

João Flávio de Freitas Almeida

Planejamento da produção de impressoras por  
dimensionamento de lotes e sequenciamento: um  
estudo de caso

Dissertação apresentada à Escola de  
Engenharia da Universidade Federal de  
Minas Gerais para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Samuel Vieira Conceição

Belo Horizonte – MG

19 de Março de 2009

João Flávio de Freitas Almeida

Planejamento da produção de impressoras por  
dimensionamento de lotes e sequenciamento: um  
estudo de caso

Dissertação apresentada à Escola de  
Engenharia da Universidade Federal de  
Minas Gerais para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador:

Prof. Samuel Vieira Conceição

MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO  
LINHA DE PESQUISA: SISTEMAS DE PRODUÇÃO E LOGÍSTICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Belo Horizonte – MG

19 de Março de 2009

*Dedico este trabalho à minha família, minha namorada e meus amigos.*

## AGRADECIMENTOS

*Agradeço a Deus pela vida, à família pelo apoio incondicional, à minha namorada Lygia pelo companheirismo e paciência, aos amigos José Cecílio Moreira, Alan Viana, Ormeu Coelho, Thiago Augusto, Maxstaley Neves, Tairone, André Cruz, Marcus Vinícius e Breno pelos ensinamentos de vida.*

*Agradeço aos professores pela maestria e ao meu orientador, Samuel, pela sabedoria em seus conselhos.*

## RESUMO

Esta dissertação foi motivada por um problema real de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção de impressoras em uma empresa de destaque mundial de manufatura contratada de eletroeletrônicos. O ambiente produtivo é caracterizado pela produção de quatro tipos de impressoras em duas linhas não idênticas de manufatura. Os tempos de *changeover* são dependentes da linha de manufatura. A consideração dos tempos previstos para a manutenção reduz a capacidade total disponível para produção e a diferença de um período para o outro. Por restrições de contrato, a demanda deve ser atendida no prazo. Dessa forma não é permitido o *backlogging*.

O objetivo do planejamento da produção é determinar o tamanho ótimo dos lotes, assim como a sequência de produção destes nas linhas de manufatura de forma a minimizar os custos de *set-up* e estocagem ao longo do período de planejamento. Busca-se encontrar não só uma solução que atenda às necessidades pura e simplesmente de atendimento de demanda, mas encontrar um plano de produção com custo mínimo.

Como apresentado acima, este processo de manufatura pode ser modelado pelo problema de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção. Para isso, foi realizado um estudo de modelos clássicos e reformulados na literatura.

O problema capacitado de dimensionamento de lotes e sequenciamento simultâneos em máquinas paralelas não idênticas apresentado nessa dissertação é classificado como *large bucket*, multi-item, multi-máquinas, único nível, estático e determinístico. Os períodos são diferenciados em *macro* e *micro*. Períodos *Macro* são subdivididos em muitos *microperíodos*. Dessa forma, diversos tipos de impressoras podem ser produzidos em cada *macro período*. A decisão de sequenciar ocorre ao se determinar a melhor alocação dos lotes de produção em cada *micro período*.

O trabalho consiste no desenvolvimento e implementação de um modelo matemático de otimização para auxiliar o processo de tomada de decisão do gerente de planejamento. O modelo integra decisões táticas de dimensionamento de lotes e operacionais de sequenciamento da produção. Este abrange o horizonte de planejamento de 96 turnos em 2 meses e determina, além de quando e quanto produzir de cada lote, a melhor sequência e alocação destes lotes nas linhas de manufatura.

O modelo matemático clássico relativo ao problema é de difícil solução (ver Bitran & Yanasse [7]). Adota-se estrategicamente, então, adição de desigualdades válidas e restrições

reformuladas matematicamente. Isso permite que o mesmo possa ser efetivamente resolvido por meio de *softwares* comerciais de programação inteira mista tais como XPRESS e CPLEX.

Parâmetros de entrada do modelo como: demanda de curto prazo, produtividade de cada linha para cada tipo de impressora, tempo disponível por turno, duração de manutenção preventiva, custo de estoque e custos de *set-up* e *changeover* são determinísticos e foram coletados com engenheiros responsáveis pelo processo. Os dados foram analisados e tratados para posterior resolução com o otimizador baseado em programação matemática.

O plano resultante é comparado com a prática atual. Melhorias em produtividade e redução proporcional de custos são evidenciadas.

Recomenda-se, como evolução deste trabalho, o desenvolvimento de um aplicativo com interface gráfica para o usuário, o que é estratégico para a empresa, pois permite que gestores de planejamento, que possuem pouco conhecimento de otimização combinatória, possam utilizar a ferramenta de forma satisfatória (Fleischmann *et al.* [15]).

**Palavras-chave:** *Planejamento da produção, dimensionamento de lotes e sequenciamento.*

## ABSTRACT

*In this thesis we consider a real problem of lot-sizing and scheduling printers' production in a worldwide EMS (Electronic Manufacturing Service) company. The environment is characterized by the production of four different types of printers on two non identical manufacturing lines. Changeover times are manufacturing line dependent. Preventive maintenance times are considered which reduces the production available time and differentiate the available capacity from one period to another. Demand must be satisfied without backlogging.*

*The goal of production planning is to determine optimal lot sizes and the production sequence of these on different manufacturing lines minimizing set-up and inventory costs over a planning horizon. It's not about finding a solution that purely satisfies demand on time, but finding a production plan integrating lot-sizing and scheduling with minimal cost.*

*As shown above, this manufacturing process can be modeled by the lot-sizing and scheduling problem, so we studied classical and reformulated models of lot-sizing and scheduling models on literature.*

*The capacitated simultaneous lot-sizing and scheduling on parallel non identical machines problem presented in this thesis is classified as a large bucket, multi-item, multi-machines, single-level, static and deterministic. The periods are differentiated in macro and micro periods. Macro periods are subdivided into many micro periods. Here, various types of printers can be produced in each macro period. The sequence decision appears on determining the best allocation of production lots in each micro period.*

*The thesis consists on the development and implementation of a mathematical model of optimization to help on production planning managers' decision process. The model integrates tactical decisions of lot sizing and operational decisions of sequencing these lots. It covers a planning horizon of 96 micro periods in 2 months and determines not only the size and the moment to produce a lot, but also the best sequence and allocation of these lots on manufacturing lines.*

*These problems are considered NP-hard (see Bitran & Yanasse [7]), so we develop a strategy of addition of families of inequalities and some reformulated constraints to allow this practical lot-sizing and scheduling problem to be effectively solved via mixed-integer programming and general MIP software incorporating cutting planes such as XPRESS and CPLEX.*

*The model's parameters such as demand, productivity of each line for each printer, available time per shift, preventive maintenance data and duration, inventory and set-up costs are deterministic and were collected with the process coordinators engineers. These data were analyzed and treated to be solved with the MIP solver.*

*The proposed resulting plan is then compared with the current practice. Improvements on productivity and costs reduction are evidenced. The new plan also increases the quality of planning, reducing to zero the number of delays in delivery of products.*

*A recommended evolution is the development of software with user's graphical interface, which is strategic to the company because it allows a satisfactory use by production managers with little knowledge of optimization (Fleischmann et al. [15]).*

**Keywords:** *Production planning, Lot-sizing and scheduling.*

# SUMÁRIO

<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>i</b>
<b>Lista de Tabelas</b> .....	<b>ii</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b> .....	<b>iii</b>
<b>1. Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1 Motivação da Pesquisa .....	3
1.2 Objetivos da Dissertação .....	4
1.2.1 Objetivo Geral .....	4
1.2.2 Objetivos Específicos.....	4
1.3 Organização da Dissertação .....	4
<b>2. O Contexto</b> .....	<b>5</b>
2.1 A Empresa .....	5
2.2 O Processo Produtivo e o Problema.....	8
<b>3. Problemas de Dimensionamento de Lotes e Sequenciamento</b> .....	<b>10</b>
3.1 Introdução.....	10
3.2 Abordagem Clássica.....	10
3.3 Primeiros Estudos.....	11
3.4 Problema de Dimensionamento de Lotes Capacitado.....	12
3.5 Problema Discreto de Dimensionamento de Lotes e Sequenciamento .....	12
3.6 Classificação e Reformulação .....	14
<b>4. Estudo de Caso: Planejamento da Produção de Impressoras</b> .....	<b>16</b>
4.1 Metodologia .....	16
4.2 Introdução.....	16
4.3 Modelagem Matemática.....	18
4.3.1 Parâmetros e Variáveis Utilizados .....	18
4.4 O Modelo_1.....	20
4.4.1 Adição de desigualdades e restrições reformuladas .....	22
4.5 O Modelo_2.....	23
4.6 Análise dos Dados .....	25
4.7 Resultados Obtidos.....	30
4.8 Limites Computacionais do Modelo .....	34

4.9	Análise dos Resultados.....	36
<b>5.</b>	<b>Conclusões.....</b>	<b>37</b>
	<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>39</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Áreas de atuação da empresa estudada.....	6
<b>Figura 2</b> Mercados de atuação da empresa estudada .....	6
<b>Figura 3</b> Crescimento de receita desacelerado no ano de 2008.....	7
<b>Figura 4</b> Fluxograma resumido do processo produtivo. Fonte: Rodrigues (2006). .....	8
<b>Figura 5</b> Processo de produção de impressoras sob demanda variável ao longo do tempo .....	9
<b>Figura 6</b> Restrição global de conservação do fluxo .....	22

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b>	Tempo unitário de produção da impressora tipo $j$ na linha $l$ .....	26
<b>Tabela 2</b>	Custo unitário de produção da impressora tipo $j$ na linha $l$ .....	26
<b>Tabela 3</b>	Custo unitário de estocagem da impressora tipo $j$ de um <i>macro período</i> para outro	26
<b>Tabela 4</b>	Tempo de <i>set-up</i> da impressora tipo $j$ na linha $l$ .....	27
<b>Tabela 5</b>	Custo de <i>set-up</i> da impressora tipo $j$ na linha $l$ .....	27
<b>Tabela 6</b>	Tempo de <i>changeover</i> da impressora tipo $j$ na linha $l$ .....	27
<b>Tabela 7</b>	Custo de <i>changeover</i> da impressora tipo $j$ na linha $l$ .....	28
<b>Tabela 8</b>	Demanda agregada da impressora tipo $j$ no <i>macro período</i> $t$ .....	28
<b>Tabela 9</b>	Capacidade disponível a produção de impressora na linha $l$ por <i>micro período</i> .....	28
<b>Tabela 10</b>	Capacidade disponível para a linha $l$ no <i>macro período</i> $t$ .....	29
<b>Tabela 11</b>	Lote mínimo de produção para a impressora tipo $j$ na linha $l$ .....	29
<b>Tabela 12</b>	Estoque inicial da impressora tipo $j$ no início do planejamento .....	29
<b>Tabela 13</b>	Estoque de segurança para a impressora tipo $j$ .....	30
<b>Tabela 14</b>	Tempo de manutenção preventiva para a linha $l$ .....	30
<b>Tabela 15</b>	Plano macro de produção para o mês 1 .....	31
<b>Tabela 16</b>	Plano macro de produção para o mês 2 .....	31
<b>Tabela 17</b>	Plano e sequência de produção detalhados para o mês 1 .....	33
<b>Tabela 18</b>	Plano e sequência de produção detalhados para o mês 2 .....	34
<b>Tabela 19</b>	Sequência de produção nas linhas de manufatura .....	34
<b>Tabela 20</b>	Análise dos modelos para 4 tipos de impressoras, 2 linhas de manufatura .....	35
<b>Tabela 21</b>	Análise dos modelos para 5 tipos de impressoras, 3 linhas de manufatura .....	36
<b>Tabela 22</b>	Análise dos modelos para 6 tipos de impressoras, 3 linhas de manufatura .....	36
<b>Tabela 23</b>	Produção histórica das impressoras nos últimos 3 meses .....	37

## LISTA DE ABREVIATURAS

KPS.....	<i>Kellogg Planning System</i> Sistema de Planejamento da Kellogg
SAD.....	Sistemas de apoio à decisão
PO.....	Pesquisa Operacional
GLSPST.....	<i>General Lot-sizing and Scheduling Problem with Set-up Times</i> Problema geral de dimensionamento de lotes e sequenciamento simultâneos
OEMs.....	<i>Original Electronic Manufactures</i> Manufatureiros originais de eletroeletrônicos
EMS.....	<i>Electronic Manufacturing Service</i> Serviço de manufatura de eletroeletrônicos
SMT.....	<i>Surface Mount Technology</i> Tecnologia de montagem em superfície
SMED.....	<i>Single Minute Exchange Die</i> Troca rápida de ferramentas
MPS.....	<i>Master Program Schedule</i> Programa mestre de produção
MRP.....	<i>Material Requirement Planning</i> Planejamento de necessidades de materiais
NP-Hard.....	Não Polinomial - Difícil
EOQ.....	<i>Economical Order Quantity</i> Dimensionamento do lote econômico

- ELSP..... *Economic Lot Scheduling Problem*  
Problema do dimensionamento de lotes e sequenciamento econômico
- CLSP..... *Capacitated Lot-Sizing Problem*  
Problema de dimensionamento de lotes capacitado
- DLSP..... *Discrete Lot-Sizing and Scheduling Problem*  
Problema discreto de dimensionamento de lotes e sequenciamento
- CSLP..... *Continuous Set-up Lot-Sizing Problem*  
Problema de dimensionamento de lotes com *set-up* contínuo
- BSP..... *Batch Scheduling Problem*  
Problema de sequenciamento de lotes
- DLSPSD..... *Discrete Lot-sizing and scheduling problem with sequence dependent  
set-up costs and set-up times*  
Problema discreto de dimensionamento de lotes e sequenciamento  
dependente da sequência com custos e tempos de *set-up*
- TSPTW..... *Travelling Salesman problem with time windows*  
Problema do caixeiro viajante com janelas de tempo

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

A concorrência entre empresas de manufatura contratada no setor de eletroeletrônica é bastante elevada. O lucro proveniente de altos índices de serviço está diretamente ligado à redução de custo de operações, uma vez que o preço final dos produtos eletrônicos é determinado pelas OEMs (*Original Electronic Manufactures*). A concorrência entre empresas desse setor leva a indústria a um conflito clássico entre produtividade e flexibilidade, afetando diretamente os seus sistemas de planejamento da produção.

