

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

BRUNO LOSCHI CEOLIN

**MODELO DE PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO COM OTIMIZAÇÃO  
DO CUSTO TOTAL DE ATENDIMENTO À DEMANDA EM UMA  
FÁBRICA DE COMPONENTES INJETADOS**

CURITIBA

2018

BRUNO LOSCHI CEOLIN

**MODELO DE PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO COM OTIMIZAÇÃO  
DO CUSTO TOTAL DE ATENDIMENTO À DEMANDA EM UMA  
FÁBRICA DE COMPONENTES INJETADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do grau de “Mestre em Ciências” - Área de concentração em Engenharia de Automação e Sistemas, Linha de Pesquisa em Otimização de Sistemas.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Magatão

CURITIBA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

---

Ceolin, Bruno Loschi

Modelo de planejamento da produção com otimização do custo total de atendimento em uma fábrica de componentes injetados [recurso eletrônico] / Bruno Loschi Ceolin.-- 2018.

1 arquivo texto (93 f.): PDF; 1,83 MB

Modo de acesso: World Wide Web.

Título extraído da tela de título (visualizado em 14 fev. 2018)

Texto em português com resumo em inglês

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 2018

Bibliografia: f. 86-91

1. Engenharia elétrica - Dissertações. 2. Programação linear. 3. Planejamento da produção. 4. Moldagem por injeção de plástico - Produção. 5. Moldagem por injeção de plástico - Programação linear. 6. Programação estocástica. 7. Planejamento da produção - Modelos matemáticos. I. Magatão, Leandro. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. III. Título.

CDD: Ed. 23 – 621.3

---

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba  
Bibliotecário: Adriano Lopes CRB-9/1429



**Ministério da Educação**  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
**Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação**

### **TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº 816**

A Dissertação de Mestrado intitulada “**Modelo de Planejamento da Produção com Otimização do Custo Total de Atendimento em Uma Fábrica de Componentes Injetados**” defendida em sessão pública pelo(a) candidato(a) **Bruno Loschi Ceolin**, no dia 18 de dezembro de 2018, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Ciências, área de concentração Engenharia de Automação e Sistemas, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial.

BANCA EXAMINADORA:

Prof(a). Dr(a). Leandro Magatão - Presidente (UTFPR)

Prof(a). Dr(a). Marcelo Gechele Cleto - (UFPR)

Prof(a). Dr(a). Ricardo Lüders - (UTFPR)

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, 18 de dezembro de 2018.

*“A melhor coisa na vida para mim não custa dinheiro. É bastante óbvio que o recurso mais precioso que todos temos é o tempo”*  
*Steve Jobs*

## RESUMO

A presente dissertação aborda um problema de programação de produção em uma empresa de componentes moldados por injeção plástica. Propõe-se um modelo matemático em Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para resolver o dimensionamento de lotes e o sequenciamento da produção, considerando-se os custos de produção, *backlogging* (atrasos de entrega) e *setup*. Este modelo desenvolvido teve por base o modelo em PLIM proposto na literatura no qual foram incluídos uma série de parâmetros e variáveis para tornar a representação do modelo a mais próxima possível das condições operacionais do chão de fábrica. Realizou-se um estudo de caso baseado em dados reais de uma empresa, o qual envolveu um conjunto de sete peças fabricadas, as quais podem ser injetadas em três máquinas, sendo duas de 450 toneladas e uma de 380 toneladas de capacidade. Adicionalmente, realizou-se um estudo de escalabilidade do modelo matemático com o objetivo de entender quais são os seus limites computacionais em relação a tempo de execução. A partir da implementação e resolução computacional do modelo matemático proposto para o caso prático estudado, os resultados obtidos mostram uma possibilidade de redução no tempo total gasto com a fabricação das peças, aliado a uma diminuição de custos de produção.

**Palavras chave:** Produtos Injetados, Planejamento da Produção, Programação Linear Inteira Mista.

## **ABSTRACT**

The presented master dissertation addresses a production planning problem in a plastic injection molding products company. A mathematical model in Mixed Integer Linear Programming (MILP) is proposed to solve the lot sizing and production sequencing, considering the costs of production, backlogging, and setup. This model was based on the MILP model proposed by Dastidar and Nagi (2005), but a series of parameters and variables were included to better represent the operational conditions. A case study was carried out based on real company data, which involved the set of seven main manufactured parts, which are injected into two machines of 450 tons and one of 380 tons capacity. In addition, computational experiments are conducted to show the model scalability with different parameters. From the implementation and computational resolution of the proposed mathematical model for the practical case, the obtained results show a possibility of reduction in the total time spent with the manufacturing of products, together with a reduction of productive costs.

**Key-words:** Injection Molding Products, Production Planning, Mixed Integer Linear Programming.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ciclo de Moldagem por Injeção .....	20
Figura 2 – Máquina Injetora.....	21
Figura 3- Casa do STP .....	24
Figura 4 – Fluxo para Tomada de Decisões em uma Indústria 4.0 .....	45
Figura 5 – <i>Layout</i> da Fábrica em Análise .....	47
Figura 6 – Ilustração do Fluxo Produtivo .....	49
Figura 7 – Exemplificação de Tempos de <i>Setup</i> em Programação de Produção .....	50
Figura 8 – Exemplo de coleta das informações por meio do Sistema de Monitoramento na Empresa .....	52
Figura 9 – Agenda de Produção Realizada na Máquina 1 entre as horas 1 e 144 Semana 1.....	71
Figura 10 - Agenda de Produção Realizada na Máquina 2 entre as horas 1 e 144 Semana 1.....	71
Figura 11 - Agenda de Produção Realizada na Máquina 3 entre as horas 1 e 144 Semana 1.....	71
Figura 12 – Agenda de Produção Simulada Máquina 1 entre as horas 1 e 144 Semana 1.....	72
Figura 13 - Agenda de Produção Simulada Máquina 2 entre as horas 1 e 144 Semana 1.....	72
Figura 14 - Agenda de Produção Simulada Máquina 3 entre as horas 1 e 144 Semana 1.....	72
Figura 15 – Agenda de Produção Realizada na Máquina 1 entre as horas 1 e 144 Semana 2.....	73
Figura 16 - Agenda de Produção Realizada na Máquina 2 entre as horas 1 e 144 Semana 2.....	73



Figura 17 - Agenda de Produção Realizada na Máquina 3 entre as horas 1 e 144 Semana 2.....	73
Figura 18 – Agenda de Produção Simulada Máquina 1 entre as horas 1 e 144 Semana 2.....	74
Figura 19 - Agenda de Produção Simulada Máquina 2 entre as horas 1 e 144 Semana 2.....	74
Figura 20 - Agenda de Produção Simulada Máquina 3 entre as horas 1 e 144 Semana 2.....	74
Figura 21 – Gráfico <i>Gap</i> de Convergência x Quantidade de Peças Simuladas no Modelo de acordo com as ocupações de máquina (78%, 98%, 119% e 224%)	81
Figura 22 - Gráfico <i>Gap</i> de Convergência x Quantidade de Peças para 5, 6 e 7 itens.....	82

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição dos Índices, Parâmetros e Variáveis dos Modelos de Dimensionamento e/ou Sequenciamento da Produção .....	34
Tabela 2 – Índices, Parâmetros e Variáveis Utilizados no Modelo GLSP-ST .....	38
Tabela 3 – Descrição das Variáveis e Parâmetros dos Modelos Matemáticos considerando Múltiplas Máquinas (GLSPPL).....	40
Tabela 4- Descrição dos Índices, Variáveis e Parâmetros do Modelo de Dastidar e Nagi (2005) .....	42
Tabela 5 – Componentes <i>versus</i> Possibilidade de Injeção .....	48
Tabela 6 – Tempos médios de <i>Setup</i> entre os componentes (em unidades de tempo) .....	50
Tabela 7 – Produção Horária Média.....	53
Tabela 8 – Demanda Semanal Média dos Componentes .....	53
Tabela 9 – Custos de Investimento, Manutenção e Consumo de Energia Elétrica ...	56
Tabela 10 – Custos Horário por Máquina.....	56
Tabela 11 – Custos Unitário por Peça por Máquina (UM).....	56
Tabela 12- Descrição dos Índices, Variáveis e Parâmetros do Modelo Proposto ....	62
Tabela 13 – Demandas para Semana 1 e Semana 2 .....	69
Tabela 14 – Estoque Inicial Semana 1 .....	70
Tabela 15 – Estoque Inicial Semana 2.....	70
Tabela 16 – Custos Totais de Fabricação Realizado Semana 1.....	76
Tabela 17 – Custos Totais de Fabricação Simulado Semana 1.....	76
Tabela 18 – Custos Totais de Fabricação Realizado Semana 2.....	77
Tabela 19 – Custos Totais de Fabricação Simulado Semana 2.....	77
Tabela 20 – Análise Dados de Saída para Ocupação de 78% das Máquinas .....	79
Tabela 21 – Análise Dados de Saída para Ocupação de 98% das Máquinas .....	79

Tabela 22 – Análise Dados de Saída para Ocupação de 119% das Máquinas .....	80
Tabela 23 – Análise Dados de Saída para Ocupação de 224% das Máquinas .....	80
Tabela 24 – Análise Dados de Saída para 5 componentes no modelo.....	81
Tabela 25 – Análise Dados de Saída para 6 componentes no modelo.....	82
Tabela 26 – Análise Dados de Saída para 7 componentes no modelo.....	82

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

PCP	Planejamento e Controle da Produção
ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>
PLIM	Programação Linear Inteira Mista
OEE	<i>Overall Equipment Effectiveness</i> (Eficiência Global do Equipamento)
CLSP	<i>Capacitated Lot-Sizing Problem with Setup Times</i> (Problema de Dimensionamento de Lotes Capacitado com Tempos de <i>Setup</i> )
DLSP	<i>Discrete Lot Sizing and Scheduling Problem</i> (Problema Discreto de Dimensionamento e Programação de Lotes)
GLSP	<i>General Lot Sizing and Scheduling Problem</i> (Problema de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes Generalizado).
GLSP-ST	<i>General Lot Sizing and Scheduling Problem – Setup Times</i> (Problema de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes Generalizado – Tempos de <i>Setup</i> )
GLSPPL	<i>General Lot Sizing and Scheduling Problem for Parallel Production Lines</i> (Problema de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes Generalizado para linhas de Produção Paralelas).

