425	226.000	321.000	460.000	323.000	473.500	-	-	-	386.000	226.000	321.000

Tabela B.4 - Previsões de demanda para a Semana 3

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	1.004.680	850.000	850.000	850.000	904.680	1.004.680	610.000	825.000	740.000	660.000	850.000	850.000
2	792.680	782.680	732.680	-	782.680	832.680	750.000	750.000	744.000	400.000	782.680	732.680
3	431.600	188.000	188.000	188.000	168.000	168.000	400.000	400.000	430.000	490.000	188.000	188.000
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	1.040.000	980.000	980.000	1.030.000	1.300.000	1.300.000	776.964	1.062.000	700.000	820.000	980.000	980.000
6	-	172.000	172.000	172.000	150.000	100.000	460.000	440.000	-	-	172.000	172.000
7	690.200	581.200	581.200	581.200	565.200	565.200	700.000	700.000	735.000	530.000	581.200	581.200
8	48.000	-	-	-	-	-	-	-	36.000	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	169.250	-	220.500	-	-	-	100.000	80.000	-	126.000	-	220.500
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-	245.000	205.000,00	184.000	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	400.000	410.000	470.000,00	430.000	-	-	-

Tabela B.5 - Previsões de demanda para a Semana 4

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	868.120	840.000	840.000	840.000	785.320	785.320	609.080	825.000	640.000	810.000	840.000	840.000
2	-	-	-	500.000	-	-	-	-	-	300.000	-	-
3	-	-	-	-	365.600	365.600	523.000	543.000	-	-	-	-
4	300.000	360.000	420.000	420.000	288.000	300.000	-	-	400.000	-	360.000	420.000
5	1.144.800	1.392.000	1.492.000	1.492.000	1.271.600	1.231.600	1.200.320	1.064.000	600.000	850.000	1.392.000	1.492.000
6	-	-	-	-	-	-	70.000	70.000	610.000	380.000	-	-
7	-	500.000	400.000	400.000	-	-	50.000	50.000	-	-	500.000	400.000
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	106.000	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	120.000	-	-
10	-	-	-	-	250.000	270.000	-	-	-	126.500	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-	41.000	25.500	128.000	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-	477.000	468.000	464.500	-	-	-