O planejamento e sequenciamento da produção é um dos assuntos mais desafiadores para quem está na responsabilidade de gestão de operações em uma organização (Drexl & Kimms [13]). A gestão do planejamento e controle da produção deve estar relacionada a metas estratégicas operacionais sincronizadas com objetivos de vendas, disponibilidade de recursos e orçamentos financeiros. No ambiente de produção discreta, esse planejamento depende da habilidade dos gestores em determinar o tamanho dos lotes e a sequência de produção destes em linhas de manufatura ao longo do horizonte pré-determinado. Se o plano de produção não é integrado, os gerentes de produção não podem assumir responsabilidades de atendimento do plano. Nesse momento, abordagens informais geralmente são desenvolvidas para esconder as inconsistências do processo falho (Vollman *et al.* [37]). Em geral, um plano de produção eficaz e eficiente é aquele que satisfaz a demanda dentro do tempo previsto, respeita a capacidade de recursos presentes e minimiza os custos de produção. Nesse contexto, a redução de custos através da otimização de processos se torna de caráter estratégico para o aumento da competitividade (Santos [31]).

A implantação de modelos de planejamento tático e operacional por meio de sistemas de apoio à decisão leva ao aumento de sincronia de operações e à redução de custos operacionais. A Kellogg, por exemplo, reduziu custos em 4,5 milhões em 1995 através da implantação de um sistema operacional de planejamento da produção (KPS – *Kellogg Planning System*). Este sistema permite determinar questões relativas ao tamanho dos lotes de produção, o quanto estocar e distribuir. Sua implantação em nível de planejamento tático viabilizou a redução de 35 a 40 milhões de dólares (Brown *et al.* [9]). Já a BMW estima reduzir entre 5 a 7% dos investimentos e custos de material, produção e distribuição ao implementar o modelo de

otimização para o planejamento estratégico de sua rede mundial de produção (Fleischmann *et al.* [15]).

Além da BMW e Kellogg, outras empresas também investem em otimização de operações estratégicas. Como exemplo tem-se o estudo conduzido por Bell & Anderson [5] em 30 grandes empresas. O estudo demonstra que as empresas que são fortemente dependentes de suas operações que investiram na incorporação de algoritmos de pesquisa operacional em seus sistemas de apoio à decisão – SAD apresentaram maior lucratividade e/ou crescimento da fatia de mercado no período estudado de 5 anos. Por outro lado, empresas que não apresentavam (ou apresentavam poucos) algoritmos de PO em seus SAD perderam mercado e/ou tiveram perda de lucratividade.

Essa dissertação foi motivada por um sistema de produção de impressoras que pode ter seu desempenho aumentado por meio da otimização de suas operações. Essa indústria, responsável pela manufatura de impressoras, funciona em 2 turnos, de 6 horas cada, durante 6 dias da semana. São 4 tipos diferentes de impressoras que devem ser produzidas em 2 linhas tecnologicamente diferentes de manufatura. Os tempos unitários de produção de cada impressora são diferenciados em função das linhas de manufatura. Os tempos de *set-up* dependem do produto e da linha de manufatura onde o produto será fabricado, no entanto, não há consumo de tempo significativo na troca de tipos de impressas, o que caracteriza o *set-up* dependente do produto, e não da sequência. O sistema de produção é limitado, ou seja, possui capacidade finita de produção, o que acarreta a concorrência dos produtos por recursos de produção. Os tempos de *changeover* dependentes da linha de manufatura e a consideração dos tempos previstos para manutenção reduzem a capacidade total disponível para produção e a diferencia de um período para o outro. A modelagem matemática desses problemas combinatórios que levam a capacidade finita de produção em consideração é mais representativa (Souza e Castro [32]).

Por questões de economia de escala, uma vez iniciada e ativada para produção, a linha de manufatura deve fabricar um lote mínimo de impressoras. O estoque ao final do período do horizonte de planejamento também é determinado pela gerência. Este estoque de segurança previne que pedidos de última hora, ou alterações dos pedidos possam levar ao não atendimento da demanda e comprometer a imagem da empresa. Por restrições de contrato, a demanda deve ser atendida sem a permissão de *backlogging*. O objetivo do planejamento da produção é determinar o tamanho ótimo dos lotes, assim como a sequência de produção destes nas linhas de manufatura de forma a minimizar os custos de *set-up* e estocagem ao longo do período de planejamento.

O problema apresentado pela empresa caracteriza o problema de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção. No entanto, este apresenta algumas particularidades e agentes que dificultam a resolução do modelo como: tempos de *changeover*, *set-up*, lote mínimo de produção e estoque de segurança.

Para tanto, foi desenvolvido e implementado um modelo matemático de otimização para auxiliar o processo de tomada de decisão relativo ao planejamento da produção de impressoras. O presente modelo foi adaptado do problema geral de dimensionamento de lotes e sequenciamento simultâneos (GLSPST) apresentado em Meyr [24] e integra decisões táticas de dimensionamento de lotes e operacionais de sequenciamento da produção. O trabalho apresentado abrange um horizonte de planejamento de 96 turnos em 2 meses. Busca-se determinar o quanto e quando produzir de cada lote e a melhor sequência e alocação destes nas diferentes linhas de manufatura.

Apresenta-se um modelo inicial, nomeado como Modelo\_1, para representação do problema atual. Este modelo matemático é de difícil solução. Para tanto, adota-se a estratégia de adição de desigualdades e restrições reformuladas que tornam o novo modelo, nomeado como Modelo\_2, mais apropriado para resolver o problema da empresa. O Modelo\_2 viabiliza a resolução do problema de dimensionamento de lotes e sequenciamento simultâneo da produção em tempo computacional reduzido, se comparado ao Modelo\_1.

O desempenho dos modelos 1 e 2, no entanto, é diferenciado ao se deparar com diferentes condições de produção, como mostrado no estudo de análises de sensibilidade e simulações de novos cenários.

Este estudo foca, portanto, decisões de nível tático e operacional, fortalecendo uma visão integrada de planejamento. Este é de caráter estratégico, pois propicia à empresa a redução de custos de produção e leva a uma vantagem competitiva sustentável.

## 1.1 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

A motivação em resolver este problema de programação da produção de impressoras por modelos matemáticos de dimensionamento de lotes e sequenciamento simultâneos em máquinas paralelas vem da necessidade de balancear decisões entre redução de custo de *set-up* e redução do custo de armazenamento. A redução do custo de *set-up* favorece o aumento do tamanho de lotes de produção, enquanto que a redução dos custos de armazenamento favorece a redução do tamanho de lote e interfere nas decisões de sequenciamento. O modelo, ao ser implementado e

resolvido faz o balanceamento deste *tradeoff* e apresenta um plano de produção ao custo total mínimo. Dessa forma, apresenta-se uma contribuição à solução de problemas similares de planejamento da produção.

## **1.2 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO**

### **1.2.1 Objetivo geral**

O objetivo do estudo é demonstrar que técnicas de programação matemática aplicadas ao problema de planejamento da produção viabiliza a redução de custos operacionais e o atendimento da demanda no prazo. Estes produtos apresentam curto ciclo de vida (6 meses em média). Dessa forma, a necessidade de re-planejamento da produção com diferentes modelos inseridos no mercado é vital. Esta ferramenta se torna de caráter estratégico para a empresa atingir um diferencial competitivo, pois permite que o planejamento seja feito em tempo hábil, à medida que as informações de mercado são atualizadas.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Busca-se encontrar não só uma solução que atenda às necessidades pura e simplesmente de atendimento de demanda, mas encontrar um plano de produção com custo mínimo. Segundo Toletto *et al.*[33] esta parece ser uma tendência no planejamento e controle da produção de muitos setores industriais, pois se verificam ganhos de eficiência ao tratar problemas complexos simultaneamente.

## **1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

A dissertação está organizada na seguinte forma: O capítulo 2 apresenta a empresa, o contexto no qual esta se encontra inserida e faz-se uma descrição do problema a ser tratado. No capítulo 3, é feita uma revisão sobre importantes estudos de modelagem matemática de problemas de dimensionamento de lotes e sequenciamento presentes na literatura. O capítulo 4 apresenta o estudo de caso. Nesse capítulo são apresentados: a metodologia utilizada para tratamento do problema, os modelos matemáticos 1 e 2, os dados coletados com responsáveis pelo processo, os resultados computacionais, análises de sensibilidade e uma comparação dos resultados com a prática atual. Finalmente, no capítulo 5 são apresentadas conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

# CAPÍTULO 2

## O CONTEXTO

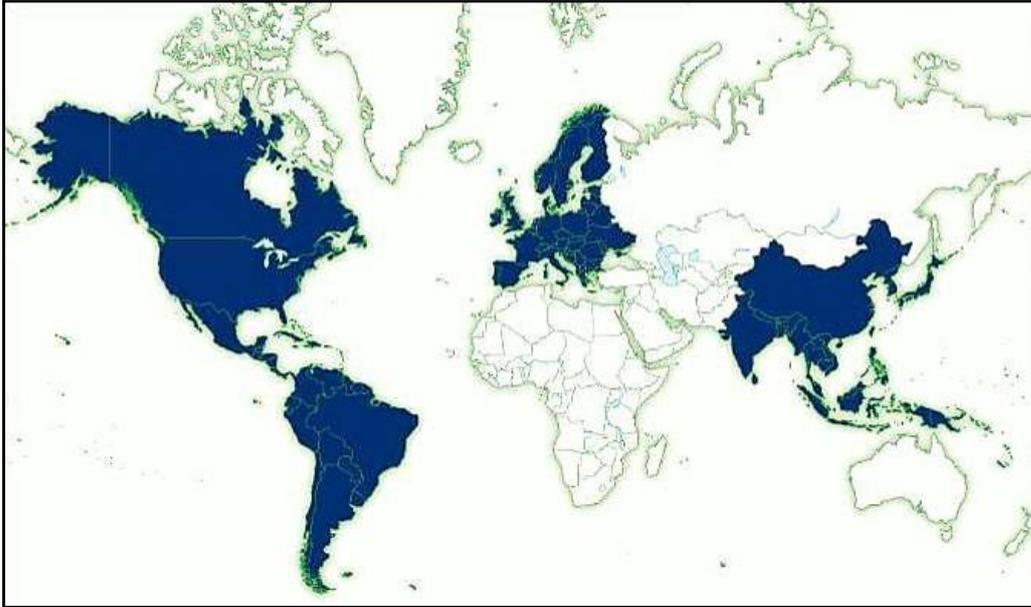
No Brasil o setor de eletroeletrônicos é marcado pela forte presença de empresas do tipo de manufatura contratada. Nesse ambiente, as OEMs (*Original Electronic Manufactures*) são responsáveis pelo fortalecimento da marca, desenvolvimento de produtos, marketing e vendas. As EMS (*Electronic Manufacturing Service*) assumem o papel referente à gestão da produção e da cadeia de suprimentos, cuidando de todo processo produtivo, desde a aquisição de matérias primas até a entrega do produto final às OEMs (Rodrigues [28]).

A produção de impressoras se inicia, portanto, na seleção de matérias-primas com fornecedores mundiais. Em seguida são montadas placas de circuito impresso (PCI) e dispositivos eletromecânicos em linhas de manufatura altamente automatizadas. Estes itens e placas são armazenados na empresa e constituem matéria prima para a fase de montagem final. Como a montagem final de impressoras é caracterizada pelo uso intenso das linhas de manufatura, estas são consideradas gargalos potenciais.

A determinação de tamanhos de lotes e o sequenciamento destes em linhas de manufatura vem da necessidade de se aproveitar esse recurso escasso ao máximo.

### 2.1 A EMPRESA

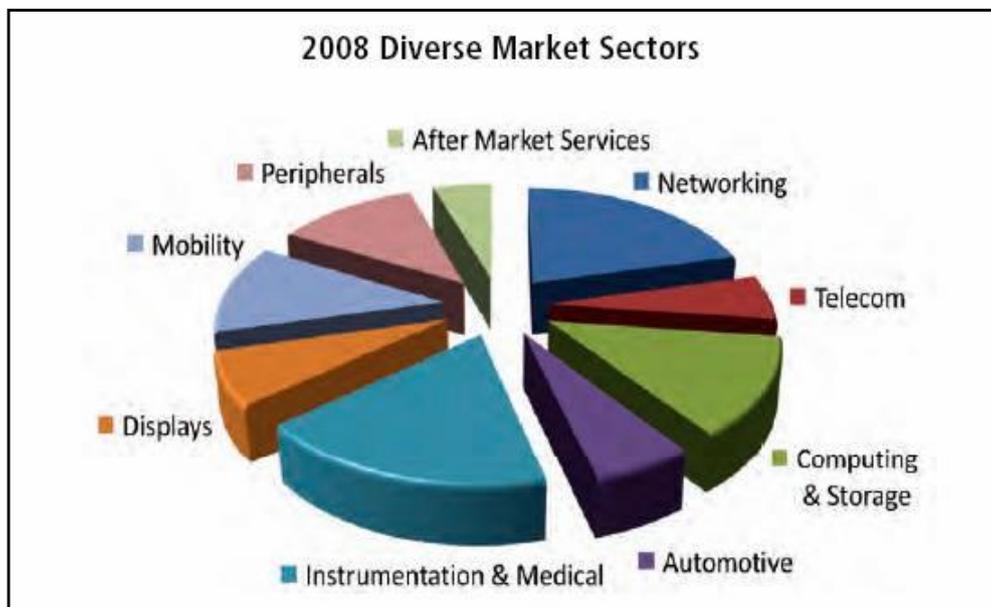
A empresa estudada é uma multinacional do setor de eletroeletrônicos e informática. Esta possui grande atuação no mundo com aproximadamente 85000 empregados que trabalham nas suas 55 plantas industriais localizadas em 22 países dos continentes Americano, Europeu e Asiático (Figura 1).