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	Objetivos	15
1.2	Justificativa e Contribuição	16
1.3	Metodologia	17
1.4	Estrutura da Dissertação	17
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>19</b>
2.1	Processo de Moldagem por Injeção de Termoplásticos	19
2.1.1	Variáveis do Processo	21
2.1.2	Limpeza do cilindro e início da produção	22
2.2	Sistema de Manufatura Enxuta	23
2.2.1	<i>Just In Time (JIT)</i>	24
2.2.2	Desperdícios da Manufatura	25
2.2.3	Troca Rápida de Ferramenta	28
2.2.4	<i>Overall Equipment Effectiveness (OEE)</i>	29
2.3	Introdução à Modelagem Matemática	30
2.4	Planejamento e Controle da Produção	32
2.5	O Problema de Sequenciamento de Produção: Modelos em PLIM	33
2.6	Integração do Modelo ao Ambiente Fabril	44
2.7	Considerações Finais do Capítulo	46
<b>3</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA</b>	<b>47</b>
3.1	Ambiente de Fabricação	47
3.2	Programação de Produção no Estudo de Caso	49
3.3	Abordagem de Decomposição do Problema	51
3.4	Caracterização do Produto e da Demanda	52
3.5	Caracterização dos Custos	53
3.6	Considerações Finais do Capítulo	57
<b>4</b>	<b>DESCRIÇÃO DO MODELO</b>	<b>58</b>
4.1	Hipóteses do Modelo	58
4.2	Descrição dos Parâmetros e Variáveis Adotadas	59
4.2.1	Índices	59
4.2.2	Variáveis de Decisão	59
4.2.3	Dados de entrada (Parâmetros)	60
4.3	Função Objetivo do Modelo	63
4.4	Restrições do Modelo	64
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>68</b>
5.1	Sequenciamento de Produção	69
5.1.1	Programação de Produção Semana 1	70
5.1.2	Sequenciamento de Produção Semana 2	73
5.2	Custo total de fabricação	75
5.2.1	Custos de Fabricação Semana 1	75
5.2.2	Custos de Fabricação Semana 2	77
5.3	ESCALABILIDADE DO MODELO	78
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>84</b>
6.1	Considerações Finais	84
6.2	Trabalhos Futuros	85
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>86</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, a elevada competitividade da indústria plástica força as empresas a buscar elevados padrões de produtividade para que possam se manter competitivas. Por outro lado, a flexibilidade em produzir diversos produtos e a rápida resposta ao *mix* de produção é fundamental nessa missão.

Dentro deste contexto, o Planejamento e Controle da Produção (PCP) em uma fábrica contribui decisivamente para minimizar os custos do processo produtivo, além de maximizar a utilização de recursos e o nível de serviço. Esses objetivos são alcançados por meio do correto gerenciamento dos recursos humanos e físicos durante um horizonte tempo utilizado na fabricação dos produtos. Uma das principais decisões que estão sob a responsabilidade do PCP é a determinação dos tipos (modelos) de produtos a serem produzidos, assim como seu volume e sequência de produção, levando sempre em consideração a capacidade produtiva da fábrica, além dos prazos de entrega.

O dimensionamento e sequenciamento de lotes é uma problemática comumente abordada na literatura que tange o PCP. Esse problema é constituído pela tomada de decisão de quais quantidades de cada produto deverão ser produzidas de modo a atender às demandas e à capacidade do sistema de fabricação. A partir do momento que a programação destes itens envolve o consumo de recursos, a solução do problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes torna-se importante ferramenta de decisão.

O problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes possui diversas variáveis a serem avaliadas, as quais podem representar características do processo produtivo. Para esta pesquisa, serão consideradas múltiplas máquinas de moldagem por injeção de termoplásticos as quais estão sujeitas a um único estágio produtivo, além de diversos períodos temporais, divididos em subperíodos, com custos de *setup* dependentes da sequência de programação de processos.

O propósito dessa pesquisa é estudar o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes, incluindo os custos de fabricação e de mão de obra para troca de moldes, mas aplicado a um caso real. *A posteriori*, a avaliação dos modelos

matemáticos presentes na literatura deixará em evidência que o modelo proposto por Dastidar e Nagi (2005) pode servir de base para a referida avaliação, mas há, ainda assim, a necessidade de aprimoramentos na modelagem de modo a se respeitar restrições da quantidade de moldes disponíveis no chão de fábrica e também a quantidade máxima de setups que um operador tem capacidade de executar durante a sua jornada de trabalho.

## 1.1 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo geral desenvolver um modelo matemático em Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para reduzir os custos de fabricação total para atendimento das demandas de uma empresa que fabrica componentes moldados por injeção de termoplásticos.

Sendo assim, os objetivos específicos são os seguintes:

- Desenvolver a partir de um modelo em PLIM da literatura um modelo matemático para o dimensionamento de lotes e o sequenciamento produtivo da empresa em análise, considerando-se questões de custos de fabricação, *backlogging* e tempos *de setup*.
- Coletar dados produtivos reais das máquinas e produtos avaliados para posterior comparação de resultados em um horizonte de análise.
- Explicitar o impacto que o sequenciamento produtivo gera nos custos de fabricação.
- Para o caso real estudado, obter e analisar resultados do modelo de otimização de modo a evidenciar melhorias a serem realizadas no dimensionamento de lotes e no sequenciamento produtivo.
- Mensurar a escalabilidade do modelo matemático, em relação à carga computacional, mediante variações dos parâmetros de entrada, evidenciando quais parâmetros têm maior influência.

## 1.2 Justificativa e Contribuição

As questões de dimensionamento de lotes e sequenciamento de produção muitas vezes não são tratadas adequadamente no chão de fábrica. A elevada complexidade destes problemas intrinsicamente conectados (*lot sizing and sequencing problems*) vem motivando diversos profissionais a estudarem o tema, com a utilização de diferentes ferramentas e modelagens matemáticas em diversas linhas de estudo. Entretanto, os estudos ainda possuem espaço de proporcionar ganhos importantes de produtividade.

Em um ambiente em que o *mix* de produção sofre constantes alterações, além de *lead times* cada vez mais curtos, a capacidade de ser flexível mantendo a produtividade torna a empresa mais competitiva em um mercado de margens apertadas (MEIRA, 2015). Esta forma de organizar a produção é totalmente oposta à metodologia pregada pela era Ford, onde adotava-se a estratégia de produção em massa para um único item em uma única máquina (FORD, 1922).

Com o objetivo de contornar os problemas de flexibilidade as empresas recorrem muitas vezes a recursos adicionais de forças de trabalho. No contexto do estudo ressalta-se, ainda, medidas como a utilização de locais separados na planta produtiva para a montagem de componentes ou, então, a terceirização de serviços tais como as tampografias e serigrafias.

Dentro do contexto de dimensionamento de lotes e sequenciamento produtivo, a solução de um modelo em Programação Linear Inteira Mista tem potencial para alcançar a condição operacional ótima do sistema. Assim, sugerem-se programações de produção otimizadas, objetivando-se a redução de custos produtivos, fato vital à competitividade da empresa.

Dastidar e Nagi (2005) desenvolveram um modelo que engloba as principais restrições que comumente afetam uma linha de moldagem por injeção e a programação da produção como o balanço de massa para entrega dos componentes, a não sobreposição de máquinas para a produção dos itens e também a capacidade de produção. O modelo a ser proposto nessa dissertação visa adicionar à abordagem da literatura fatores como: o custo de fabricação por máquina



além dos custos de mão de obra para a troca do ferramental. Também foi adicionado o estoque inicial para balanceamento de massa das demandas e uma restrição para garantir que uma peça não entre em produção sem possuir a quantidade de moldes necessária para a fabricação do item.

### **1.3 Metodologia**

Segundo Lakatos e Marconi (1991) um “método de pesquisa é um conjunto de atividades sistemáticas e racionais que orientam a geração de conhecimentos válidos, indicando um caminho a ser seguido”. Somado a essa definição, Gil (1991) diz que a “pesquisa pode ser classificada segundo sua natureza, abordagem, objetivos e procedimentos técnicos”. Por meio dessas definições o trabalho acadêmico proposto é classificado como de natureza aplicada, uma vez que busca-se gerar conhecimentos para um problema conhecido de dimensionamento e sequenciamento de produção em uma fábrica de componentes moldados por injeção de termoplásticos. Para tanto é utilizada uma abordagem quantitativa, pautada na obtenção de dados determinísticos e análise matemática destes valores. Por fim, possui procedimentos bibliográficos, experimental e de estudo de caso, uma vez que foram revisados diversos trabalhos anteriores que foram utilizados como base para desenvolver a experimentação e analisar os resultados obtidos neste trabalho.

### **1.4 Estrutura da Dissertação**

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão da literatura abrangendo os conceitos da manufatura enxuta, o problema de dimensionamento e sequenciamento de produção e também modelagem matemática. No Capítulo 3 são apresentadas as variáveis, os tempos de processo coletados em campo e características da empresa estudada. No Capítulo 4 é explicitado o modelo matemático desenvolvido para a otimização do estudo de caso. No Capítulo 5, os

resultados das simulações computacionais realizadas são apresentados e analisados. Por fim, no Capítulo 6 tem-se as conclusões da dissertação, assim como as sugestões de trabalhos futuros.

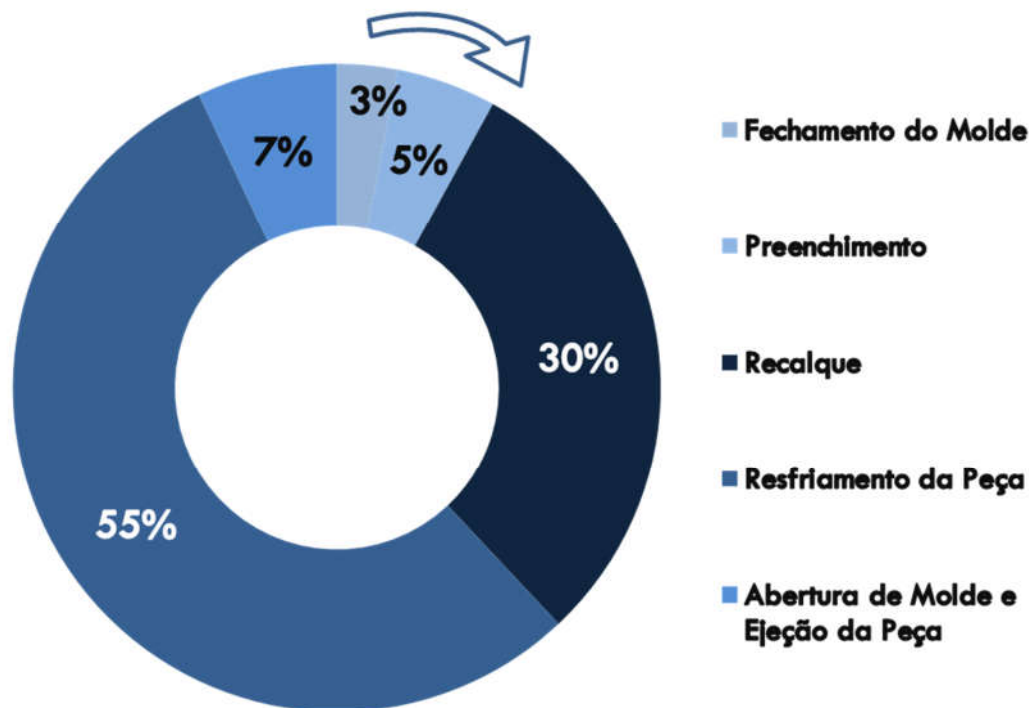
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo realiza-se uma revisão da literatura, abordando os tópicos correlatos aos discutidos neste trabalho. A seção 2.1 apresenta o histórico do processo de moldagem por injeção de termoplásticos, além das variáveis envolvidas neste processo de fabricação. Na seção 2.2 foram apresentados os principais fundamentos da manufatura enxuta, incluindo-se descritivo sobre: os princípios da filosofia *Just in Time*, os sete principais desperdícios que ocorrem na manufatura e a metodologia SMED (*Single Minute Exchange Die*). Já na seção 2.3 foi realizado um resumo sobre programação matemática e na seção 2.4, conceitos de base sobre planejamento e controle da produção são apresentados. Na seção 2.5 apresenta-se o problema de dimensionamento de lotes e sequenciamento de produção, onde também foram explicitados os principais modelos matemáticos descritos na literatura para o referido problema. Por fim, na seção 2.6 discorre-se sobre as formas de integração do modelo matemático ao processo de tomada de decisões operacionais no ambiente fabril.

### 2.1 Processo de Moldagem por Injeção de Termoplásticos

“A moldagem por injeção é uma adaptação do processo de fundição sob pressão, utilizado para metais leves” (BLASS, 1998). Esse processo de conformação foi inventado em 1872 pelos irmãos Hyatt e teve grande desenvolvimento com o advento dos materiais termoplásticos.

O ciclo produtivo não é muito complexo, sendo necessárias as seguintes etapas: fechamento do molde, preenchimento da cavidade, recalque, refrigeração e nova dosagem, abertura do molde e extração da peça (ISLNOTES, 2018). A Figura 1 exemplifica os tempos necessários para cada etapa com os valores dados em números percentuais em relação ao tempo total da operação.



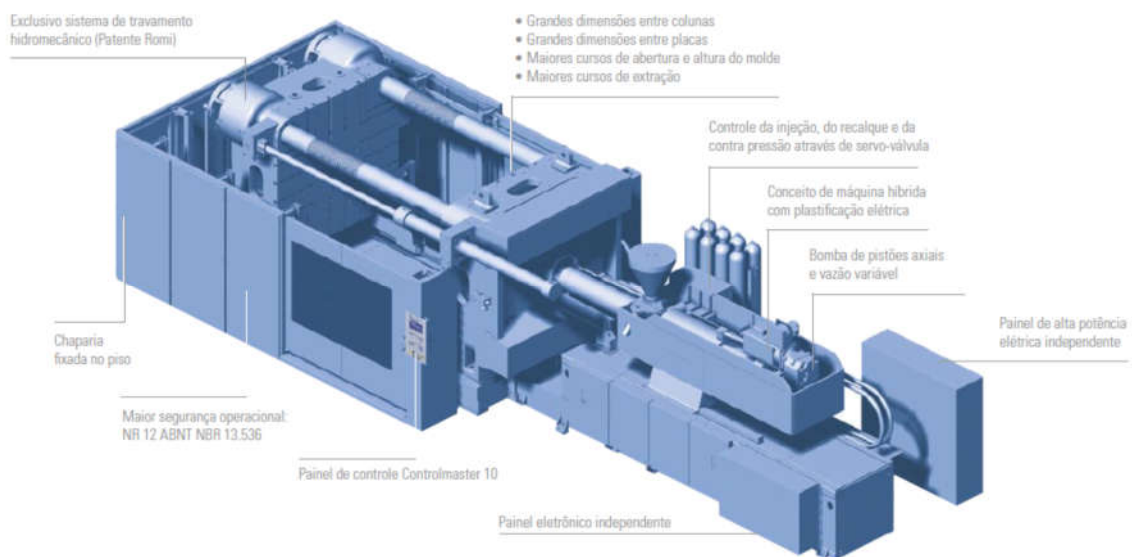
**Figura 1 – Ciclo de moldagem por injeção**  
Fonte: Adaptado de (ISLNOTES,2018)

A “Máquina Injetora é o equipamento utilizado para fabricação descontínua de produtos moldados, pela injeção de material plastificado no molde, que contém uma ou mais cavidades, em que o produto é formado” (SANDRETTO, 2018). Este equipamento é composto basicamente pela unidade de fechamento, unidade de injeção, sistema de acionamento e controle, conforme é possível visualizar na Figura 2. Por serem as mais importantes, as duas primeiras unidades são definidas a seguir.

A unidade de fechamento é a responsável por promover o fechamento do molde com uma força suficiente para mantê-lo fechado, mesmo com a pressão do material no momento da injeção. Essa força pode ser obtida através de sistemas mecânicos, hidráulicos de pistão e hidráulico mecânico. A unidade de injeção é o setor da máquina que recebe o plástico em estado sólido, em formas de grânulos ou pó, e libera nas quantidades pré-estabelecidas para o interior do molde (SANDRETTO, 2018).

O grande sucesso desse processo deve-se à elevada repetitividade e precisão dimensional, associados à elevada produtividade (SANDRETTO, 2018). O processo de injeção é responsável pelo processamento de um sexto dos componentes plásticos utilizados, sendo as indústrias de linha branca e automobilística os principais usuários destes componentes (BLASS, 1998).

Dentro deste contexto, as grandes empresas vêm tentando reduzir ao máximo os desperdícios neste processo produtivo.



**Figura 2 – Máquina Injetora**  
**Fonte:(VANDER, 2018)**

### 2.1.1 Variáveis do Processo

Segundo a GE Plastics (2018), para garantir que as peças consigam manter boa qualidade e bons resultados de produtividade é necessário manter sob controle as seguintes variáveis:

- Pressões (injeção, recalque e contrapressão): A pressão de injeção é a pressão responsável por preencher a cavidade com o material termoplástico fundido sendo diretamente impactada pela especificação do material,

complexidade e temperatura do molde. Já a pressão de recalque tem como função manter o material compactado até que ele retorne ao estado sólido. Esta pressão em excesso resulta em peças com elevadas tensões internas além de aumentar a complexidade da extração da peça, todavia uma pressão de recalque insuficiente acarreta em “rechupes” (acúmulo de material nos pontos de injeção), linhas de solda e empenamento (ISLNOTES, 2018). Por fim a contrapressão é responsável por manter as propriedades mecânicas do material, uma vez que ela é contrária ao retorno da rosca durante a inserção do material termoplástico no estado líquido. Desta forma, quanto maior a contrapressão, maior é a dificuldade de retorno da rosca, o que causa alto cisalhamento no material.

- **Temperaturas (Cilindro, massa e molde):** Cada resina possui um perfil de temperatura, que varia conforme o tempo de permanência do material no cilindro, complexidade da peça e projeto do molde. Em situações normais de injeção, estima-se um tempo de permanência entre 5 e 8 minutos e o peso de injetado entre 40 e 80% da capacidade da máquina. Recomenda-se a utilização do perfil de temperatura ascendente (GE Plastics, 2018).
- **Velocidade de Injeção:** A velocidade de injeção é o tempo necessário para preencher a cavidade do molde pelo material fundido.
- **Rotação da Rosca:** Para obtenção de maior homogeneização dos materiais, e também ganho de tempo de ciclo, é necessário que a rosca tenha uma rotação maior. Entretanto, altas rotações da rosca geram elevado atrito nos materiais e podem causar a degradação das suas propriedades (GE Plastics, 2018).

### **2.1.2 Limpeza do cilindro e início da produção**

Durante a mudança de molde para a fabricação de componentes com matérias primas ou cores distintas é necessário que o fuso e o cilindro da injetora estejam completamente limpos. Caso contrário, poderão surgir problemas como delaminação (ocorre quando ligas plásticas não estão corretamente homogeneizadas),

degradação da resina, pontos pretos e manchas no componente (GE Plastics, 2018). Desta forma, a existência de *setups* dependentes da sequência produtiva são inerentes ao processo de fabricação em análise.

## 2.2 Sistema de Manufatura Enxuta

O pensamento de manufatura enxuta é uma forma de especificar valor, ter a melhor sequência de produção que agrega valor e realizá-la sem interrupções, de modo cada vez mais eficaz (WOMACK E JONES, 2004).

De forma simplificada a manufatura enxuta visa evitar e corrigir qualquer tipo de desperdício, seja ele de matéria prima, de tempo ou de esforço, além de também buscar cada vez mais oferecer exatamente o que os clientes buscam.

Com o objetivo de alcançar esses objetivos foram criados princípios como: a produção em pequenos lotes, redução de estoques, manutenção preventiva, baixa taxa de refugos, entre outros. A produção em pequenos lotes e a redução de estoques força cada vez mais as empresas a terem flexibilidade e agilidade o que, por consequência, torna cada vez mais necessário que os tempos de *setup* sejam minimizados (GODINHO FILHO E FERNANDES, 2004).

Advinda do Sistema Toyota de Produção (STP), Womack, Jones e Ross (1992) explicitaram a utilização mundial dessa filosofia, a qual teve sua ideia precursora desenvolvida na Toyota, e segundo Ghinato (1995), é capaz de controlar e detectar causas fundamentais dos defeitos e dos desperdícios.

O diagrama “Casa do STP” (Figura 3), segundo Lieker (2005) foi desenvolvido com o objetivo de apresentar de forma simples e direta a filosofia do STP. Ao representar o diagrama como um elemento estrutural (casa), é dada a noção que todos os elementos são interligados e um elo fraco ou ausente causa a fragilização do sistema.

O diagrama pode ser interpretado com seu telhado representando as metas que se baseiam na eliminação dos desperdícios, a filosofia *just-in-time* como um dos pilares principais do sistema junto da autonomia (automação com supervisão

humana); o primeiro busca a produção de apenas o estritamente necessário com base na demanda e o segundo busca a identificação, entendimento e correção imediata dos problemas. No centro da casa encontram-se as pessoas, formando as equipes de trabalho que colocam todas essas ideias em prática, e, por fim, a base da estrutura, suportada pela filosofia Toyota como um todo, podendo ser aplicada a vários setores da indústria.

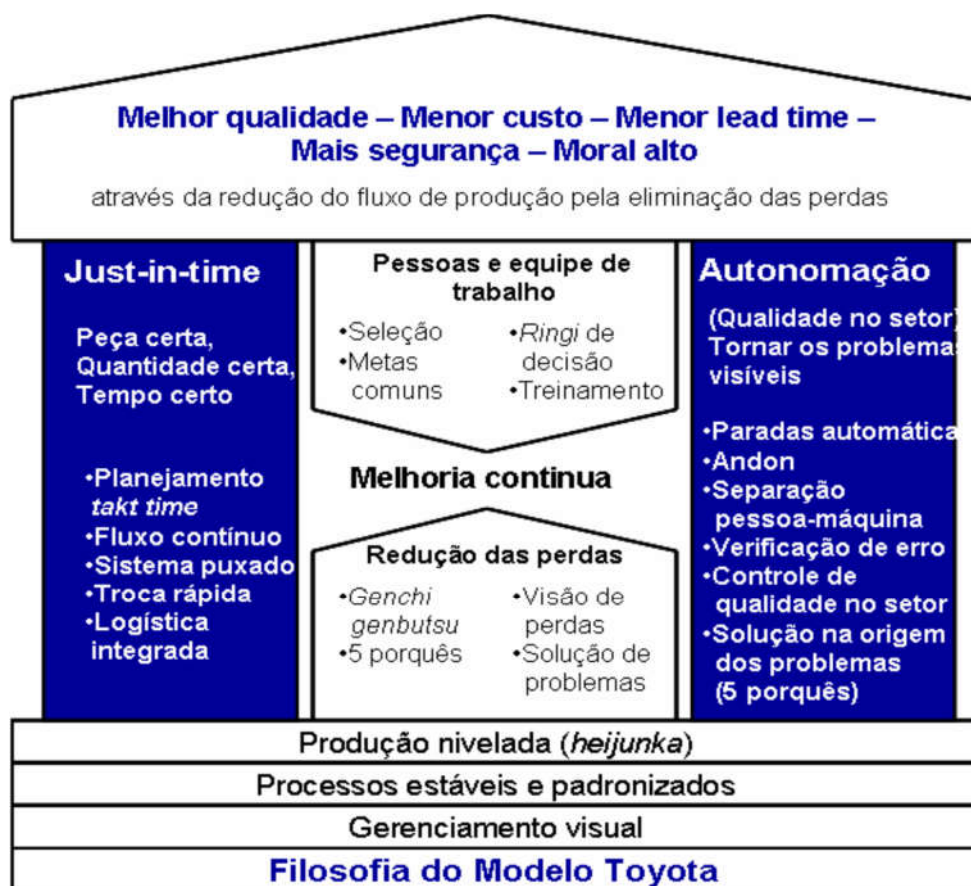


Figura 3- Casa do STP  
Fonte: LIEKER (2005).