**Figura 1** Áreas de atuação da empresa estudada.

Como destaque entre as empresas desse setor, a empresa estudada apresentou receita de 12,7 bilhões de dólares, receita líquida de 133,9 milhões de dólares no ano de 2008 e crescimento médio anual de 27,46% desde 2003.

Seus clientes são indústrias automotivas, aeroespaciais, indústrias de computação, telecomunicações, automação, entre outras (Figura 2).



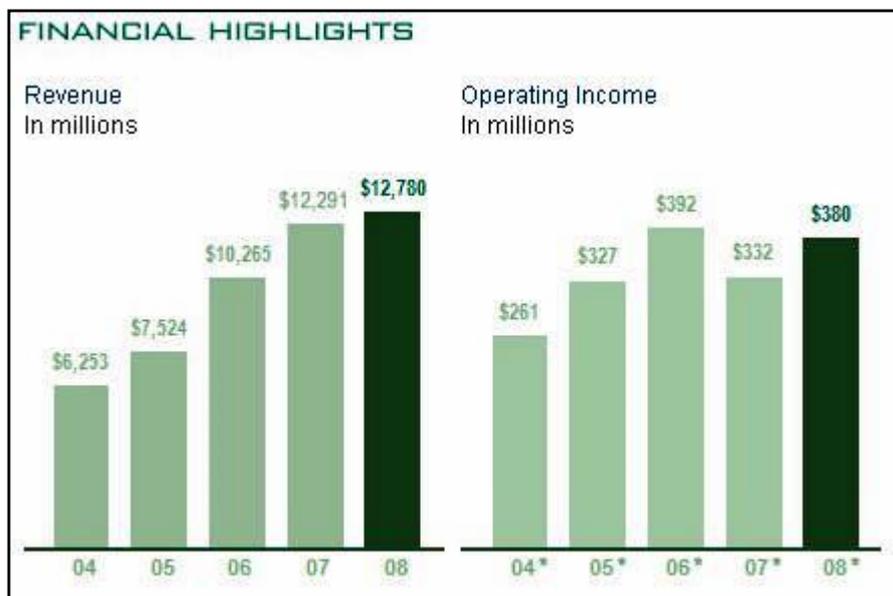
**Figura 2** Mercados de atuação da empresa estudada

Embora a empresa analisada ofereça serviços de tecnologia, *design*, gestão da cadeia de suprimentos, seu principal serviço é a manufatura e distribuição.

A crise financeira mundial iniciada em outubro de 2008 afetou diretamente parte de seus clientes levando a uma redução da tendência de crescimento (Figura 3). Nesse momento, o investimento em otimização dos processos de manufatura para redução de custos se torna de caráter estratégico. Como o preço do produto é negociado e fixado previamente com o cliente, ao otimizar o seu processo produtivo a empresa consegue aumentar suas margens de lucro através da redução de custos de operações.

Aplicações de técnicas de otimização de operações de manufatura se justificam devido à necessidade de flexibilidade frente às variações de demanda em mercados mundiais. Portanto, a redução de custos e a manutenção da qualidade de produtos e confiabilidade na entrega são de grande importância à corporação.

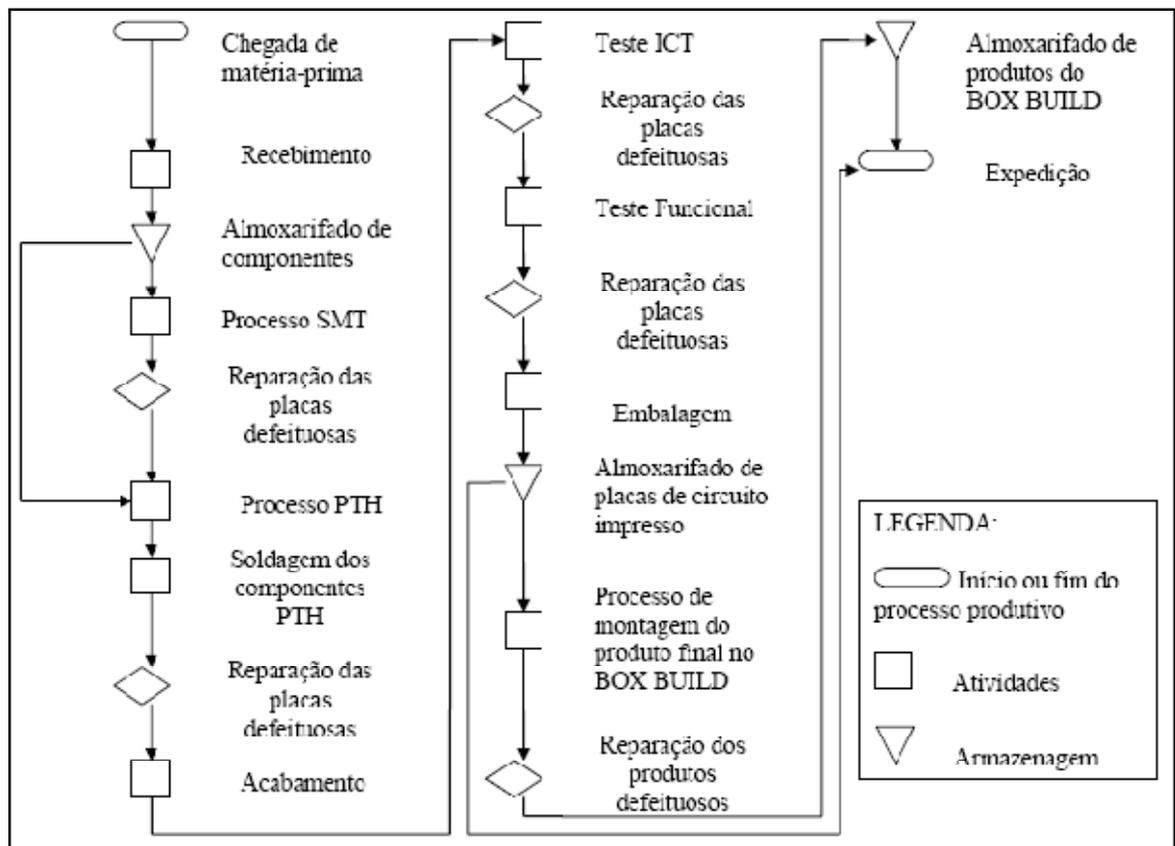
O problema analisado foca o processo de montagem final de impressoras. Essa etapa do processo é de grande importância para a empresa, pois sua capacidade é limitada se comparada com outras fases de montagem. Além de ser o gargalo, essa etapa está diretamente ligada à demanda final, apresentando maiores oscilações. Daí a necessidade de uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão que permita fazer o re-planejamento à medida que o cenário externo muda.



**Figura 3** Crescimento de receita desacelerado no ano de 2008

## 2.2 O PROCESSO PRODUTIVO E O PROBLEMA

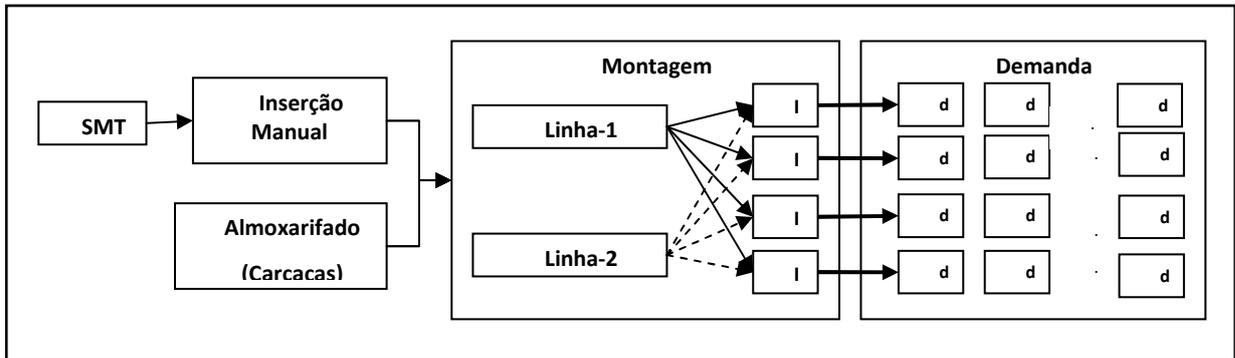
A produção de impressoras inicia-se na montagem da placa de circuito impresso ICB (*In Circuit Board*) que é dada em linhas SMT (*Surface Mount Technology*) formada por máquinas de montagem automática rigidamente interligadas que posicionam e soldam os componentes eletrônicos em locais específicos da placa de circuito impresso. Em seguida, esta é levada à área de inserção manual PTH (*Plated Through Hole*) e testes ICT (*In Circuit Test*), onde componentes eletrônicos maiores são posicionados manualmente na placa. Finalmente a placa segue para a área de montagem final. Na área de montagem, as placas, dispositivos eletroeletrônicos e mecânicos são posicionados dentro de uma carcaça plástica configurando o produto final (Figura 4).



**Figura 4** Fluxograma resumido do processo produtivo. **Fonte:** Rodrigues (2006).

Existem duas linhas tecnologicamente diferentes e flexíveis de montagem. Cada linha possui capacidade e tecnologia de produzir os 4 tipos diferentes de impressora (Figura 5). Os tempos de *changeover* nas linhas 1 e 2 variam entre 160 e 200 minutos em função de cada tipo de impressora. Estes tempos se apresentam estabilizados devido à implantação de técnicas de

SMED (*Single Minute Exchange Die*) de manufatura enxuta, um trabalho iniciado em linhas SMT por Rodrigues [28] de reconfiguração de máquinas e externalização de etapas, permitindo a redução e manutenção do tempo de *changeover* por linha. Esta técnica permite que a restrição da mochila (de capacidade) presente no modelo matemático seja menos justa, favorecendo um melhor desempenho do modelo.



**Figura 5** Processo de produção de impressoras sob demanda variável ao longo do tempo

Considera-se a montagem final a etapa gargalo do processo de produção, uma vez que as etapas anteriores possuem maior capacidade instalada e produzem sob demanda dessa etapa. Além disso, esta etapa está diretamente ligada aos pedidos finais de clientes. Portanto, a programação da produção da área de montagem é de importância estratégica para esta empresa de manufatura contratada.

Os dados de entrada do modelo como: demanda de curto prazo, produtividade, tempo disponível por turno, custo de estoque e custos e tempos de *set-up* e *changeover* são determinísticos e foram coletados com engenheiros responsáveis pelo processo.

Este processo de manufatura pode ser modelado pelo problema de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção. Para isso foi feito um estudo de modelos clássicos e reformulados na literatura. Belvaux & Wolsey [6], Pochet & Wolsey [27] e Wolsey [39], por exemplo, tratam de reformulações matemáticas para problemas de dimensionamento de lotes e sequenciamento e lidam com aspectos como *start-ups*, *changeovers*, tamanho mínimo de lotes, escolha entre um ou dois *set-ups* por período em problemas *small bucket* e *big bucket*.

# CAPÍTULO 3

## MODELAGEM MATEMÁTICA - PROBLEMAS DE DIMENSIONAMENTO DE LOTES E SEQUENCIAMENTO

Este capítulo aborda a evolução histórica de modelagem de problemas de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção, bem como estratégias de resolução desses modelos. É dado um foco maior à estratégia de reformulação matemática e adição de desigualdades válidas por ser um assunto relacionado ao problema estudado nessa dissertação.

### 3.1 INTRODUÇÃO

Para diferenciar a abrangência de atuação, os modelos de dimensionamento de lotes e sequenciamento são classificados. A classificação e formulações matemáticas destes modelos são encontrados em trabalhos recentes como em Pochet & Wolsey [27], Wolsey [40] e revisões como a de Drexl & Kimms [13], Brahimi *et al.* [8]. Essa classificação facilita o entendimento da abrangência do modelo permitindo, assim, uma adequação maior à prática.

A implementação dos modelos de dimensionamento de lotes e sequenciamento em problemas industriais reais permite ao leitor compreender detalhes de como fazer o tratamento de informações e adequar as restrições aos diferentes ambientes de atuação. Aplicações em indústrias automotivas, indústrias de fundição, indústrias de recipientes de vidro, fábricas de refrigerantes, fábricas de rações, fábricas de iogurte e indústrias de alimentos são encontrados em Fleischmann *et al.* [15], Meza *et al.* [25], Pinedo [26], Toledo *et al.* [33], Toso & Morabito [34], Marinelli *et al.* [23] e Brown *et al.* [9] respectivamente.

### 3.2 ABORDAGEM CLÁSSICA

A abordagem clássica, e ainda atual, de planejamento da produção e sequenciamento se baseia no processo de decomposição hierárquica onde o programa mestre de produção (MPS)

determina as datas de entrega. Estas são atendidas através do cálculo do planejamento de necessidades de materiais (MRP). Uma vez determinados os tamanhos de lotes o sequenciamento é feito. Dessa forma, é necessário que as informações de planejamento de longo prazo (MPS) sejam detalhadas em nível médio (MRP) e em seguida em nível curto (sequenciamento) (ver Vollman *et al.*, [37]). Nesse momento, embora as capacidades produtivas possam ser eventualmente respeitadas, não se tem interação entre os diferentes níveis de planejamento, o que pode levar a planos inviáveis de produção.

As limitações do MRP em relação ao tratamento de informações de restrição de capacidade e sequenciamento de operações motivaram Chen & Ji [10] a elaborar um modelo de programação inteira mista para integrar decisões de planejamento da produção e sequenciamento das operações ao nível de chão de fábrica.

O modelo se adequa a estruturas de produto multi-nível e considera as relações de precedência na configuração destes. A solução do modelo por meio do *software* comercial CPLEX se mostra limitada a pequenas instâncias devido ao alto grau de complexidade do modelo (NP-Hard).

Embora seja bastante relevante em aplicações práticas, o problema de dimensionamento de lotes e sequenciamento multi-nível não tem recebido esforços consideráveis em pesquisas (Brahimi *et al.* [8]).

### 3.3 PRIMEIROS ESTUDOS

Segundo Drexel & Kimms [13], os primeiros estudos em planejamento da produção no que se refere ao dimensionamento de lotes iniciaram com o modelo em tempo contínuo de dimensionamento do lote econômico (EOQ – *Economical Order Quantity*) sem restrições de capacidade, demanda considerada estacionária e horizonte de planejamento infinito.

No ambiente prático de planejamento da produção o EOQ foi menos utilizado do que se esperava, pois este se limitava a aplicações onde empresas deveriam estar sob condições de suprimento contínuo e compras intermitentes. Este conjunto específico de situações limitou a aplicabilidade do modelo. Dificuldades adicionais apareciam quando um número adicional de itens deveria ser considerado simultaneamente (Rogers [29]).

Rogers [29] e Elmaghraby [14] levaram as restrições de capacidade em consideração através do ELSP – *Economic Lot Scheduling Problem*. Perceberam que itens, ao concorrer pela atenção

de um recurso, levaria a um fenômeno de interferência onde um recurso é requisitado a fazer 2 ou mais itens ao mesmo tempo, o que é fisicamente impossível (Elmaghraby, [14]).

No entanto, assim como o EOQ, o ELSP é também um modelo em tempo contínuo, ainda assume demanda estacionária e o horizonte de planejamento infinito, além de ser NP-Hard. Uma evolução vem com o algoritmo de Wagner & Whitin [38] onde se tem uma versão dinâmica do EOQ, que subdivide o tempo em períodos discretos e considera a demanda dinâmica, permitindo a resolução do problema em tempo polinomial. No entanto, esse problema não considera limites de capacidade (Drexel & Kimms [13]).

### **3.4 PROBLEMA DE DIMENSIONAMENTO DE LOTES CAPACITADO**

O problema de dimensionamento de lotes capacitado (CLSP) é uma extensão do problema de Wagner & Whitin, pois leva as restrições de capacidade em consideração.

O problema de dimensionamento de lotes capacitado com capacidade constante pode ser resolvido em tempo polinomial, ao ser decomposto em subproblemas de dimensionamento de lotes não capacitados. Os problemas de dimensionamento de lotes não capacitados já foram bastante estudados. Estes problemas podem ser reformulados matematicamente como o problema do caminho mais curto e são resolvidos em tempo polinomial (ver Pochet & Wolsey [27] capítulo 7.4 para uma formulação compacta linear desse problema).

Embora os problemas com capacidade constante ou não-capacitados possam ser resolvidos em tempo polinomial, os problemas de dimensionamento de lotes com capacidade variável e *set-ups* independentes são *NP-hard* sob condições similares (Bitran & Yanasse [7]), pois podem ser reduzidos ao problema da mochila 0-1. (Pochet & Wolsey [27]).

### **3.5 PROBLEMA DISCRETO DE DIMENSIONAMENTO DE LOTES E SEQUENCIAMENTO**

As tentativas para integrar o modelo de planejamento e sequenciamento em ambiente *job-shop* ocorrem em Dauzère-Pérez & Lasserre [12]. Estes se baseiam no método de Lasserre [20] para encontrar um plano viável de produção. A solução se restringe a um procedimento de alternância entre a resolução do modelo de planejamento mantendo a sequência dos produtos

fixa nas máquinas e sequenciamento *job-shop* para um plano fixo de produção. O objetivo é encontrar o melhor plano viável. A estratégia é justificada pelo fato de modelos tradicionais de planejamento da produção ignorarem as restrições de sequenciamento em ambiente *job-shop*, o que pode levar à inviabilidade da produção. O método não garante a otimalidade da solução, no entanto, garante a solução de um plano viável de produção.

Uma estratégia interessante adotada para integrar decisões de sequenciamento no problema de dimensionamento de lotes capacitado é subdividir os *macroperíodos* desse problema em *microperíodos*. Assim, tem-se o problema discreto de dimensionamento de lotes e sequenciamento (DLSP) (Arenales *et al.* [4]). Neste problema, os períodos apresentam curta duração (turnos ou horas) e por isso ele é chamado *small bucket*. Outra característica desses problemas é a presença de restrições de produção “tudo ou nada”. Nestes *microperíodos* se pode produzir apenas um produto por período. Para tornar este problema mais realístico, decisões de produção “tudo ou nada” por período são eliminadas através da permissão de ocorrência de *set-up* no decorrer do turno. Desse modo, tem-se a produção de mais de um produto em um único turno caracterizando o problema de dimensionamento de lotes com *set-up* contínuo (CSLP) (Drexel & Kimms [13]).

A semelhança do DLSP com problemas de sequenciamento motivou Jordan & Drexel [18] a resolvê-lo pelo problema de sequenciamento de lotes (BSP). O BSP é o nome que se dá à modelagem matemática do DLSP quando se trata do problema em uma máquina com tempo e custo de *set-up* dependentes da sequência. Isso ocorre devido à viabilidade de resolução deste problema pelo problema de sequenciamento em uma máquina.

Jordan & Drexel [18] provam a equivalência do DLSP e o BSP. Os modelos podem resolver os mesmos problemas se as instâncias forem transformadas. No entanto, a aplicação do BSP é mais vantajosa em instâncias com poucos itens, *set-ups* longos e alta utilização da capacidade, enquanto que o DLSP se adequa mais a instâncias com muitos itens, baixa utilização da capacidade e tempos de *set-up* não muito significativos.

A modelagem de problemas mais complexos como o problema capacitado de sequenciamento e dimensionamento de lotes com custos de *set-up* dependentes da sequência e tempos de *set-up* não-nulos com característica de manutenção de *set-up* de um período para outro são encontrados em estudos como em Gupta & Magnusson [17], Absi & Sidhoum [2], Lobo *et al.* [21] e Meyr [24]. Esses problemas são considerados NP-hard (Bitran & Yanasse [7]). Por isso, técnicas como *branch-and-cut*, reotimização dual e metaheurísticas como *Simulated Annealing* são estrategicamente adotadas para resolução destes.

### 3.6 CLASSIFICAÇÃO E REFORMULAÇÃO

A estratégia de classificação dos problemas de dimensionamento de lotes multi-item em níveis de similaridade das formulações e restrições apresentada em Pochet & Wolsey [27] é de grande valia, visto que permite o direcionamento da pesquisa de acordo com o tipo de problema de dimensionamento de lotes que se tem. Além disso, a classificação destes problemas apresenta reformulações matemáticas e desigualdades válidas para problemas similares.

Adição de desigualdades e de restrições reformuladas são estratégias utilizadas no desenvolvimento deste trabalho. A classificação de certos problemas de dimensionamento de lotes permite que essa classe de problemas possa ser resolvida através de reformulações padrões, formulações estendidas, famílias de desigualdades válidas e bons *solvers* de Programação Inteira Mista. Para demonstrar a vantagem do uso de classificação e reformulação, Wolsey [40] apresenta a descrição de três problemas multi-itens. Estes problemas são classificados (segundo uma tabela que apresenta estudos mais importantes relacionados ao problema), reformulados e implementados para comparações de desempenho. A reformulação é de grande importância, pois permite que estes problemas práticos possam ser efetivamente resolvidos em *softwares* comerciais como XPRESS e CPLEX (Belvaux & Wolsey [6]). Reformulações matemáticas de modelos de dimensionamento de lotes e sequenciamento incluindo *changeovers* e *start-ups* podem ser vistos em Wolsey [39].

Alguns trabalhos como o de Kamarkar & Schrage [19] apresentam formulações alternativas para o problema de dimensionamento de lotes e sequenciamento. Através de relaxação lagrangeana busca-se determinar bons *lower bounds* reduzindo o espaço de busca do algoritmo *branch-and-bound*.

As reformulações matemáticas e desigualdades válidas adequadas ao modelo de dimensionamento de lotes e sequenciamento apresentam aproximações da casca convexa. Estas são originárias de modelos item-único (dos quais já se tem bastante conhecimento) e finalmente adaptadas a modelos multi-item. A decomposição de problemas multi-item em um conjunto de problemas item-único agregados por restrições de união faz com que a resolução desses problemas possa ser dada em *softwares* comerciais de Programação Inteira-Mista através de reformulações matemáticas e inserção de desigualdades válidas (ver Wolsey [40]).

A adição de desigualdades válidas proporciona formulações mais fortes. Esta estratégia é mais eficiente se comparada à estratégia de relaxação linear. Uma descrição parcial linear da casca convexa de soluções viáveis que resolvem o problema discreto de dimensionamento de

lotes e sequenciamento para item-único pode ser visto em Van Eijl & Van Hoesel [35] enquanto que em Contantino [11] têm-se famílias de desigualdades válidas para este mesmo problema multi-item única-máquina. Nesse último artigo, um estudo para a indústria química, obteve-se redução de tempo computacional pela busca da solução ótima para um problema com 5 itens e até 36 períodos. Em um estudo para uma fábrica de iogurte, Marinelli *et al.* [23] adotam uma estratégia heurística para a resolução deste problema em máquinas paralelas e estoques compartilhados.

Outra estratégia é a desagregação das variáveis do problema discreto de dimensionamento de lotes e sequenciamento. Isso permite que este problema possa ser reformulado como o problema linear do caminho mais curto. Esta formulação, no entanto, cresce muito rápido com o aumento do número de itens. Dessa forma, para que esta formulação linear possa ser utilizada pelos aplicativos é necessário desenvolver algoritmos que excluam e adicionem variáveis e restrições extensivamente (ver van Hoesel & Kolen [36]).

A reformulação matemática do problema discreto de dimensionamento de lotes e sequenciamento dependente da sequência com custos e tempos de *set-up* (DLSPSD) pode ser feita através da transformação deste no Problema do caixeiro viajante com janelas de tempo (TSPTW) (Salomon *et al.* [30]). Estes fazem uso da programação dinâmica para a resolução deste problema.

Sob condições específicas de custo de armazenamento, o problema de dimensionamento de lotes multi-item com capacidade constante e custos de *set-up* associados pode ser reformulado e resolvido em tempo polinomial (ver Anily *et al.* [3] para uma formulação mais forte de programação linear para esse problema).

O problema capacitado de dimensionamento de lotes e sequenciamento simultâneos em linhas paralelas não idênticas apresentado neste estudo é do tipo *large bucket*, multi-máquinas, único nível, multi-item, estático e determinístico. Nessa abordagem, diversos itens podem ser produzidos em cada *macro período*. O sequenciamento ocorre ao se determinar a melhor sequência de alocação dos lotes produção em cada *micro período*. Embora este seja o assunto apresentado nesta dissertação, este problema é pouco discutido na literatura (Marinelli *et al.* [23]). Além disso, estes problemas práticos são raramente tratados por reformulação (Pochet & Wolsey [27]). O modelo matemático originalmente proposto faz uso de classificação apresentado em Wolsey [40], inserção de desigualdades e restrições reformuladas para ser implementado em um *software* comercial de Programação Inteira-Mista.

# CAPÍTULO 4

## ESTUDO DE CASO: PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO DE IMPRESSORAS

### 4.1 METODOLOGIA

A estratégia de pesquisa utilizada para condução do trabalho foi o estudo de caso. As fases envolvidas neste processo são: definição e desenvolvimento do instrumento de pesquisa, coleta de dados, análise dos dados e divulgação dos resultados e conclusões.

O problema consiste em determinar o melhor tamanho e sequência de alocação lotes de produção nas linhas de manufatura de impressoras, respeitando planos de manutenção preventiva de modo a atender a demanda prevista sem atrasos ao menor custo possível. Para isso foram feitas entrevistas individuais e reuniões com o grupo foco composto por técnicos responsáveis pelo processo produtivo para levantar principais fatores que interferem no planejamento da produção.

Em seguida foram pesquisados trabalhos e publicações referentes ao assunto de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção em linhas de manufatura paralelas que permitissem o desenvolvimento de um modelo matemático adequado à realidade encontrada.

A coleta de dados e análise destes ocorreu juntamente com o desenvolvimento e teste do modelo matemático. Dessa forma permite-se a estruturação e compatibilidade dos dados com a estratégia de modelagem proposta de forma a validar sua aplicabilidade e sugerir a implementação prática.

O trabalho abrange também o mapeamento da cadeia de valor, permitindo assim uma visão sistêmica do processo de produção e a proposição de um método alternativo de produção.