### 2.2.1 Just In Time (JIT)

Segundo Lubben (1989) a meta do JIT é ter um sistema de produção que permita a um fabricante possuir em sua planta produtiva apenas as matérias primas,



os equipamentos e as pessoas necessários para cada tarefa. Segundo Black (1998), na Produção *Just in Time*, a redução do *lead time* depende da eliminação de estoques intermediários, da sincronização da produção e dos tamanhos dos lotes de fabricação.

Para alcançar esse objetivo essa filosofia de produção está sustentada em três pilares: a integração e otimização, a melhoria contínua e, por fim, o esforço em compreender e responder as necessidades dos clientes (MARTINS E BIDIN, 2006).

O primeiro pilar tem como função reduzir e eliminar funções e sistemas desnecessários ao processo produtivo tais como: inspeções, retrabalhos, estoques intermediários e outras ineficiências. Já a melhoria contínua incentiva o desenvolvimento dos processos produtivos e todos os sistemas internos, além do desenvolvimento pessoal dos funcionários. Por fim, o terceiro pilar consiste em garantir as entregas conforme as necessidades dos clientes, garantindo sempre produtos com qualidade, dentro do prazo de entrega e, também, com os custos dentro do esperado (MARTINS E BIDIN, 2006).

### **2.2.2 Desperdícios da Manufatura**

Segundo Shingo (1996), há sete principais tipos de desperdício na manufatura, e eles podem ser classificados devido aos seguintes fatores:

1. À superprodução;
2. Ao tempo de espera;
3. Ao transporte;
4. Ao processamento em si;
5. Ao estoque disponível;
6. À movimentação;
7. Aos produtos defeituosos.

Os sete desperdícios descritos anteriormente afetam de forma negativa o meio produtivo, acarretando em perda de produtividade e aumento no custo fabril. Economicamente, em um sistema no qual se busca produzir apenas o necessário para atender as necessidades dos clientes e atingir a melhor eficiência possível, é

vital que as perdas e desperdícios dentro do processo sejam analisados e suas soluções enfatizadas.

#### **2.2.2.1 Devido à superprodução**

Uma vez em que a filosofia *Just in Time* falha e as fábricas produzem mais que o necessário para atender às demandas do cliente tem-se o problema de superprodução. Como consequência da superprodução a empresa tem gastos adicionais com estoques, produtos parados sem demanda e também a movimentação desnecessária de pessoas, máquinas e produtos (SHINGO,1996).

#### **2.2.2.2 Devido ao tempo de espera**

É o desperdício relacionado à espera para a realização de um processo, como o ciclo automático de uma máquina, por exemplo, no qual um operador não realiza nenhuma atividade que agrega valor durante o ciclo produtivo.

Além disso, a espera relacionada com o processo também pode ocorrer com a produção de estoques intermediários para absorver eventos inesperados como quebras de máquinas e refugos (SHINGO,1996). Por fim o tempo de espera pode ser ocasionado por espera de lotes ou matérias-primas necessárias para a realização de uma atividade, que não estavam disponíveis no momento devido ao mau planejamento do fluxo de materiais do processo (SHINGO,1996).

#### **2.2.2.3 Devido ao transporte**

Em uma planta fabril ocorrem muitos transportes de matérias primas, informações, lotes de peças e ferramentas. Essas operações não agregam valor ao produto desenvolvido e devem sempre ser evitadas e reduzidas ao mínimo necessário para o funcionamento eficiente do processo (SHINGO, 1996).

#### **2.2.2.4 Devido ao processamento em si**

Desperdícios devido ao processamento ocorrem quando não há uma definição acurada do que se está produzindo. Usar recursos e esforço em demasia em um produto, longe das especificações e reais necessidades, traz perdas para o processo (SHINGO, 1996).

#### **2.2.2.5 Devido ao estoque disponível**

Com o excesso de produção, ou mesmo de fornecimento de matéria prima por parte de fornecedores para abastecer a produção, se formam os estoques (de matérias primas, intermediários ou de produtos para venda). Todos os tipos de estoques presentes acabam por gerar vários custos, como manutenção, perda de espaço e potenciais vendas paradas (SHINGO, 1996).

#### **2.2.2.6 Devido à movimentação desnecessária**

Relacionado com o ambiente de trabalho mal organizado e sem planejamento, o que resulta em movimentações. Ele se deve à má organização, a perda de itens e ferramentas afastadas dos postos de trabalho (SHINGO, 1996).

#### **2.2.2.7 Devido aos produtos defeituosos**

O custo de não qualidade dos itens é elevado e este tipo desperdício é muito grave em uma fábrica, visto que acarretam gastos com retrabalho ou a perda do investimento feito no produto até então (SHINGO, 1996).

Em relação à prevenção e correção desse desperdício, é importante lembrar que o foco deve ser na causa dos defeitos, e não apenas nos produtos defeituosos em si (SHINGO, 1996).

### 2.2.3 Troca Rápida de Ferramenta

Nos dias atuais, minimizar o tempo de *setup* é uma busca incessante das empresas, uma vez que reduzi-lo ajuda a melhorar o fluxo produtivo, além de reduzir os desperdícios citados anteriormente. Dentro desse contexto o *Single Minute Exchange Die* (SMED) é um dos pilares do Sistema Toyota de Produção (SHINGO 1996).

Em sua teoria, Shingo (1996) afirma que é possível realizar a troca de qualquer ferramenta em menos de 10 minutos. Para tanto, são usadas duas técnicas principais que são descritas na sequência nas subseções 2.2.3.1 e 2.2.3.2.

#### 2.2.3.1 Separar *Setup* Interno e Externo

Em operações de *setup* tradicionais, as empresas não dividem o *setup* em interno e externo. A definição segundo Shingo (1996) para cada uma dessas operações é:

- *Setup* Interno: São as operações que são realizadas com a máquina parada;
- *Setup* Externo: São as operações que devem ser realizadas com a máquina em funcionamento.

Dentro desse contexto, a primeira etapa consiste em mapear a forma como é feita a troca de ferramenta atualmente.

#### 2.2.3.2 Converter *Setup* Interno em Externo

Apesar da diminuição do tempo apenas com a separação do “*setup*” não é possível alcançar os objetivos do SMED (SHINGO, 1996). Conforme dito por Shingo (1996), se faz necessário nessa etapa converter algumas operações internas em externas, sendo identificadas as oportunidades por meio de uma lista de verificação.

### 2.2.3.3 *Kaizen* da Operação de Setup

Em muitos casos o objetivo do SMED não é alcançado apenas com as duas primeiras etapas da metodologia. Entretanto, com a realização de constantes análises e melhoria contínua do processo (*kaizen*) é possível identificar melhorias que não foram vistas anteriormente, conduzindo-se ao objetivo proposto (SHINGO, 1996).

### 2.2.4 Overall Equipment Effectiveness (OEE)

O OEE é um método usado para medir a eficiência do processo fabril. Por meio dele é possível analisar o desempenho da área de manufatura e identificar quais são os desperdícios e a máxima eficiência possível para cada equipamento. Segundo Braglia (2009), o cálculo desse indicador é feito por meio da medição de três desperdícios de fabricação que são: perdas de disponibilidade, desempenho e qualidade.

Segundo Nakajima (1989), o cálculo desse indicador está explicitado na equação (2.1) a seguir colocada:

$$OEE = \% (Disponibilidade) \times \% (Desempenho) \times \% (Qualidade) \quad 2.1$$

Os conceitos de disponibilidade, desempenho e qualidade estão explicitados, respectivamente, nas equações (2.2), (2.3) e (2.4):

$$Disponibilidade (\%) = TO/TC \quad 2.2$$

$$Desempenho (\%) = \frac{(TCI)}{TO} \quad 2.3$$

$$Qualidade (\%) = PC/VP \quad 2.4$$

Onde,  $TO$  é o tempo operacional,  $TC$  é o tempo de Carga,  $VP$  a quantidade total de peças produzidas,  $TCI$  o tempo de ciclo padrão e  $PC$  a quantidade de peças conformes produzidas.

Indicadores  $OEE$  superiores a 85% indicam um processo com alto rendimento e são considerados *benchmarking* entre os especialistas. Já processos com valor de  $OEE$  inferiores têm baixa produtividade e, conseqüentemente, custos elevados perdendo, assim, a competitividade no mercado de moldagem por injeção de termoplásticos.

### 2.3 Introdução à Modelagem Matemática

Pesquisa Operacional (PO) é uma abordagem científica e matemática que suporta a tomada de decisões, uma vez que ela procura a melhor maneira de projetar, planejar e operar sistemas (CAUCHICK MIGUEL *et al.*, 2012).

A Pesquisa Operacional é usualmente aplicada quando são estudadas modelagens matemáticas representativas dos processos reais. Dentro da PO os modelos de Programação Matemática podem ser interpretados como uma junção de equações, inequações e dependências lógicas que correspondem a estruturas reais.

O modelo no contexto de PO pode ser entendido como uma representação da realidade que foi construído com o objetivo de auxiliar o tratamento da situação de forma sistêmica. Este modelo deve levar em consideração os elementos essenciais para representar o sistema real e, ao mesmo tempo, deve ser simples para que seja possível tratá-lo por métodos de análise e resolução disponíveis (MEIRA, 2015). Existem modelagens matemáticas para vários propósitos, sendo os principais para otimização, previsão de desempenho, controle, *insight* e justificação.

Um modelo de Programação Matemática possui três elementos principais: variáveis de decisão/parâmetros, restrições e uma função objetivo e está ilustrado na formulação indicada na sequência pelas expressões (2.5) a (2.8):

$$\{Max, Min\} Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad 2.5$$

Sujeito a:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \{=, \leq, \geq\} b_1 \quad 2.6$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \{=, \leq, \geq\} b_2 \quad 2.7$$

...

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \{=, \leq, \geq\} b_m \quad 2.8$$

$$x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0 \quad 2.9$$

Onde:

$x_1, x_2, \dots, x_n$  = conjunto de variáveis não-negativas estruturais do modelo;

$c_1, c_2, \dots, c_n$  = coeficientes de ponderações da função objetivo (pesos);

$a_{ij}$  e  $b_j$  = coeficientes das restrições.

A representação  $\{Max, Min\} Z$  indica que a função objetivo será de maximização ou minimização, de acordo com as necessidades em que se deseja aplicar.

Uma vertente difundida da programação matemática é a Programação Linear Inteira Mista, onde as variáveis devem assumir valores inteiros ou contínuos. As variáveis que assumem apenas valores inteiros são utilizadas para representar condições de indivisibilidade como, por exemplo, o número de peças injetadas produzidas durante um dia de produção.

De acordo com Magatão (2005), os problemas de otimização combinatória são encontrados por meio de especificações algébricas de um conjunto de alternativas viáveis. Para se obter essa formulação é necessário seguir os seguintes passos:

- i. Introduzir variáveis de decisão que representem as alternativas dos modelos;
- ii. Expressar o critério de avaliação como uma função linear das variáveis criadas;
- iii. Representar o conjunto de alternativas factíveis como a solução das equações e inequações lineares.