### 4.2 INTRODUÇÃO

O processo de montagem de impressoras é feito dentro das seguintes condições: tem-se 4 tipos de impressoras que são produzidas em 2 linhas tecnologicamente diferentes de

manufatura. A indústria funciona em um sistema de produção capacitado de 2 turnos, de 6 horas cada, durante 6 dias da semana.

Os tempos unitários de produção de cada impressora são diferenciados em função das linhas de manufatura. Os tempos de *set-up* dependem do produto e da linha de manufatura onde o produto será fabricado. No entanto, não há consumo de tempos significativos na troca de tipos de impressoras, o que caracteriza o *set-up* dependente do produto, e não da sequência. O sistema de produção apresentado é capacitado, ou seja, possui capacidade finita de produção, o que acarreta a concorrência dos produtos por recursos de produção. Os tempos de *changeover* dependentes da linha de manufatura e a consideração dos tempos previstos para manutenção reduzem e diferenciam a capacidade total disponível para produção de um período para o outro. Estas informações podem ser vistas nas Tabelas 6 e 14 respectivamente.

Uma variação do modelo de dimensionamento de lotes contemplado neste estudo é a consideração de estoques de segurança. Embora esta consideração esteja presente em muitos problemas práticos, ela está ausente na maioria das publicações científicas (Pochet & Wolsey [27]).

A demanda mensal é previamente determinada pelo cliente e dividida ao longo dos turnos; dessa forma têm-se dados de demanda por turno de cada produto. Parâmetros de entrada como custo unitário de estoque, estoque inicial disponível, tempo necessário para produzir e custo de *set-up* dos produtos nas linhas são determinísticos. Estes foram disponibilizados por engenheiros industriais responsáveis pelo processo e estão apresentados em tabelas na seção 4.6. O modelo não permite ruptura de estoque ou *backlogging* permitindo que a empresa apresente um maior nível de serviço ao seu cliente.

Para se ter acurácia nos dados de capacidade de planejamento, deve-se adicionar informações relacionadas à utilidade da capacidade, dessa forma tem-se a real capacidade definida como o número de horas efetivas de produção (Pochet & Wolsey [27]). O parâmetro capacidade disponível, proveniente da empresa analisada, é resultado, portanto, do desconto de tempos de *downtime*, interrupções e manutenção programada do tempo total disponível.

A manutenção programada pode ser pré-determinada para um horizonte de planejamento de longo prazo. O estudo de Azevedo [1] apresenta uma estratégia de alocação otimizada de projetos de manutenção preventiva em linhas de manufatura. Dessa maneira, esse trabalho considera os tempos pré-determinados de manutenção e a alocação otimizada destes no horizonte de planejamento. Estes, por sua vez, consomem parte do tempo disponível para manufatura das impressoras nos *macro períodos*. Isso faz com que a capacidade disponível para a produção seja diferenciada de um período para outro.

O problema capacitado de dimensionamento de lotes e sequenciamento simultâneos em linhas paralelas não idênticas apresentado neste estudo é do tipo *large bucket*, multi-máquinas, único nível, multi-item, estático e determinístico. Nessa abordagem, diversos itens podem ser produzidos em cada *macro período*. O sequenciamento ocorre ao se determinar a melhor sequência de alocação dos lotes produção em cada *micro período*.

Consideram-se dois níveis de planejamento por períodos: períodos *macro* e *micro*. O período *macro* abrange um mês de planejamento enquanto que o período *micro* se resume a um turno de produção. A inserção de variáveis de *set-up* permite que o tempo disponível para a produção seja utilizado em sua completude. Dessa forma, é possível que se tenha até dois tipos de impressoras produzidas por linha e por turno.

### 4.3 MODELAGEM MATEMÁTICA

O objetivo aqui proposto é integrar decisões de nível tático com horizonte de 2 meses ao nível de planejamento operacional de chão de fábrica. Fatores que influenciam e interferem no planejamento real da produção não podem ser omitidos, portanto, tempos de manutenção programada e taxa de produtividade são considerados no modelo. Estes, por sua vez, reduzem a capacidade disponível e a diferença de um período para o outro.

Elaborou-se, portanto, um modelo matemático do problema geral de dimensionamento de lotes e sequenciamento simultâneos. Este foi inicialmente apresentado em Meyr [24], no entanto algumas restrições foram acrescentadas para torná-lo mais próximo à realidade da empresa. O modelo matemático foi implementado no XPRESS versão 19.00.02 que utiliza a linguagem Mosel. Diversos exemplos de aplicações modelados em linguagem Mosel podem ser encontrados em Guéret *et al.* [16].

A estratégia de adição de desigualdades válidas de reformulação de restrições permitiu que o modelo pudesse ser executado pelo XPRESS em tempo hábil.

#### 4.3.1 Parâmetros e variáveis utilizados

Considera-se  $j = 1, \dots, J$  tipos de impressoras cujos lotes de produção devem ser sequenciados em  $l = 1, \dots, L$  linhas paralelas de manufatura não idênticas tecnologicamente por um horizonte finito de planejamento de  $t = 1, \dots, T$  meses. Os meses são considerados

*macroperíodos* que são subdivididos em  $s = 1, \dots, S$  turnos, como *microperíodos*. Como consequência do número de *microperíodos* ser fixado, pode-se haver *microperíodos* ociosos com quantidade de produção zero. Se um produto for alocado para ser produzido após um *micro período* ocioso, não ocorrerá *set-up* mantendo o estado da linha como no momento anterior.

É adotada a seguinte anotação para formular o problema:

### Parâmetros

$A_{jl}$	tempo unitário de produção da impressora tipo $j$ na linha $l$	(min)
$P_{jl}$	custo unitário de produção da impressora tipo $j$ na linha $l$	(U\$/unid)
$H_j$	custo unitário de estocagem da impressora tipo $j$ de um <i>macroperíodo</i> para outro	(U\$)
$CS_{jl}$	custo de <i>set-up</i> da impressora tipo $j$ na linha $l$	(U\$)
$ST_{jl}$	tempo de <i>changeover</i> da impressora tipo $j$ na linha $l$	(min)
$SE_{jl}$	tempo de <i>set-up</i> da impressora tipo $j$ na linha $l$	(min)
$G_{jl}$	custo de <i>changeover</i> da impressora tipo $j$ na linha $l$	(U\$)
$D_{jt}$	demanda agregada da impressora tipo $j$ no <i>macr período</i> $t$	(unid)
$C_l$	capacidade disponível para a produção de impressoras na linha $l$	(unid)
$K_{lt}$	capacidade disponível para a linha $l$ no <i>macroperíodo</i> $t$	(unid)
$LM_{jl}$	lote mínimo de produção para a impressora tipo $j$ na linha $l$	(unid)
$EI_j$	estoque inicial da impressora tipo $j$ no início do planejamento	(unid)
$ES_j$	estoque de segurança para a impressora tipo $j$	(unid)
$TM_t$	tempo de manutenção preventiva para a linha $l$	(min)

### Variáveis de decisão

$I_{jt}$	quantidade de estoque da impressora tipo $j$ ao final do <i>macroperíodo</i> $t$	(unid)
$x_{jls}$	quantidade de impressoras do tipo $j$ produzidas na linha $l$ no <i>microperíodo</i> $s$	
$y_{jls}$	estado de <i>set-up</i> . $y_{jls} = 1$ se a linha $l$ está preparada para produzir impressoras do tipo $j$ no <i>microperíodo</i> $s$ . ( $y_{jls} = 0$ caso contrário)	

$z_{jls}$   $z_{jls} = 1$  se há *changeover* no início do *microperíodo*  $s$  onde a linha  $l$  deve ser preparada para produzir impressoras do tipo  $j$ . ( $z_{jls} = 0$  caso contrário)

$w_{tsl}$   $w_{tsl} = 1$  se há manutenção preventiva programada no *macroperíodo*  $t$  *microperíodo*  $s$  na linha  $l$ ,  $w_{tsl} = 0$ , se não.

#### 4.4 O MODELO\_1

O Modelo\_1 apresenta a seguinte formulação inicial:

$$\text{minimize } \sum_t \sum_j H_j I_{jt} + \sum_l \sum_j \sum_s (CS_{jl} y_{jls} + G_{jl} z_{jls} + P_{jl} x_{jls}) \quad (0)$$

s.a:

$$EI_j + \sum_l \sum_s x_{jls} = D_{jt} + I_{jt} \quad t = 1, \forall j \in J \quad (1)$$

$$I_{jt-1} + \sum_l \sum_s x_{jls} = D_{jt} + I_{jt} \quad \forall t \in 2, \dots, T, \forall j \in J \quad (2)$$

$$I_{jt} \geq ES_j \quad \forall t \in T, \forall j \in J \quad (3)$$

$$\sum_j \sum_s (A_{jl} x_{jls} + ST_{jl} z_{jls} + SE_{jl} y_{jls}) \leq K_{lt} - \sum_s w_{tsl} TM_l \quad \forall t \in T, \forall l \in L \quad (4)$$

$$\sum_{s=1}^S w_{tsl} = 1 \quad t = 1, l = 1 \quad (5)$$

$$\sum_{s=s'+1}^S w_{tsl} = 1 \quad t = 1, l = 2 \quad (6)$$

$$\sum_{s=1}^S w_{tsl} = 1 \quad t = 2, l = 1 \quad (7)$$

$$\sum_{s=s'+1}^S w_{tsl} = 1 \quad t = 2, l = 2 \quad (8)$$

$$x_{jls} \geq LM_{jl} (y_{jls} - y_{jls-1}) \quad \forall j \in J, \forall l \in L, s \in 2, \dots, S \quad (9)$$

$$x_{jls} \leq C_{jl}(y_{jls-1} - y_{jls}) \quad \forall t \in T, \forall l \in L, s \in S \quad (10)$$

$$\sum_j A_{jl}x_{jls} + SE_{jl}y_{jls} \leq C_l \quad \forall l \in L, \forall s \in S \quad (11)$$

$$\sum_j y_{jls} = 1 \quad \forall l \in L, s \in S \quad (12)$$

$$z_{jls} \geq y_{ils-1} + y_{jls} - 1 \quad \forall i, j \in J, i \neq j, l \in L, s \in 2, \dots, S \quad (13)$$

$$I_{jt} \in Z, x_{jls} \in Z, y_{jls} \in \{0,1\}, z_{jls} \in \{0,1\}, w_{tsl} \in \{0,1\} \quad (14) (15) (16) (17) (18)$$

O objetivo do Modelo\_1 (0) é minimizar os custos de produção, estoque, *set-ups* e *changeovers*. Se o custo de produção for idêntico em todas as linhas ( $P_{jl} = P_j \forall l, j$ ), o custo total de produção se torna irrelevante e pode ser descartado da função objetivo. As restrições (1) e (2) são centrais em problemas de planejamento da produção. Estas determinam a conservação do fluxo de materiais ao longo do horizonte de planejamento. (Figura 6). Por questões de imprevistos e busca de manutenção de um bom nível de serviço, determina-se através da restrição (3) que o estoque de segurança deve ser respeitado. A restrição (4) determina que o somatório dos tempos de produção, de *changeover* e de *set-up* deve respeitar a capacidade disponível, que por sua vez é reduzida por tempos de manutenção preventiva. As restrições (5), (6), (7) e (8) estabelecem a ocorrência de uma manutenção preventiva por linha dentro de um período pré-determinado. A restrição (9) limita a quantidade mínima a ser produzida por linha e período caso ocorra o *set-up*, ou seja, a preparação para manufatura de um novo produto. A restrição (10) caracteriza o CSLP apresentado em Drexl & Kimms [13] e garante que a produção de uma impressora em determinado período só pode ocorrer se a linha estiver preparada no início ou no final daquele período. Como mais de um tipo de impressora pode ser produzida por período, a restrição (11) é introduzida para manter a capacidade disponível por *micro período* dentro dos limites. Como ao final ou início de cada período a linha deve ser organizada e abastecida, esta relação é determinada através da restrição (12). A conexão entre indicadores de *set-up* e indicadores de *changeover* é estabelecida pela restrição (13) e adaptado

do modelo de Meyr [24]. As restrições (14), (15), (16), (17) e (18) determinam o domínio das variáveis.