Uma explicação detalhada sobre métodos de formulação de modelos PLIM está disponível em Magatão (2005) e Williams (2013), onde várias técnicas são explicitadas tais como: uso de variáveis binárias, número de restrições, formulação *Big-M*. Em particular a formulação *Big-M* é uma técnica que permite realizar a conexão entre variáveis discretas (muitas vezes binárias) e outras de natureza

contínua, mantendo-se a linearidade da formulação avaliada. Esta conexão é realizada com o auxílio de um parâmetro “suficientemente grande” ( $M$ ). Em Magatão (2005) apresenta-se um detalhamento da técnica, a qual será utilizada nas formulações matemáticas exploradas *a posteriori* no presente trabalho.

Existe uma gama grande de linguagens de modelagem e ambientes de desenvolvimento que estão disponíveis para formular e resolver modelos em Programação Matemática, sendo as principais linguagens declarativas AMPL, GAMS, LINGO e OPL (*Optimization Programming Language*). Nesses ambientes, o desenvolvedor dos modelos pode elaborar o equacionamento matemático sem descrever o processo de solução, o qual é realizado por *solvers* normalmente embutidos no ambiente de modelagem. Os principais *solvers* para modelos de Programação Linear Inteira Mista presentes no mercado são o CPLEX (CPLEX, 2018) e o Gurobi (GUROBI, 2018).

Com a evolução computacional vivenciada nas últimas décadas, ao mesmo tempo em que o avanço técnico dos ambientes de modelagem e resolução computacional de modelos de Programação Matemática ocorreu, cada vez mais esta técnica de Pesquisa Operacional vem sendo usada nas empresas, realidade também esta no setor de transformação de componentes, objeto do presente estudo.

## **2.4 Planejamento e Controle da Produção**

O Planejamento e Controle da Produção (PCP) é responsável por conciliar o fornecimento de produtos e serviços com a demanda estabelecida pelo setor de vendas. Desta maneira, cabe ao PCP planejar e gerenciar as quantidades de produtos a serem produzidas, realizar a agenda de produção, quantidade de peças em estoque, e a emissão de ordens de produção (SLACK, 2009).

A primeira tarefa do planejador de produção é verificar as demandas de fabricação, baseado nos estoques e nas ordens de venda. Com essa informação parte-se para o sequenciamento das tarefas que serão executadas. O



sequenciamento levará em consideração desde as restrições físicas da fábrica até o cumprimento das datas de entrega (LOPES e LIMA, 2008).

Nos dias atuais o setor do planejamento tem papel fundamental dentro de uma planta fabril, sendo utilizadas diversas ferramentas para avaliar o planejamento de produção. Dentre essas ferramentas a mais difundida em indústrias de pequeno e médio porte é o MRP II (*Manufacturing Resources Planning*), que permite ao planejador verificar a disponibilidade da matéria prima em estoque, instalações disponíveis, mão de obra e espaço disponível para estocagem (LAURINDO E MESQUITA, 2000). Contudo, a otimização do dimensionamento de lotes e do sequenciamento produtivo envolve, via de regra, a solução de problemas combinatoriais complexos e, desta forma, ainda permanece como um desafio dentro de ambientes produtivos da manufatura (MEIRA, 2015).

## **2.5 O Problema de Sequenciamento de Produção: Modelos em PLIM**

Ao longo do último século, várias pesquisas acadêmicas voltadas ao setor produtivo têm como tema central um problema recorrente na indústria: o planejamento e controle da produção. Algumas decisões em um ambiente fabril, tais como o sequenciamento ideal para fabricação de componentes, são fundamentais para o bom andamento e maior lucratividade de uma empresa. Estas decisões envolvem determinar qual máquina deve ser utilizada, quais funcionários devem ser alocados para a realização das tarefas e qual a ordem de execução das tarefas na máquina escolhida. Diante deste contexto, desde o início do século passado modelos matemáticos que tratam de dimensionamento de lotes, alocação de pessoas e programação de produção estão sendo desenvolvidos e melhorados por diversos pesquisadores, conforme indicado no trabalho precursor de Harris (1913).

Ao longo das décadas, os modelos matemáticos visando à programação de produção avançaram significativamente, sempre tendo como foco principal representar o mais próximo possível a realidade em um chão de fábrica. Em 1989, Trigeiro *et al.* (1989) propôs um modelo para o Dimensionamento de Lotes Capacitado (CLSP – *Capacitated Lot Sizing Problem*).

A principal característica do CLSP é possibilitar a produção de vários itens em um mesmo intervalo de tempo, permitindo a partição do horizonte de planejamento em períodos, conforme o necessário.

A seguir serão apresentados alguns importantes modelos matemáticos no contexto de dimensionamento de lotes e sequenciamento de produção, os quais irão utilizar um conjunto de índices, parâmetros e variáveis, conforme apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1 – Descrição dos índices, parâmetros e variáveis dos modelos de dimensionamento e/ou sequenciamento da produção**

	<b>Simbologia</b>	<b>Descrição</b>
Índices	$i, j = 1, \dots, N$	Item
	$t = 1, \dots, T$	Período
Parâmetros	$N$	Número de itens
	$T$	Número de períodos do horizonte
	$cs_i$	Custo de <i>Setup</i>
	$st_i$	Tempo de <i>Setup</i>
	$p_i$	Custo de produção
	$tp_i$	Tempo de ciclo
	$I_{i0}$	Estoque inicial do item $i$
	$h_i$	Custo unitário de estoque
	$d_{it}$	Demanda do item $i$ no período $t$
	$C_t$	Capacidade de produção da máquina no período $t$
	$x_{i0}$	Indica que a máquina está configurada para a produção do item $i$ no primeiro período do horizonte de planejamento
Variáveis	$M$	Número suficientemente grande
	$q_{it}$	Quantidade produzida do item $i$ no período $t$
	$I_{it}$	Estoque do item $i$ no final do período $t$
	$x_{it}$	Indica que a máquina está configurada para a produção do item $i$ no período $t$ ( $x_{it}=1$ ), caso contrário (c.c.), $x_{it}=0$
	$y_{it}$	Indica a ocorrência de <i>setup</i> para a produção do item $i$ no período $t$ ( $y_{it}=1$ ), c.c., $y_{it}=0$

Fonte: Adaptado de ULBRICHT (2015)

Ferreira (2006) define que, quando são contabilizados os tempos de *setup*, ocorre uma variação da restrição de capacidade produtiva das máquinas. Desta forma, será apresentado o modelo CLSP com tempo de *setup* (*Capacitated Lot*

*Sizing Problem with Setup Times*), conforme Trigeiro *et al.* (1989) e Miller *et al.* (2003).

Modelo CLSP (Trigeiro *et al.*, 1989):

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (h_i + I_{it} + p_i q_{it} + cs_i y_{it}) \quad 2.10$$

Sujeito a:

$$I_{it} + I_{i(t-1)} + q_{it} - d_{it} \quad i=1, \dots, N \quad t=1, \dots, T \quad 2.11$$

$$\sum_{i=1}^N tp_i q_{it} + \sum_{i=1}^N st_i y_{it} \leq C_t \quad t=1, \dots, T \quad 2.12$$

$$q_{it} \leq M \cdot y_{it} \quad i=1, \dots, N \quad t=1, \dots, T \quad 2.13$$

$$y_{it} \in \{0, 1\} \quad i=1, \dots, N \quad t=1, \dots, T \quad 2.14$$

$$I_{it}, q_{it} \geq 0 \quad i=1, \dots, N \quad t=1, \dots, T \quad 2.15$$

A função objetivo (2.10) busca a minimização dos custos totais de estoque, produção e *setup*. O conjunto de restrições (2.11) garante que os estoques, quantidades produzidas e demandas estejam adequados. O segundo conjunto de restrições (2.12) visa garantir que a soma dos tempos de *setup* com os tempos de produção sejam menor ou igual à capacidade produtiva do sistema. O conjunto de restrições (2.13) garante que é necessário a realização do *setup* para o início da produção do item  $i$  no período  $t$ . Por fim, os conjuntos de restrições (2.14) e (2.15) representam os domínios das variáveis.

Em seu trabalho intitulado DLSP - *Discrete Lot Sizing and Scheduling Problem*, Fleischmann (1990) visava estabelecer um modelo que realizasse o

dimensionamento e sequenciamento de lotes de forma integrada. O modelo apresentado consiste em considerar pequenos intervalos de tempo onde apenas um item é fabricado por vez. Desta forma, é possível saber a ordem de fabricação e a quantidade produzida.

O principal aspecto do DLSP é a utilização de todo o recurso por parte do item que está sendo produzido. Desta forma, o modelo permite apenas a produção de um único item dentro do período. O modelo DLSP está explicitado na sequência nas expressões (2.16) a (2.22):

Modelo DLSP:

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (cs_i + y_{it} + h_t I_{it}) \quad 2.16$$

Sujeito a:

$$I_{it} = I_{i(t-1)} + q_{it} - d_{it} \quad i=1, \dots, N \quad t=1, \dots, T \quad 2.17$$

$$tp_i q_{it} = C_i x_{it} \quad i=1, \dots, N \quad t=1, \dots, T \quad 2.18$$

$$\sum_{i=1}^N x_{it} \leq 1 \quad t=1, \dots, T \quad 2.19$$

$$y_{it} \geq x_{it} - x_{i(t-1)} \quad i=1, \dots, N \quad t=1, \dots, T \quad 2.20$$

$$x_{it} \in \{0, 1\} \quad i=1, \dots, N \quad t=1, \dots, T \quad 2.21$$

$$I_{it}, q_{it}, y_{it} \geq 0 \quad i=1, \dots, N \quad t=1, \dots, T \quad 2.22$$

A função objetivo (2.16) busca a minimização dos custos totais de estoque e *setup*. O conjunto de restrições (2.17) garante que os estoques, quantidades produzidas e demandas estejam adequados. O segundo conjunto de restrições (2.18) visa garantir que toda a capacidade produtiva é utilizada pelo item que está sendo produzido. O conjunto de restrições (2.19) indica a configuração da máquina

para apenas um item. O conjunto de restrições (2.20) considera o custo de *setup* para cada início de lote. Por fim, o conjunto de restrições (2.21) e (2.22) representam os domínios das variáveis.

Fleischmann e Meyr (1997) propuseram o Problema de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes Generalizado – GLSP (*General Lot Sizing and Scheduling Problem*). Neste estudo os autores dividiram o horizonte em subperíodos em que se produz um lote de um item exclusivo. O número de subperíodos é definido conforme a necessidade de produção e o seu tempo de duração é variável e é obtido por meio da multiplicação do lote pelo tempo de ciclo do componente. Ao alcançar a solução otimizada do problema, automaticamente é obtido o dimensionamento e sequenciamento da produção fabril.

Em um estudo posterior Meyr (2000) incluiu no GLSP o tempo e o custo de *setup* conforme a ordem de fabricação dos lotes. Esta característica do GLSP-ST (*General Lot Sizing and Scheduling Problem – Setup Times*) o torna mais completo e abrangente a situações reais, além de ser uma base importante para os estudos a serem realizados neste trabalho acadêmico.

Na Tabela 2 –são apresentados os índices, parâmetros e variáveis utilizados no GLSP-ST.