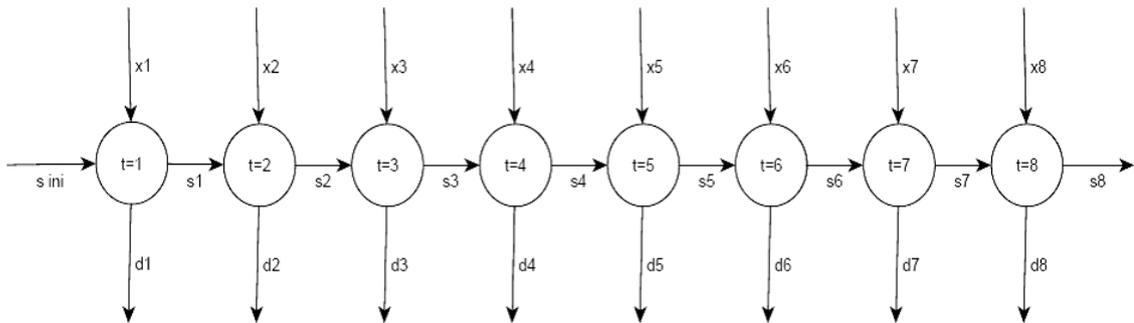


Figura 6 Restrição global de conservação do fluxo

#### 4.4.1 Adição de desigualdades e restrições reformuladas

A estratégia de adição de desigualdades e de restrições reformuladas ao Modelo\_1 permite que esse novo modelo (Modelo\_2) possa ser executado em menor tempo por um otimizador de PLIM. Assim têm-se as seguintes alterações:

A adição das desigualdades (19) e (20) adaptada de Belvaux & Wolsey [6], é válida pois a ativação de toda a capacidade disponível no período é maior ou igual à quantidade produzida no período, e essa quantidade adicionada ao estoque do período anterior deve ser maior ou igual à demanda.

$$EI_j + \sum_l^L \sum_s^S \left(\frac{C_l}{A_{jl}}\right) y_{jls} \geq D_{jt} \quad t = 1, \forall j \in J \quad (19)$$

$$I_{jt-1} + \sum_l^L \sum_s^S \left(\frac{C_l}{A_{jl}}\right) y_{jls} \geq D_{jt} \quad \forall t = 2, \dots, T, \forall j \in J \quad (20)$$

As restrições apresentadas em (21) e (22) representam a formulação matemática para *changeover* e substituem a restrição (13) do Modelo\_1.

$$z_{jls} \leq y_{jls} - y_{jls-1} \quad \forall j \in J, \forall l \in L, s \in 2, \dots, S \quad (21)$$

$$z_{jls} \leq y_{jls} \quad \forall j \in J, l \in L, s \in S \quad (22)$$

As desigualdades (24) e (25) são adicionadas como artifício de redução do espaço de busca e são adaptadas de Wolsey [40].

$$EI_j \geq D_{jk} (1 - \sum_l^L y_{jlk}) \quad \forall k \in 1, \dots, S, \forall j \in T \quad (23)$$

$$I_{jk-1} \geq D_{jk} (1 - \sum_l^L y_{jlk}) \quad \forall k \in 2, \dots, S, \forall j \in T \quad (24)$$

## 4.5 O MODELO\_2

O Modelo\_2, portanto, apresenta a seguinte formulação:

$$\text{minimize } \sum_t^T \sum_j^J H_j I_{jt} + \sum_l^L \sum_j^J \sum_s^S (CS_{jl} y_{jls} + G_{jl} z_{jls} + P_{jl} x_{jls}) \quad (25)$$

s.a:

$$EI_j + \sum_l^L \sum_s^S x_{jls} = D_{jt} + I_{jt} \quad t = 1, \forall j \in J \quad (26)$$

$$I_{jt-1} + \sum_l^L \sum_s^S x_{jls} = D_{jt} + I_{jt} \quad \forall t \in 2, \dots, T, j \in J \quad (27)$$

$$EI_j + \sum_l^L \sum_s^S \left(\frac{C_l}{A_{jl}}\right) y_{jls} \geq D_{jt} \quad t = 1, \forall j \in J \quad (28)$$

$$I_{jt-1} + \sum_l^L \sum_s^S \left(\frac{C_l}{A_{jl}}\right) y_{jls} \geq D_{jt} \quad \forall t = T, j \in J \quad (29)$$

$$I_{jt} \geq ES_j \quad \forall t \in T, j \in J \quad (30)$$

$$EI_j \geq D_{jk} (1 - \sum_l^L y_{jlk}) \quad \forall k \in 1, \dots, S, j \in T \quad (31)$$

$$I_{jk-1} \geq D_{jk} (1 - \sum_l^L y_{jlk}) \quad \forall k \in 1, \dots, S, j \in T \quad (32)$$

$$\sum_j^J \sum_s^S (A_{jl}x_{jls} + ST_{jl}z_{jls} + SE_{jl}y_{jls}) \leq K_{lt} - \sum_s^S w_{tsl}TM_l \quad \forall t \in T, l \in L \quad (33)$$

$$\sum_{s=1}^{s'} w_{tsl} = 1 \quad t = 1, l = 1 \quad (34)$$

$$\sum_{s=s'+1}^S w_{tsl} = 1 \quad t = 1, l = 2 \quad (35)$$

$$\sum_{s=1}^{s'} w_{tsl} = 1 \quad t = 2, l = 1 \quad (36)$$

$$\sum_{s=s'+1}^S w_{tsl} = 1 \quad t = 2, l = 2 \quad (37)$$

$$x_{jls} \geq LM_{jl}(y_{jls} - y_{jls-1}) \quad \forall t \in T, l \in L, s \in 2, \dots, S \quad (38)$$

$$x_{jls} \leq C_{jl}(y_{jls-1} - y_{jls}) \quad \forall t \in T, l \in L, s \in S \quad (39)$$

$$\sum_j^J A_{jl}x_{jls} + SE_{jl}y_{jls} \leq C_l \quad \forall l \in L, s \in S \quad (40)$$

$$\sum_j^J y_{jls} = 1 \quad \forall l \in L, s \in S \quad (41)$$

$$z_{jls} \geq y_{jls} - y_{jls-1} \quad \forall j \in J, l \in L, s \in 2, \dots, S \quad (42)$$

$$z_{jls} \leq y_{jls} \quad \forall j \in J, l \in L, s \in S \quad (43)$$

$$I_{jt} \geq 0, x_{jls} \in Z, y_{jls} \in \{0,1\}, z_{jls} \geq 0, w_{tsl} \in \{0,1\} \quad (44) (45) (46) (47) (48)$$

O Modelo\_2, assim como o Modelo\_1, busca minimizar custos de produção, estoque, *set-ups* e *changeovers*. No que se refere às restrições, o Modelo\_2 é formado pelas restrições do Modelo\_1 acrescido de novas restrições. As restrições (28) e (29) garantem o atendimento à demanda pela capacidade instalada, restrições (31) e (32) determinam que o estoque restante do período predecessor deva suprir demanda de itens em *microperíodos* subseqüentes até se que inicie a produção do item. Finalmente as restrições (42), (43) determinam a ocorrência de *changeovers* somente se houver a ocorrência de *set-ups* no mesmo período e não ocorrer o *set-up* no período predecessor. As variáveis de estoque  $I_{jt}$  e *changeover*  $z_{jls}$  apresentam domínios  $I_{jt} \geq 0$  e  $z_{jls} \geq 0$  (restrições (45) e (48)). Essa relaxação só é viável devido ao domínio dos dados (inteiros) que compõem os parâmetros e variáveis (binárias) que apresentam estas variáveis no modelo (restrições (27), (28) e restrições (43), (44)).

## 4.6 ANÁLISE DOS DADOS

Este exemplo demonstra uma situação real de planejamento da produção onde 4 tipos diferentes de impressoras devem ser seus lotes simultaneamente dimensionados, alocados e sequenciados em 2 linhas de manufatura. Os resultados propostos são comparados com a atual estratégia de planejamento de produção da empresa estudada.

Os dados apresentados foram coletados com engenheiros, gerentes e técnicos responsáveis pelo planejamento da produção. Por questões de sigilo e ética, todos os custos apresentados foram multiplicados por uma constante  $\sigma$  mantendo-se, portanto, a proporcionalidade e representatividade dos dados originais.

O tempo unitário de produção (Tabela 1) foi obtido através da análise da capacidade nominal de cada linha de manufatura multiplicada pela taxa de produtividade em cada linha. A linha 1 apresenta produtividade média de 72% enquanto que a linha 2 apresenta produtividade média de 75%. Esta taxa foi obtida através da análise histórica de produtividade real. Como o desvio padrão das produtividades históricas corresponde a menos de 5% da média, considerou-se a produtividade média por linha de manufatura.

<b>Tempo unit. (min.)</b>	Linha 1	Linha 2
Impressora 1	0,55	0,49
Impressora 2	0,53	0,46
Impressora 3	0,35	0,39
Impressora 4	0,45	0,47

**Tabela 1** Tempo unitário de produção da impressora tipo  $j$  na linha  $l$

Como a empresa estudada não apresenta os custos de estocagem de forma detalhada, estima-se aqui o custo unitário de estocagem (Tabela 3) como sendo aproximadamente 5% dos custos unitários de fabricação (Tabela 2).

<b>Custo unit. (US)</b>	Linha 1	Linha 2
Impressora 1	100	110
Impressora 2	90	95
Impressora 3	70	65
Impressora 4	75	70

**Tabela 2** Custo unitário de produção da impressora tipo  $j$  na linha  $l$

<b>Custo unit. Estocagem (US)</b>	
Impressora 1	5
Impressora 2	5
Impressora 3	3
Impressora 4	4

**Tabela 3** Custo unitário de estocagem da impressora tipo  $j$  de um *macro período* para outro

O *set-up* ocorre ao finalizar um turno de produção. Dessa forma, é necessário um tempo para esvaziar sobras de matéria prima da bancada de produção e organizar ferramentas e máquinas em cada linha. Por outro lado, o *changeover* é o tempo necessário para reconfiguração de linha para troca de tipos de impressora. Como a quantidade e tipo de matéria prima se diferenciam de um tipo de impressora para outro, o tempo de *set-up* (Tabela 4) e *changeover* (Tabela 6) também se diferenciam. Ocorrências de *set-ups* e *changeovers* reduzem a capacidade total disponível para produção no período.

<b>Tempo <i>set-up</i>. (min.)</b>	Linha 1	Linha 2
Impressora 1	30	20
Impressora 2	20	25
Impressora 3	25	30
Impressora 4	22	20

**Tabela 4** Tempo de *set-up* da impressora tipo *j* na linha *l*

O custo de *set-up* (Tabela 5) foi estimado como sendo o custo de oportunidade de produzir impressoras por um período proporcional ao tempo de *set-up*. Esta também é a forma de custeio que a empresa utiliza para estimar seus custos de *changeover* (Tabela 7).

<b>Custo <i>set-up</i>. (US\$)</b>	Linha 1	Linha 2
Impressora 1	7.234,36	8.910,00
Impressora 2	6.816,12	8.312,50
Impressora 3	7.973,52	6.662,50
Impressora 4	6.616,80	5.950,00

**Tabela 5** Custo de *set-up* da impressora tipo *j* na linha *l*

<b><i>Changeover</i> (min.)</b>	Linha 1	Linha 2
Impressora 1	200	220
Impressora 2	180	200
Impressora 3	160	180
Impressora 4	180	200

**Tabela 6** Tempo de *changeover* da impressora tipo *j* na linha *l*

O *changeover* é a troca de um tipo de impressora para outro tipo na mesma linha de manufatura. Dessa forma, são necessárias atividades de esvaziamento da bancada, troca de máquinas de manufatura (chamadas gigas de manufatura) e enchimento das bancadas com as matérias-primas necessárias à produção de determinado produto. O procedimento de estimativa de custeio do *changeover* é o mesmo do *set-up*.

<b>Custo <i>changeover</i></b> <b>(US)</b>	Linha 1	Linha 2
Impressora 1	21.703,09	26.730,00
Impressora 2	20.448,36	24.937,50
Impressora 3	23.920,56	19.987,50
Impressora 4	19.850,40	17.850,00

**Tabela 7** Custo de *changeover* da impressora tipo *j* na linha *l*

Os dados de demanda (Tabela 8) apresentam os pedidos acordados pela empresa cliente à fabricante de produtos eletroeletrônicos que se está sendo analisada. Estas estimativas não foram completamente cumpridas no plano atual. A comparação do resultado do modelo com o atual cenário pode ser vista com mais detalhes no tópico 4.9.

<b>Demanda (unid.)</b>	Período 1	Período 2
Impressora 1	15.000	10.000
Impressora 2	14.000	15.000
Impressora 3	13.300	19.000
Impressora 4	13.500	15.000

**Tabela 8** Demanda agregada da impressora tipo *j* no *macro período t*

Os dados de capacidade no *micro período* (Tabela 9) foram ajustados através da multiplicação da produtividade real pela capacidade nominal de cada linha de manufatura.

	Linha 1	Linha 2
<b>Capacidade: (min/turno)</b>	306	281

**Tabela 9** Capacidade disponível para a produção de impressora na linha *l* por *micro período*

A capacidade do *macro-período* (Tabela 10) foi ajustada levando em consideração os tempos previstos para manutenção preventiva. A manutenção das linhas de manufatura demanda tempos diferenciados por linha. Isso faz com que a capacidade disponível por linha e *macro período* seja diferenciada de um período para o outro.

<b>Capacidade:</b> <b>(Min/mês)</b>	Período 1	Período 2
--	-----------	-----------

Linha 1	18526	18586
Linha 2	18556	18526

**Tabela 10** Capacidade disponível para a linha  $l$  no *macro período*  $t$

O lote mínimo de produção (Tabela 11) é uma estratégia utilizada pela empresa para se valer do conceito de economia de escala. Esta restrição faz com que a ativação de uma linha possa ser recompensada por uma produção mínima.

<b>Lote mínimo (unid.)</b>	Linha 1	Linha 2
Impressora 1	100	200
Impressora 2	200	100
Impressora 3	200	100
Impressora 4	100	100

**Tabela 11** Lote mínimo de produção para a impressora tipo  $j$  na linha  $l$

O estoque no início do horizonte de planejamento (Tabela 12) é determinado como uma quantidade proporcional a 2 semanas de produção. No entanto, a empresa não mantém este nível de estoque de segurança como estratégia de redução de custos. Dessa forma, aloca-se à qualidade do planejamento a responsabilidade de atendimento da demanda dentro do prazo previsto. Assim, este modelo considera o valor real dos estoques iniciais como parâmetros de entrada.

<b>Estoque inicial (unid)</b>	
Impressora 1	5626
Impressora 2	6359
Impressora 3	4604
Impressora 4	4056

**Tabela 12** Estoque inicial da impressora tipo  $j$  no início do planejamento

O estoque de segurança (Tabela 13) previne que pedidos de última hora, ou alterações dos pedidos possam levar ao não atendimento da demanda e comprometer a imagem da empresa.