O modelo GLSP-ST está explicitado na sequência, nas expressões (2.23) a (2.31):

Tabela 2 – Índices, parâmetros e variáveis utilizados no modelo GLSP-ST

SIMBOLOGIA	DESCRIÇÃO
Índices	$i, j = 1, \dots, N$ item
	$t = 1, \dots, T$ período
	$s = 1, \dots, W$ subperíodo
Parâmetros	$N$ número de itens
	$T$ número de períodos do horizonte de planejamento
	$W$ número total de subperíodos
	$W_t$ Conjunto dos subperíodos $s$ , pertencentes ao período $t$
	$cs_i$ custo de preparação de máquina (custo de <i>setup</i> ) para produção do item $i$
	$st_{ij}$ tempo de preparação de máquina (tempo de <i>setup</i> ) para produzir uma unidade do item $j$ imediatamente após o item $i$
	$tp_i$ tempo necessário para produzir uma unidade do item $i$
	$I_{i0}$ estoque inicial do item $i$
	$h_i$ custo unitário de estoque por período, do item $i$
	$d_{it}$ demanda do item $i$ no período $t$
	$lm_i$ lote mínimo do item $i$ a ser produzido
	$C_t$ capacidade de produção (tempo) de máquina no período $t$
Variáveis	$x_{i0}$ indica que a máquina está configurada para a produção do item $i$ no primeiro subperíodo do horizonte de planejamento ( $x_{i0} = 1$ ), caso contrário ( $x_{i0} = 0$ )
	$q_{is}$ quantidade produzida do item $i$ no subperíodo $s$
	$I_{it}$ estoque do item $i$ no final do período $t$
	$x_{is}$ indica que a máquina está configurada para a produção do item $i$ no subperíodo $s$ ( $x_{is} = 1$ ), caso contrário ( $x_{is} = 0$ )
	$y_{ijs}$ Indica mudança do item $i$ para o item $j$ no subperíodo $s$ ( $y_{ijs} = 1$ ), caso contrário ( $y_{ijs} = 0$ )

Fonte: Ulbricht (2015)

Modelo GLSP-ST (Meyr, 2000):

$$\min \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N \sum_{s=1}^W cs_{ij} y_{ijs} + \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T h_i I_{it} \quad 2.23$$

Sujeito a:

$$I_{it} = I_{i,t-1} + \sum_{s \in W_t} q_{is} - d_{it} \quad i=1, \dots, N; t=1, \dots, T \quad 2.24$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{s \in W_t} tp_i q_{is} + \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N \sum_{s \in W_t} st_{ij} y_{ijs} \leq C_t \quad t=1, \dots, T \quad 2.25$$

$$tp_i q_{is} \leq C_t x_{is} \quad i=1, \dots, N; t=1, \dots, T \quad 2.26$$

$$q_{is} \geq lm_i(x_{is} - x_{is-1}) \quad i=1, \dots, N; s=1, \dots, W \quad 2.27$$

$$\sum_{i=1}^N x_{is} = 1 \quad s=1, \dots, W \quad 2.28$$

$$y_{ijs} \geq (x_{i,s-1} + x_{j,s-1}) \quad i, j=1, \dots, N; t=1, \dots, T \quad 2.29$$

$$x_{is} \in \{0, 1\} \quad i=1, \dots, N; s=1, \dots, W \quad 2.30$$

$$I_{it}, q_{is}, y_{ijs} \geq 0 \quad i=1, \dots, N; t=1, \dots, T; s=1, \dots, W \quad 2.31$$

A função objetivo (2.23) visa minimizar os custos de *setup* e de *estoques*. O conjunto de restrições (2.24) realiza o balanço de massa para os estoques do item  $i$  em cada período  $t$ . O conjunto de restrições (2.25) garante que os tempos de produção adicionado ao de *setup* de todos os itens em um período  $t$  não exceda a capacidade produtiva do sistema. O conjunto de restrições (2.26) assegura que a produção é somente iniciada caso a máquina já esteja preparada. Já o conjunto de restrições (2.27) delimita um lote mínimo de fabricação para cada componente, que somente é iniciado após a realização do *setup*.

O conjunto de restrições (2.28) determina que para o início da produção faz-se necessário a preparação da máquina previamente em cada subperíodo  $s$ . O conjunto de restrições (2.29) indica a troca de componentes que serão produzidos entre dois subperíodos e por fim as restrições (2.30) e (2.31) indicam o domínio das variáveis.

Meyr (2002) propôs um incremento interessante aos modelos GLSP e GLSP-ST que é denominado GLSPPL (*General Lot Sizing and Scheduling Problem for Parallel Production Lines*). A principal evolução deste estudo é a consideração de máquinas paralelas trabalhando de formas distintas.

O GLSPPL possui como objetivo principal minimizar os custos de estocagem de itens, custos de produção e de *setup* (que variam conforme a sequência escolhida). Os índices, variáveis e parâmetros utilizados neste modelo são explicitados na Tabela 3.

O modelo GLSPPL está explicitado na sequência, nas expressões (2.32) a (2.40).

**Tabela 3 – Descrição das variáveis e parâmetros dos modelos matemáticos considerando múltiplas máquinas (GLSPPL)**

Simbologia	Descrição
Índices	$i, j = 1, \dots, N$ item
	$t = 1, \dots, T$ período
	$s = 1, \dots, W$ subperíodo
	$k = 1, \dots, K$ máquina
Parâmetros	$N$ número de itens
	$T$ número de períodos do horizonte de planejamento
	$W$ número total de subperíodos
	$W_t$ Conjunto dos subperíodos $s$ , pertencentes ao período $t$
	$K$ número de máquinas
	$st_{ijk}$ tempo de preparação de máquina (tempo de <i>setup</i> ) para produzir uma unidade do item $j$ imediatamente após o item $i$ na máquina $k$
	$cs_{ijk}$ custo de <i>setup</i> para a transição do item $i$ para o item $j$ na máquina $k$ ;
	$tp_{ik}$ tempo necessário para produzir uma unidade do item $i$ na máquina $k$
	$cp_{ik}$ custo de produção de uma unidade do item $i$ na máquina $k$
	$I_{i0}$ estoque do item $i$ no início do horizonte de planejamento
	$h_i$ custo unitário de estoque por período, do item $i$
	$d_{it}$ demanda do item $i$ no período $t$
	$lm_{ik}$ lote mínimo do item $i$ a ser produzido na máquina $k$
	$C_{kt}$ capacidade de produção (tempo) disponível na máquina $k$ no período $t$
Variáveis	$x_{ik0}$ indica que a máquina está configurada para a produção do item $i$ no primeiro subperíodo do horizonte de planejamento ( $x_{ik0} = 1$ ), caso contrário ( $x_{ik0} = 0$ )
	$q_{iks}$ quantidade do item $i$ produzido na máquina $k$ no subperíodo $s$ ;
	$I_{it}$ estoque do item $i$ no final do período $t$
	$x_{iks}$ indica que a máquina $k$ está configurada para a produção do item $i$ no subperíodo $s$ ( $x_{iks} = 1$ ), caso contrário ( $x_{iks} = 0$ )
	$y_{ijk_s}$ indica quando há troca do item $i$ para o item $j$ na máquina $k$ no subperíodo $s$ ( $y_{ijk_s} = 1$ ), caso contrário ( $y_{ijk_s} = 0$ )

Fonte: Ulbricht (2015)

Modelo GLSPPL (MEYR, 2002):

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N h_t I_{it} + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{s=1}^W cs_{ijk} y_{ijk_s} + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N \sum_{s=1}^W cp_{ik} q_{iks} \quad 2.32$$

Sujeito a:

$$I_{it} = I_{i,t-1} + \sum_{k=1}^K \sum_{s \in W_t} q_{iks} - d_{it} \quad i=1, \dots, N; t=1, \dots, T \quad 2.33$$



$$\sum_{i=1}^N \sum_{s \in W_t} t p_{ik} q_{iks} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{s \in W} s t_{ijk} y_{ijks} \leq C_{kt} \quad k=1, \dots, K; t=1, \dots, T \quad 2.34$$

$$q_{iks} \leq \frac{C_{kt}}{t p_{ik}} x_{iks} \quad k=1, \dots, K; i=1, \dots, N; t=1, \dots, T; s \in W \quad 2.35$$

$$q_{iks} \geq l m_{ik} (x_{iks} - x_{ik(s-1)}) \quad k=1, \dots, K; i=1, \dots, N; s=1, \dots, W \quad 2.36$$

$$\sum_{i=1}^N x_{iks} = 1 \quad k=1, \dots, K; s=1, \dots, W \quad 2.37$$

$$y_{ijks} \geq x_{ik(s-1)} + x_{jks} - 1 \quad k=1, \dots, K; i=1, \dots, N; j=1, \dots, N; s=1, \dots, W \quad 2.38$$

$$x_{iks} \in \{0, 1\} \quad k=1, \dots, K; i=1, \dots, N; s=1, \dots, W \quad 2.39$$

$$q_{iks}, y_{ijks}, I_{it} \geq 0 \quad k=1, \dots, K; i, j=1, \dots, N; t=1, \dots, T; s=1, \dots, W \quad 2.40$$

A função objetivo (2.32) visa minimizar os custos de estoque, *setup* e produção. O conjunto de restrições (2.33) garante o balanço de massa dos estoques e itens em produção e demanda. O conjunto de restrições (2.34) assegura a capacidade produtiva do sistema, ou seja, os tempos de produção somados ao *setup* não devem ultrapassar a capacidade disponível de cada máquina. O conjunto de restrições (2.35) garante que a produção do componente somente será iniciada após a realização prévia do *setup*, somado a isso estas restrições permitem que caso necessário o componente em produção pode adotar o regime cativo na máquina.

O conjunto de restrições (2.36) delimita o número mínimo de componentes a serem produzidos em lote específico e apenas é ativado com o início da produção de um novo componente. O conjunto de restrições (2.37) assegura que cada máquina possa produzir apenas um item em cada subperíodo  $s$ . O conjunto de restrições (2.38) indica a mudança de itens a serem produzidos, caso exista, e, por fim, os conjuntos de restrições (2.39) e (2.40) indicam o domínio das variáveis.

Na literatura existem ainda algumas variações ao GLSPPL que possuem como meta modelar situações reais. Uma destas variações foi descrita por Dastidar e Nagi

(2005). Nela é apresentado um caso similar ao que será abordado nesta dissertação. Em seu modelo os autores abordam o GLSPPL em uma planta de injeção plástica visando minimizar os custos de *setup*, de estoque e de atraso de entrega (*backlogging*).

O modelo desenvolvido por Dastidar e Nagi (2005) utiliza notações não necessariamente coincidentes com as do GLSPPL, apesar de ser uma variação do GLSPPL. Desta forma, na Tabela 4 indicam-se todos os índices, parâmetros e variáveis utilizados na modelagem dos autores e as expressões (2.41) a (2.49) trazem o modelo matemático por eles proposto.

**Tabela 4- Descrição dos Índices, Variáveis e Parâmetros do Modelo de Dastidar e Nagi (2005)**

	<b>Simbologia</b>	<b>Descrição</b>
Índices	$i, j = 1, \dots, N$	Item
	$m = 1, \dots, M$	Máquinas
	$l = 1, \dots, L$	Recursos
	$t = 1, \dots, T$	Períodos
Parâmetros	$d_{it}$	Demanda do componente $i$ para o período $t$
	$C_{im}$	Capacidade produtiva da máquina para um componente $i$ para o período de tempo $t$
	$\rho_{im}$	Produtividade do componente $i$ na máquina $m$
	$\tau_{jim}$	Tempo de <i>setup</i> do componente $j$ para o componente $i$ na máquina $m$
	$\mu_{ji}$	Tempo <i>setup</i> da matéria prima
	$S_{jim}$	Custo de <i>setup</i> do componente $j$ para o componente $i$ na máquina $m$
	$b_i$	Custo unitário de <i>backlogging</i> (atraso de entrega) do componente $i$
	$h_i$	Custo unitário de estoque do item $i$
	$r^1_{im}$	Indica a necessidade de utilizar recurso para produzir o componente $i$ na máquina $m$ ( $r^1_{im}=1$ ) caso contrário ( $r^1_{im}=0$ )
	$\pi_{im}$	Indica se o componente $i$ pode ser fabricado na máquina $m$ ( $\pi_{im}=1$ ), caso contrário, $\pi_{im}=0$
Variáveis	$x_{imt}$	Quantidade processada do item $i$ na máquina $m$ no período $t$
	$I_{it}$	Estoque do item $i$ no final do período $t$
	$b_{it}$	<i>Backlog</i> do componente $i$ no período de tempo $t$
	$\Phi_{imt}$	Indica que a máquina está configurada para a produção do item $i$ no período $t$ ( $\phi_{it}=1$ ), caso contrário, $\phi_{it}=0$
	$\psi_{it}$	Indica a ocorrência de <i>setup</i> para a produção do item $i$ no período $t$ ( $\psi_{it}=1$ ), caso contrário, $\psi_{it}=0$

Fonte: Adaptado Dastidar e Nagi (2005)

Modelo (DASTIDAR e NAGI, 2005):

$$\min \sum_{i,j=1}^P \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T s_{jim} \Psi_{jimt} + \sum \sum h_i I_{it} + \sum \sum p_i b_{it} \quad 2.41$$

Sujeito a:

$$I_{it} - b_{it} = I_{i(t-1)} - b_{i(t-1)} + \sum_{m=1}^M x_{imt} - d_{it} \quad \forall i, \forall t \quad 2.42$$

$$x_{imt} \leq C_{im} \Phi_{imt} - \sum_{\substack{j=1|\pi_{jm}=1 \\ i \neq j}}^P \rho_{im} (\tau_{jim} + \mu_{ji}) \Psi_{jimt} \quad \forall i, m | \pi_{im} = 1, \forall t \quad 2.43$$

$$\sum_{i=1}^P \sum_{m=1}^M r_{im}^1 \Phi_{imt} \leq n_t \quad \forall i, m | \pi_{im} = 1, \forall l, t \quad 2.44$$

$$\sum_{i=1}^P \Phi_{imt} \leq 1 \quad \forall i, m | \pi_{im} = 1, \forall t \quad 2.45$$

$$\Psi_{jimt} \geq \Phi_{imt} + \Phi_{jm(t-1)} - 1 \quad \forall i, j, m | \pi_{im} = \pi_{jm} = 1, i \neq j, \forall t \quad 2.46$$

$$\Phi \in \{0, 1\} \quad \forall i, m | \pi_{im} = 1, \forall t \quad 2.47$$

$$\Psi_{jimt} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j, m | \pi_{im} = \pi_{jm} = 1, i \neq j, \forall t \quad 2.48$$

$$x_{imt}, I_{it}, b_{it} \geq 0 \quad \forall i, \forall m, \forall t \quad 2.49$$

A função objetivo (2.41) visa minimizar o custo total de *setup*, estoques e *backlogging*. O conjunto de restrições (2.42) garante o correto balanço de massa entre as partes produzidas, demanda e estoques. O conjunto de restrições (2.43) determina o número de partes que podem ser produzidas sem exceder a capacidade das máquinas, além de levar em consideração as perdas por *setup*. O conjunto de restrições (2.44) garante que o número de equipamentos utilizados para a fabricação de determinado item é igual ou menor à quantidade de equipamentos disponíveis. O conjunto de restrições (2.45) assegura a fabricação de apenas um item por vez nas máquinas. O conjunto de restrições (2.46) determina quando os *setups* ocorrem. As

restrições (2.47) e (2.48) determinam domínios binários às variáveis especificadas e, finalmente, o conjunto de restrições (2.49) indica domínios contínuos às variáveis envolvidas.

Em relação ao modelo GLSPPL de Meyr (2002), a versão proposta por Dastidar e Nagi (2005) permite uma adequada aplicação nas indústrias de moldagem por injeção de termoplásticos uma vez que são considerados parâmetros específicos de processo fabril. Por exemplo, a divisão do tempo de *setup* em fatores relativos ao componente ( $\tau_{jim}$ ) e outros relativos à matéria prima ( $\mu_{ji}$ ) permite representar a troca do ferramental e a limpeza do canhão da máquina injetora como parte da formulação matemática.

De modo complementar ao anteriormente exposto, ressalta-se que foi realizada uma busca detalhada na base de dados *Web of Science* com as seguintes palavras chave: *injection molding factory research operational, lot sizing and scheduling problem for injection molding factory* entre outros. Os resultados reportaram um total de 220 artigos para o segundo termo de pesquisa que explicitou resultados mais próximos ao objetivo propostos. Dentre esses 220 artigos nenhum deles contudo, apresentou uma modelagem que apresenta-se características mais próximas ao caso real em estudo, quando comparada ao artigo de Dastidar e Nagi (2005). Desta forma, adotou-se a modelagem de Dastidar e Nagi (2005) como base no presente estudo.

## 2.6 Integração do Modelo ao Ambiente Fabril

De modo complementar ao abordado, é necessário entender a arquitetura para conexão dos modelos matemáticos de otimização com os sistemas de gestão, e monitoramento *on-line* no chão de fábrica ou, ainda, alguma aplicação de *IoT* (*Internet of Things*) que viabilizem/facilitem as conexões necessárias para correto acesso a dados industriais. Dentro desse contexto, Salama e Eltawil (2018) realizaram um estudo de caso onde foi desenvolvido um processo para tomada de decisão em um ambiente caracterizado como uma indústria 4.0. De modo simplificado, indústria 4.0 é o nome dado ao conceito que engloba inovações

tecnológicas de automação, controle e tecnologia da informação, aplicadas à integração de processos de manufatura (VAIDYA, AMBAD e BHOSLE, 2018). A Figura 4 ilustra este processo de integração do modelo matemático à estrutura fabril estudado por Salama e Eltawil (2018):

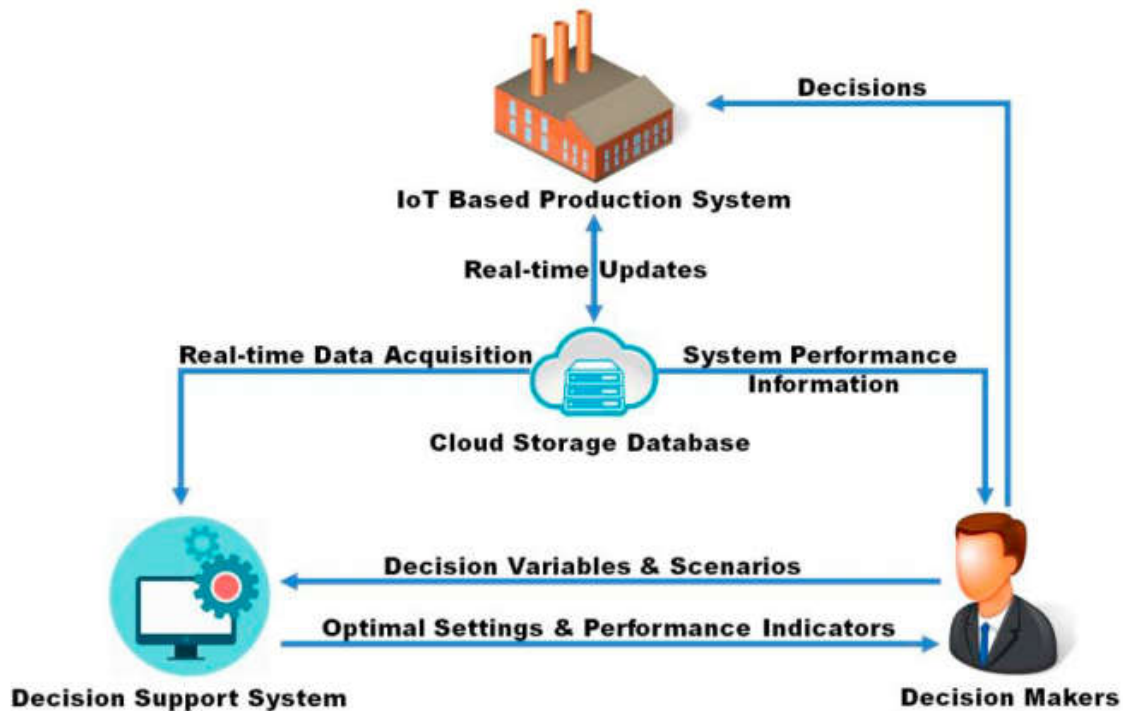


Figura 4 – Fluxo para Tomada de Decisões em uma Indústria 4.0

Fonte: Salama e Eltawil (2018)

O fluxo exemplificado na Figura 4 possui uma integração completa entre chão de fábrica, sistema de otimização e o gestor responsável pela tomada de decisão. Para que a ferramenta tenha correto funcionamento, o primeiro passo é a aquisição *on-line* dos dados diretamente do chão de fábrica.

Após a aquisição dos dados, esses são idealmente tratados e é gerado um conjunto de informações caracterizados como *big data*. Com este *big data* tem-se a próxima etapa em que, por meio de um sistema intuitivo, o tomador de decisão tem acesso *on-line* a relatórios de performance da fábrica, além de conseguir criar diferentes cenários de produção que servem como dados de entrada para o modelo de otimização. O modelo de otimização, por sua vez, retorna a solução otimizada

para cada cenário proposto, o que permite ao gestor uma análise de tomada de decisão pautada em resultados obtidos pelo modelo matemático. Este procedimento tende a fornecer, de fato, melhores soluções operacionais em relação às tomadas somente com base em experiência operacional. Ou seja, agrega-se ao processo de conhecimento normalmente utilizado as sugestões de novas soluções apontadas pelo modelo matemático, as quais são validadas e, eventualmente, modificadas pelo especialista do sistema (*decision maker*).