<b>Estoque de segurança (unid)</b>	
Impressora 1	1500
Impressora 2	1430
Impressora 3	1510
Impressora 4	1620

**Tabela 13** Estoque de segurança para a impressora tipo  $j$

O tempo médio de manutenção preventiva por linha (Tabela 14) é um parâmetro que reduz a capacidade disponível de produção nos *micros-períodos* em linhas de manufatura; no entanto, este deve ser considerado para permitir o planejamento dentro dos reais limites disponíveis.

	Linha 1	Linha 2
<b>Tempo de Manutenção (min):</b>	90	120

**Tabela 14** Tempo de manutenção preventiva para a linha  $l$

## 4.7 RESULTADOS OBTIDOS

Apresenta-se nesse tópico o tamanho e alocação ótima de lotes nas linhas de manufatura determinados pelo modelo de dimensionamento de lotes e sequenciamento simultâneos em máquinas paralelas. O plano de produção se apresenta dentro da capacidade, ou seja, descontando-se tempos de *set-ups*, *changeovers* e tempos de manutenção preventiva. Ao final obtém-se o custo mínimo de fabricação.

O resultado fornece um plano integrado de produção e relaciona decisões de nível tático, (como por exemplo, o quanto produzir e estocar em cada mês) e nível operacional (como por exemplo, qual o tamanho de lote e sequência destes nas linhas de manufatura de impressoras).

Foram realizados testes computacionais considerando o *micro período* como sendo um período equivalente a um turno de produção, ou seja, 6 horas. Como a fábrica funciona em 2 turnos por dia de segunda a sábado, tem-se 12 turnos por semana. O mês é considerado como tendo 48 turnos. O modelo, portanto, busca determinar o planejamento de 2 meses de produção, ou seja, 96 turnos.

Por não ter o caráter de urgência, a manutenção preventiva não é estipulada em dia e horários fixos. Determina-se, portanto, o intervalo de tempo que a manutenção deve ser realizada. No exemplo em questão, são considerados os intervalos do turno 1 ( $s = 1$ ) ao turno 23 ( $s = 23$ ) e do turno 24 ( $s + 1 = 24$ ) ao turno 48 ( $s = S$ ). Essa relação é apresentada nas restrições (35), (36), (37) e (38). Cabe ao modelo alocar o melhor momento de manutenção preventiva durante o horizonte de planejamento de forma que haja a menor intervenção possível na produção.

As Tabelas 15 e 16 apresentam o plano *macro* de produção dos 2 meses. Este plano considera os dados de estoque inicial e demanda. Apresentam-se aqui a quantidade agregada a ser produzida por tipo de impressora e a quantidade estocada, respeitando o estoque de segurança por produto ao longo do mês.

<b>MÊS 1</b>				
(unidades)	<b>Estoque Inicial</b>	<b>Produção</b>	<b>Demanda</b>	<b>Estoque Final</b>
<b>Impressora 1</b>	5626	10874	15000	1500
<b>Impressora 2</b>	6359	12036	14000	4395
<b>Impressora 3</b>	4604	14603	13300	5907
<b>Impressora 4</b>	4056	13032	13500	3588

**Tabela 15** Plano macro de produção para o mês 1

<b>MÊS 2</b>				
(unidades)	<b>Estoque Inicial</b>	<b>Produção</b>	<b>Demanda</b>	<b>Estoque Final</b>
<b>Impressora 1</b>	1500	10874	10000	2374
<b>Impressora 2</b>	4395	12036	15000	1431
<b>Impressora 3</b>	5907	14603	19000	1510
<b>Impressora 4</b>	3588	13032	15000	1620

**Tabela 16** Plano macro de produção para o mês 2

O plano agregado é detalhado a nível operacional nas tabelas 17 e 18. Apresentam-se aqui tanto decisões de alocação e sequência de produção de impressoras nas linhas de manufatura (Tabela 19), como também decisões de dimensionamento dos lotes de produção respeitando a capacidade limitada.

MÊS 1		Linha 1		Linha 2		
		Impressora	Qde (unid)	Impressora	Qde (unid)	
Semana 1	Segunda feira	<i>turno 1</i>	1 **	306	2	130
		<i>turno 2</i>	1	501	2	-
	Terça feira	<i>turno 1</i>	1	501	2 e 3 *	281 e 281
		<i>turno 2</i>	1	501	3	562
	Quarta feira	<i>turno 1</i>	1	501	3	562
		<i>turno 2</i>	1	501	3	562
	Quinta feira	<i>turno 1</i>	1	501	3	562
		<i>turno 2</i>	1	501	3	562
	Sexta feira	<i>turno 1</i>	1	501	3	562
		<i>turno 2</i>	1	242	3	562
	Sábado	<i>turno 1</i>	1	501	3	562
		<i>turno 2</i>	1	501	3	562
Semana 2	Segunda feira	<i>turno 1</i>	1	501	3	562
		<i>turno 2</i>	1	501	3	562
	Terça feira	<i>turno 1</i>	1	501	3	562
		<i>turno 2</i>	1	501	3	562
	Quarta feira	<i>turno 1</i>	1	501	3	562
		<i>turno 2</i>	1	501	3	562
	Quinta feira	<i>turno 1</i>	1	501	3	562
		<i>turno 2</i>	1	501	3	562
	Sexta feira	<i>turno 1</i>	1	501	3	562
		<i>turno 2</i>	1	501	3	562
	Sábado	<i>turno 1</i>	1 e 4 *	306 e 257	3	562
		<i>turno 2</i>	4	612	3 **	562
Semana 3	Segunda feira	<i>turno 1</i>	4	450	3	562
		<i>turno 2</i>	4	612	3	562
	Terça feira	<i>turno 1</i>	4 e 2 *	275 e 306	3	562
		<i>turno 2</i>	2	539	3	562
	Quarta feira	<i>turno 1</i>	2	539	3 e 4 *	272 e 281
		<i>turno 2</i>	2	539	4	555
	Quinta feira	<i>turno 1</i>	2	539	4	555
		<i>turno 2</i>	2	539	4	555
	Sexta feira	<i>turno 1</i>	2	539	4	555
		<i>turno 2</i>	2	539	4	555
	Sábado	<i>turno 1</i>	2	539	4	555
		<i>turno 2</i>	2	539	4	555
Semana 4	Segunda feira	<i>turno 1</i>	2	539	4	555
		<i>turno 2</i>	2	539	4	555

Terça feira	<i>turno 1</i>	2	539	4	555
	<i>turno 2</i>	2	539	4	555
Quarta feira	<i>turno 1</i>	2	539	4	555
	<i>turno 2</i>	2	539	4	555
Quinta feira	<i>turno 1</i>	2	539	4	555
	<i>turno 2</i>	2	539	4	555
Sexta feira	<i>turno 1</i>	2	539	4	555
	<i>turno 2</i>	2	539	4	555
Sábado	<i>turno 1</i>	2	539	4	555
	<i>turno 2</i>	2	539	4	555

Tabela 17 Plano e sequência de produção detalhados para o mês 1

MÊS 2			Linha 1		Linha 2		
			Impressora	Qde (unid)	Impressora	Qde (unid)	
Semana 1	Segunda feira	<i>turno 1</i>	1 **	306	2	130	
		<i>turno 2</i>	1	501	2	-	
	Terça feira	<i>turno 1</i>	1	501	2 e 3 *	281 e 281	
		<i>turno 2</i>	1	501	3	562	
	Quarta feira	<i>turno 1</i>	1	501	3	562	
		<i>turno 2</i>	1	501	3	562	
	Quinta feira	<i>turno 1</i>	1	501	3	562	
		<i>turno 2</i>	1	501	3	562	
	Sexta feira	<i>turno 1</i>	1	501	3	562	
		<i>turno 2</i>	1	242	3	562	
	Sábado	<i>turno 1</i>	1	501	3	562	
		<i>turno 2</i>	1	501	3	562	
	Semana 2	Segunda feira	<i>turno 1</i>	1	501	3	562
			<i>turno 2</i>	1	501	3	562
Terça feira		<i>turno 1</i>	1	501	3	562	
		<i>turno 2</i>	1	501	3	562	
Quarta feira		<i>turno 1</i>	1	501	3	562	
		<i>turno 2</i>	1	501	3	562	
Quinta feira		<i>turno 1</i>	1	501	3	562	
		<i>turno 2</i>	1	501	3	562	
Sexta feira		<i>turno 1</i>	1	501	3	562	
		<i>turno 2</i>	1	501	3	562	
Sábado		<i>turno 1</i>	1 e 4 *	306 e 257	3	562	
		<i>turno 2</i>	4	612	3 **	562	
ma na		Segunda feira	<i>turno 1</i>	4	450	3	562

	<i>turno 2</i>	4	612	3	562	
Terça feira	<i>turno 1</i>	4 e 2 *	275 e 306	3	562	
	<i>turno 2</i>	2	539	3	562	
Quarta feira	<i>turno 1</i>	2	539	3 e 4 *	272 e 281	
	<i>turno 2</i>	2	539	4	555	
Quinta feira	<i>turno 1</i>	2	539	4	555	
	<i>turno 2</i>	2	539	4	555	
Sexta feira	<i>turno 1</i>	2	539	4	555	
	<i>turno 2</i>	2	539	4	555	
Sábado	<i>turno 1</i>	2	539	4	555	
	<i>turno 2</i>	2	539	4	555	
Semana 4	Segunda feira	<i>turno 1</i>	2	539	4	555
		<i>turno 2</i>	2	539	4	555
	Terça feira	<i>turno 1</i>	2	539	4	555
		<i>turno 2</i>	2	539	4	555
	Quarta feira	<i>turno 1</i>	2	539	4	555
		<i>turno 2</i>	2	539	4	555
	Quinta feira	<i>turno 1</i>	2	539	4	555
		<i>turno 2</i>	2	539	4	555
	Sexta feira	<i>turno 1</i>	2	539	4	555
		<i>turno 2</i>	2	539	4	555
	Sábado	<i>turno 1</i>	2	539	4	555
		<i>turno 2</i>	2	539	4	555

\* *Changeover*\*\* *Manutenção preventiva*

Tabela 18 Plano e sequência de produção detalhados para o mês 2

SEQUÊNCIA DE PRODUÇÃO	
MÊS 1	<b>Linha 1:</b> Produto 1 - Produto 4 - Produto 2
	<b>Linha 2:</b> Produto 2 - Produto 3 - Produto 4
MÊS 2	<b>Linha 1:</b> Produto 1 - Produto 4 - Produto 2
	<b>Linha 2:</b> Produto 2 - Produto 3 - Produto 4

Tabela 19 Sequência de produção nas linhas de manufatura

## 4.8 LIMITES COMPUTACIONAIS DO MODELO

O Modelo\_1 apresenta 1340 restrições e 1146 variáveis (Tabela 20). Este foi executado por 2236 segundos e apresentou gap final de 0,01%. Após a inserção das desigualdades e restrições

reformuladas, o Modelo\_2 apresentou 2080 restrições e 1131 variáveis e pôde ser resolvido otimamente em 44,4 segundos. O problema foi resolvido em um Pentium 4 com processador Intel de 3,2 GHz, 2 GB de memória RAM e sistema operacional Windows XP 2002, utilizando o aplicativo XPRESS versão 2008.

<b>Desempenho dos modelos - 4 tipos de impressoras - 2 linhas de manufatura - Variação: Turnos</b>					
<b>Modelo</b>	<b>Nº de turnos</b>	<b>Restrições</b>	<b>Variáveis</b>	<b>Gap final</b>	<b>Tempo Computacional (seg.)</b>
Modelo_1	48	1340	1146	0,01%	2236
Modelo_1	47	1312	1122	0,13%	3600
Modelo_1	46	1284	1098	0,52%	3600
Modelo_1	45	1256	1074	0,47%	3600
Modelo_2	48	2080	1131	0,00%	44,4
Modelo_2	47	2036	1107	0,00%	2334
Modelo_2	46	1992	1083	3,09%	3600
Modelo_2	45	1948	1059	4,16%	3600

**Tabela 20** Análise dos modelos para 4 tipos de impressoras, 2 linhas de manufatura

Para demonstrar o desempenho do modelo de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção foram feitas várias simulações e variações do número de impressoras e *microperiodos* para a medição do tempo computacional. Essa análise também foi motivada pela empresa, que estuda a possibilidade de expandir sua capacidade produtiva ao inserir uma nova linha de manufatura de impressoras. Além da necessidade de aumento de capacidade, existe a possibilidade de se fabricar um novo tipo de impressora.

Portanto, foi realizada uma análise de sensibilidade contemplando estas questões estratégicas. Foram feitos testes computacionais com o Modelo\_1 e Modelo\_2 em cenários diversos (Tabelas 21 e 22). O objetivo foi analisar o desempenho dos modelos sob condições de planejamento em tempos limitados. As análises foram conduzidas em situações de redução do número de turnos (de 48 a 45) no mês, limitando o tempo disponível para produção. Essa análise se estendeu às situações de inserção de uma nova linha de manufatura e inserção de um ou dois novos tipos de impressoras.

Como não existem dados disponíveis sobre taxa de produção de uma possível nova linha, os parâmetros de produtividade, *set-up*, *changeover*, entre outros foram considerados semelhantes à da linha mais nova, por esta apresentar tecnologia mais recente.

<b>Desempenho dos modelos - 5 tipos de impressoras - 3 linhas de manufatura - Variação: Turnos</b>					
<b>Modelo</b>	<b>Nº de turnos</b>	<b>Restrições</b>	<b>Variáveis</b>	<b>Gap final</b>	<b>Tempo Computacional (seg.)</b>
Modelo_1	48	2438	2147	0,04%	3600
Modelo_1	47	2387	2102	0,03%	3600
Modelo_1	46	2336	2057	0,04%	3600
Modelo_1	45	2285	2012	0,00%	1393
Modelo_2	48	3865	2150	0,00%	176,8
Modelo_2	47	3784	2105	0,00%	198,5
Modelo_2	46	3703	2060	0,00%	313,2
Modelo_2	45	3622	2015	0,00%	112,5

**Tabela 21** Análise dos modelos para 5 tipos de impressoras, 3 linhas de manufatura

<b>Desempenho dos modelos - 6 tipos de impressoras - 3 linhas de manufatura - Variação: Turnos</b>					
<b>Modelo</b>	<b>Nº de turnos</b>	<b>Restrições</b>	<b>Variáveis</b>	<b>Gap final</b>	<b>Tempo Computacional (seg.)</b>
Modelo_1	48	2871	2580	0,05%	3600
Modelo_1	47	2811	2526	0,07%	3600
Modelo_1	46	2751	2472	0,12%	3600
Modelo_1	45	2691	2418	0,53%	3600
Modelo_2	48	4579	2580	0,15%	3600
Modelo_2	47	4483	2526	0,36%	3600
Modelo_2	46	4387	2472	4,93%	3600
Modelo_2	45	4291	2418	11,06%	3600

**Tabela 22** Análise dos modelos para 6 tipos de impressoras, 3 linhas de manufatura

## 4.9 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O plano resultante ao ser comparado com a prática atual (Tabela 23) evidencia melhorias em redução de custos e aumento relativo de produtividade por tipo de impressora. Este plano de produção apresenta melhor qualidade de planejamento, pois reduz a zero o número de atrasos de pedidos.

O sistema produtivo atual penaliza muito a ocorrência de *changeovers*, evitando ao máximo a ocorrência deste. Isso pode ser observado no histórico de produção, onde alguns tipos de impressoras são fabricados em quantidades maiores que a demanda, enquanto que outros tipos “menos importantes financeiramente” têm a produção limitada ou até nula.

O modelo matemático apresenta resultado semelhante à prática atual no que diz respeito ao uso escasso de *changeovers*. Essa estratégia é justificada ao se buscar um plano de produção ao

menor custo possível. Dessa forma, apresenta-se o mínimo de *changeovers* necessários para que a produção atenda à demanda mensal dentro dos prazos estipulados.

<b>Produção Hist.</b>	Período 1	Período 2	Período 3
Impressora 1	24300	40370	16500
Impressora 2	14300	18300	13660
Impressora 3	11200	0	4400
Impressora 4	0	9200	14300
<b>Total</b>	<b>49800</b>	<b>67870</b>	<b>48860</b>

**Tabela 23** Produção histórica das impressoras nos últimos 3 meses

O novo plano de produção apresenta um aumento médio de 3,29% de produtividade proveniente do atendimento da demanda mensal por todos os produtos. Isso leva ao aumento da receita mensal necessária para cobrir o aumento dos custos de produção.

Uma atenção especial deve ser dada ao controle de desempenho das atividades em relação ao plano. Deve-se ter um conhecimento profundo da importância de acompanhamento real do plano indicado no modelo para se ter as vantagens competitivas apresentadas pela implantação deste. Assim, o plano de produção deve ser transparente e com objetivos claros de expectativas para permitir o controle dos resultados. Para a gerência, isso implica em ampla disseminação do plano.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES

Esta dissertação apresentou um problema de dimensionamento de lotes e sequenciamento para modelar o planejamento produção de quatro tipos de impressoras em duas linhas não idênticas de manufatura em uma empresa EMS. A capacidade disponível para produção não é constante, sendo diferenciada de um período para o outro pela dedução de tempos de *changeover* e manutenção preventiva. O *backlogging* não é permitido, ou seja, a demanda deve ser atendida no prazo.

O processo de manufatura foi modelado pelo problema de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção por se perceber a importância do problema e se verificar ganhos de

eficiência ao tratar problemas complexos simultaneamente. O modelo adotado (Modelo\_2) é composto por 2080 variáveis e 1131 restrições e abrange o horizonte de planejamento de 96 turnos dispostos em um horizonte de 2 meses e determina, além de quanto e quando produzir de cada lote, a melhor sequência e alocação destes lotes nas linhas de manufatura.

A adição de desigualdades e restrições reformuladas ao Modelo\_1 foi auxiliada pela estratégia de classificação de problemas de dimensionamento de lotes multi-item apresentado em Wolsey [40].

O plano resultante foi apresentado e comparado com a prática atual. Melhorias em produtividade e redução de custos foram evidenciadas. Além de aumentar a qualidade de planejamento, o novo plano de produção reduz a zero o número de atrasos de pedidos. O controle permanente e contínuo do plano de produção é vital na implantação prática deste.

Este modelo deve ser usado em um plano de horizonte rolante para permitir mais acurácia de planejamento na evolução dos períodos. O objetivo de desenvolver boas formulações matemáticas foi permitir que este problema, considerado complexo, possa ser resolvido por otimizadores de mercado baseados em programação matemática. No caso de planejamento da produção, o modelo de otimização permite a geração de vários cenários através da alteração da estrutura de dados. Isto é de importância estratégica a gerentes de produção que necessitam entender o comportamento do sistema produtivo à medida que a realidade muda.

Recomenda-se como evolução deste trabalho o desenvolvimento de um aplicativo com interface gráfica para o usuário, o que é estratégico para a empresa, pois permite que gestores de planejamento possam utilizar a ferramenta de forma satisfatória. Um sistema de planejamento da produção é vantajoso, uma vez que auxilia a produção a responder questões relacionadas à: decisão relativa à instalação ou não de novos equipamentos em linhas de manufatura, levando em consideração as capacidades instaladas; decisões relativas à ativação ou não de linhas; decisões sobre o acúmulo ou não de estoques para se fazer mudanças estruturais; decisões sobre o quanto e quando produzir, estocar, além de se permitir que se façam análises de sensibilidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AZEVEDO, A. A. Otimização da manutenção preventiva em linhas de montagem: um estudo de caso em uma empresa de manufatura contratada do setor eletroeletrônico. **Dissertação de mestrado, n.161, Universidade Federal de Minas Gerais**. 2006, ([www.dep.ufmg.br/pos/defesas/diss161.pdf](http://www.dep.ufmg.br/pos/defesas/diss161.pdf)).
- [2] ABSI, N., SIDHOUM, S. K. The multi-item capacitated lot-sizing problem with *set-up* times and shortage costs, **European Journal of Operational Research**. 2006,185, 1351-1374.
- [3] ANILY, S.; TZUR, M.; WOLSEY, L. A. Multi-item lot-sizing with joint set-up costs. **Mathematical Programming**, 2007.
- [4] ARENALES, M., ARMENTANO, V., MORABITO, R., YANESSE, H. **Pesquisa Operacional para cursos de engenharia**, Elsevier, São Paulo, 2006, p. 523.
- [5] BELL, P. C.; ANDERSON, C. K. In search of strategic operations research / management science. **Interfaces**, 2002, v.32, p.28-40.
- [6] BELVAUX, G., WOLSEY, L. Modeling practical lot-sizing problems as mixed-integer programs. **Management Science**, 2001, v.47, p.993-1007.
- [7] BITRAN, G. R.; YANASSE, H. H. Computational complexity of the capacitated lot size problem. **Management Science**, 1982, v.28, p.1174-1186.
- [8] BRAHIMI, N., DAUZERE-PERES, S., NAJID, N. M., NORDLI, A. Single item lot sizing problems, **European Journal of Operational Research**. 2006, v.168, p.1-16.
- [9] BROWN, G.; KEEGAN, J.; VIGUS, B.; WOOD, K. The Kellogg Company optimizes production, inventory and distribution. **Interfaces**, 2001, v.31, p.1-15.
- [10] CHEN, K.; JI, P. A mixed integer programming model for advanced planning and scheduling (APS). **European Journal of Operational Research**, 2007, v.181, p.515-522.
- [11] CONSTANTINO, M. A polyhedral approach to a production planning problem. **Annals of Operations Research**, 2000, v.96, p.75-95.
- [12] DAUZÈRE-PÉRES, S.; LASSERRE, J. B. Integration of lot-sizing and scheduling decision in a job-shop. **European Journal of Operational Research**, 1994, v.75, p.413-426.
- [13] DREXL, A., KIMMS, A. Lot-sizing and scheduling - Survey and extensions. **European Journal of Operations Research**, 1997, v.99, p.221-235.

- [14] ELMAGHRABY, S. E. The economic lot scheduling problem (ELSP): Review and extensions. *Management Science*, 1978, v.24, n.6, p.587-598.
- [15] FLEISCHMANN, B.; FERBER, S.; HENRICH, P. Strategic planning of BMW's global production network. *Interfaces*, 2006, v. 36, p.194-208.
- [16] GUÉRET, C.; PRINS, C.; SEVAUX, M. **Applications of optimization with Xpress-MP**. Dash Optimization Ltd, 2007.
- [17] GUPTA, D., MAGNUSSON, T. The capacitated lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent *set-up* times. *Computers & Operations Research*, 2005, v.32, p.727-747.
- [18] JORDAN, C.; DREXL, A. Discrete lot-sizing and scheduling by batch sequencing. *Management Science*, 1998, v.44, p.698-713.
- [19] KARMARKAR, U. S.; SCHRAGE, L. The deterministic dynamic product cycling problem. *Operations Research*, 1985, v.33, p.326-344.
- [20] LASSERRE, J. B. An integrated model for job-shop planning and scheduling. *Management Science*, 1992, v.38, p.1201-1206.
- [21] LOBO, B. A., KLABJAN, D., CARRAVILLA, M. A., OLIVEIRA, J. F. Single machine multi-product capacitated lot sizing with sequence-dependent *set-ups*. *International Journal of Production Research*, 2007, v.45, p.4873-4894.
- [22] LOBO, B. A., OLIVEIRA, J. F., CARRAVILLA, M. A. A note on “the capacitated lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent *set-up* times. *Computers & Operations Research*, 2008, v.35, p.1374-1376.
- [23] MARINELLI, F.; NENNI, M. E.; SFORZA, A. Capacitated lot-sizing and scheduling with parallel machines and shared buffers: A case study in packaging company. *Annals of Operations Research*, 2007, v.150, p.177-192.
- [24] MEYR, H. Simultaneous lot-sizing and scheduling on parallel machines, *European Journal of Operational Research*, 2002, v.139, p.277-292.
- [25] MEZA, E. S., SANTOS, M. O., ARENALES, M. N. A lot-sizing problem in an automated foundry. *European Journal of Operational Research*, 2002, v.139, 490-500.
- [26] PINEDO, M. L. **Planning and Scheduling in Manufacturing and Services**. Springer, USA, 2005.

- [27] POCHET, Y., WOLSEY. L. A. **Production Planning by Mixed Integer Programming**. Springer, USA, 2006.
- [28] RODRIGUES, I. A. Implementação de técnicas da produção enxuta numa empresa de manufatura contratada do setor eletroeletrônico. **Dissertação de mestrado, n.155, Universidade Federal de Minas Gerais**, 2006, ([www.dep.ufmg.br/pos/defesas/diss155.pdf](http://www.dep.ufmg.br/pos/defesas/diss155.pdf)).
- [29] ROGERS, J. A computational approach to the economic lot scheduling problem. **Management Science**, 1958, p. 264-291.
- [30] SALOMON, M.; SOLOMON, M. M.; VAN WASSEHOF, L. N.; DUMAS, Y. DAUZÈRE-PÉRÈS, S. Solving the discrete lot-sizing and scheduling problem with sequence dependent set-up costs and set-up times using the travelling salesman problem with time windows. **European Journal of Operational Research**, 1997, v.100, p.494 -513.
- [31] SANTOS, A. M. Dimensionamento de lote de produção em um problema de sequenciamento de uma máquina com tempo de preparação: aplicação a uma indústria química. **Dissertação de mestrado, n.157, Universidade Federal de Minas Gerais**, 2006, ([www.dep.ufmg.br/pos/defesas/diss157.pdf](http://www.dep.ufmg.br/pos/defesas/diss157.pdf))
- [32] SOUZA, M. C., CASTRO, A. C. Modelos matemáticos para atendimento a demanda e dimensionamento de lotes em sistemas de produção ininterrupta. **Anais do XXVIII SBPO**, 2006, p.123- 130.
- [33] TOLEDO, C. F. M., FRANÇA, P. M., MORABITO, R., KIMMS, A. Um modelo de otimização para o problema de dimensionamento de lotes e programação da produção em fábricas de refrigerantes. **Pesquisa Operacional**, 2007, 27, p.155-186.
- [34] TOSO, E. A. V., MORABITO, R. Otimização no dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção: estudo de caso em uma fábrica de rações. **Gestão e Produção**, 2005, v.12, 203-217.
- [35] VAN EIJL, C. A.; VAN HOESEL, C. P. M. On discrete lot-sizing and scheduling problem with Wagner-Within costs. **Operations Research Letters**, 1997, v.20, p.7-13.
- [36] VAN HOESEL, S.; KOLEN, A. A linear description of the discrete lot-sizing and scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, 1994, v.75, p.342-353.
- [37] VOLLMAN, T. E.; BERRY, W. L.; WHYBARK, D. C. **Manufacturing Planning and Control Systems**, McGraw-Hill, 1997.
- [38] WAGNER, H. M, WHITIN, T. M. Dynamic version of economic lot size model. **Management Science**, 1958, 5, 89-94.

- [39] WOLSEY, L. A. MIP modeling of changeovers in production planning and scheduling problems. **European Journal of Operational Research**, 1997, v.99, 1544-1565.
- [40] WOLSEY, L. A. Solving Multi-Item Lot-sizing problems with MIP Solver using classification and reformulation. **Management Science**, 2002, v.12, p.1587 a 1602.