## **2.7 Considerações Finais do Capítulo**

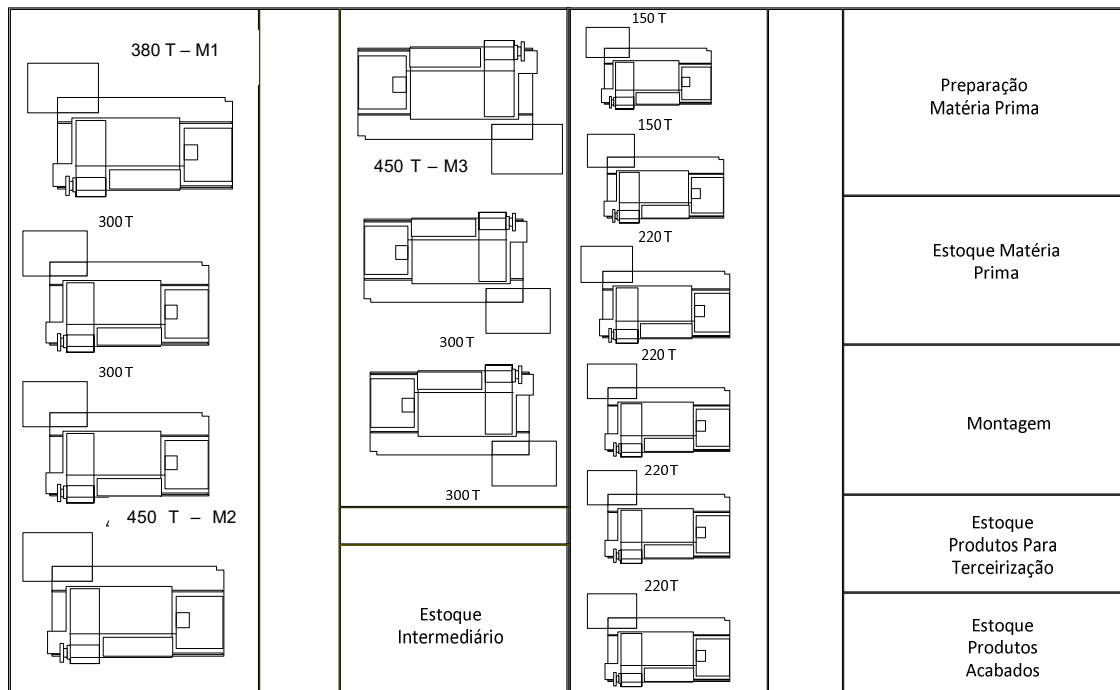
O presente capítulo apresentou noções do processo de moldagem por injeção de termoplásticos, enfatizando as tecnologias atuais deste processo fabril. Também foi realizada uma revisão na literatura sobre a manufatura enxuta e uma breve introdução sobre programação matemática. Por fim, foi apresentado o problema de dimensionamento de lotes e sequenciamento de produção e os modelos matemáticos que foram utilizados como referência para o desenvolvimento deste trabalho, bem como a integração do modelo matemático no ambiente fabril em análise. Na sequência, o Capítulo 3 detalha o problema em estudo de modo a fornecer parâmetros a serem considerados na modelagem matemática especificada no Capítulo 4.

### 3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Este trabalho é baseado em um caso prático de uma empresa que fabrica componentes moldados por injeção de termoplásticos. Neste capítulo, detalha-se o funcionamento da empresa, desde a programação de produção até as variáveis que influenciam o tempo de *setup*.

#### 3.1 Ambiente de Fabricação

Visando estabelecer um modelo matemático para programar a produção de produtos moldados por injeção, foi realizado um estudo real baseado em uma empresa situada na zona industrial da cidade de Indaiatuba-SP. A Figura 5 apresenta um croqui simplificado do *layout* de produção desta fábrica.



**Figura 5 – Layout da Fábrica em Análise**

**Fonte: Autor**

O início do fluxo produtivo se dá na preparação da matéria prima. Este setor é responsável por realizar os processos de homogeneização entre as resinas plásticas e o *masterbatch* (aditivo de alta concentração utilizado para dar cor à peça injetada), isto é, realizar a mistura entre os dois componentes de forma a não ter imperfeições no produto acabado. Quando necessário, neste setor também se retira a umidade do material granulado, processo este que ocorre normalmente com componentes fabricados em ABS (sigla para *Acrylonitrile Butadiene Styrene*, especificação de termoplástico).

O segundo estágio é a moldagem por injeção dos componentes. Os detalhes técnicos sobre injeção estão disponíveis na seção 2.1. É importante ressaltar que existem máquinas de diferentes forças de fechamento, sendo que o jargão industrial ao termo é “tonelagem de máquina”. A empresa em estudo possui quatro máquinas de 300 toneladas e 3 máquinas entre 380 e 450 toneladas (M1 a M3 na Figura 5), sendo analisado neste estudo apenas as máquinas do segundo grupo, ou seja, M1, M2 e M3.

Na sequência foram levantadas todas as peças que são fabricadas dentro desse *range* de máquinas e em quais injetoras cada peça pode ser fabricada. Os itens e a possibilidade de injeção em cada uma das 3 máquinas estão explicitados na Tabela 5, onde a marcação “X” significa que é possível injetar o componente.

**Tabela 5 – Componentes versus Possibilidade de Injeção**

<b>Componentes</b>	<b>INJ 01</b>	<b>INJ 02</b>	<b>INJ 03</b>
C1	X		
C2		X	X
C3	X	X	
C4	X		X
C5	X		X
C6		X	X
C7	X		X

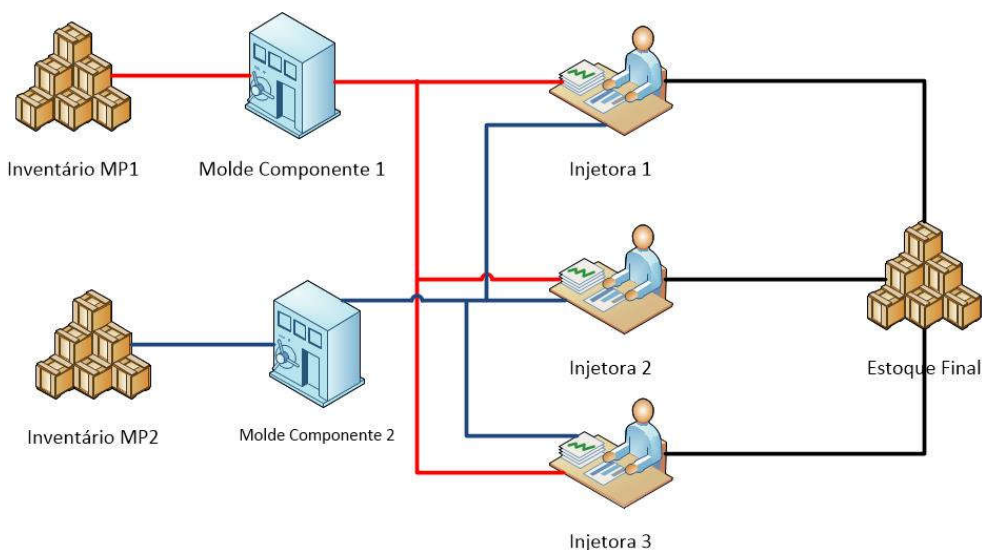
Após a saída das injetoras, os itens são encaminhados para a montagem quando necessário ou, então, diretamente para a expedição, setores que não serão estudados nesta dissertação.



### 3.2 Programação de Produção no Estudo de Caso

Dentro do contexto das empresas de produtos injetados, a agilidade e a flexibilidade no processo produtivo implica uma complexa programação de produção, devido aos pequenos tempos de entrega e elevada quantidade de itens presentes nas carteiras produtivas. No sistema produtivo em análise, a agenda de fabricação é enviada para o chão de fábrica com as datas de entrega e planos de processo (máquina a ser utilizada, tempos de processo, sequência de fabricação e volumes a serem produzidos). Na planta de fabricação em análise são encontrados diversos problemas envolvidos no processo de produção, que vão desde máquinas que necessitam de manutenção corretiva até falta de matéria prima e elevados tempos de *setup*. No contexto do presente trabalho, avalia-se a questão do dimensionamento de lotes e *setup* produtivo.

Os produtos injetados são muitas vezes componentes simples que exigem apenas um processo e podem ser fabricados em diversas máquinas similares. A Figura 6 exemplifica o fluxo produtivo de uma peça desde o inventário de matéria prima até o estoque final. Diante deste contexto, a ordenação dos moldes em cada máquina determina completamente a programação da produção.



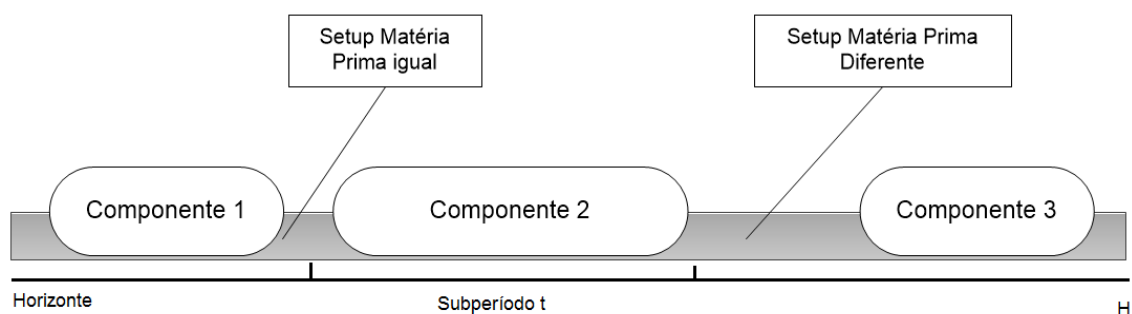
**Figura 6 – Ilustração do Fluxo Produtivo**

Fonte: O autor

Assim como em vários outros casos reais, os tempos de troca de molde em máquinas injetoras variam conforme a matéria prima que está/será utilizada para produzir os componentes. Um exemplo do caso que será estudado está explicitado na Figura 7 e Tabela 6. Em particular, na Tabela 6 é possível observar uma condição de *setup* dependente da sequência, ou seja, se um sequenciamento entre C1 e C4 for realizado o tempo é de 145 unidades; já com C4 e C1, o tempo fica em 205 unidades. Na Figura 7 ilustra-se uma condição em que o tempo de *setup* varia consideravelmente com a troca de matéria prima.

**Tabela 6 – Tempos médios de *Setup* entre os componentes (em unidades de tempo)**

Componentes	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
C1	-	115	85	120	115	145	130
C2	115	-	115	175	115	145	120
C3	85	115	-	205	115	175	115
C4	120	175	205	-	120	105	110
C5	115	115	115	120	-	145	150
C6	145	145	175	105	145	-	125
C7	130	120	115	110	150	125	-



**Figura 7 – Exemplificação de Tempos de *Setup* em Programação de Produção**

Fonte: O autor

Outro fato relevante no contexto de estudo são os prazos de entrega dos produtos, prazos estes que influenciam o sequenciamento produtivo a ser adotado. O planejador do sistema deve avaliar o sequenciamento produtivo do ponto de vista de minimização de *setup*, mas também deve ter em consideração o atendimento aos

prazos de entrega dos produtos, objetivando minorar atrasos na entrega. Deste modo, analisando o ambiente de fabricação descrito nesta seção, é possível perceber que se trata de um gerenciamento de produção onde saber quais os volumes produtivos, qual a sequência utilizada e em qual momento se deve produzir os componentes se torna fundamental para buscar uma redução nos tempos de *setup*, mantendo-se as entregas nos prazos estipulados pelos clientes.

### 3.3 Abordagem de Decomposição do Problema

Conforme comentado na seção 3.2, há necessidade de se verificar a compatibilidade de um molde poder ser injetado em diferentes tamanhos (tonelagens) de injetoras. Desta forma, o problema de sequenciamento produtivo foi dividido conforme a tonelagem das máquinas compatíveis a certos moldes: cada grupo de máquinas de uma certa tonelagem, e que pode compartilhar moldes, é isolado e o dimensionamento de lotes e sequenciamento produtivo a este grupo é realizado.

Esta segmentação do problema proposta, por sua vez, auxilia a diminuir o tamanho do modelo matemático gerado (número de variáveis e restrições), em relação a um modelo único que envolvesse todas as máquinas no chão de fábrica em um único cenário. A consequente demanda computacional do modelo decomposto em grupos de máquinas tende a ser inferior em relação a um modelo único com todas as máquinas envolvidas, ainda que esta comparação não seja realizada no presente trabalho.

Após essa divisão do problema, foram coletados em campo os dados necessários ao problema de sequenciamento produtivo. Tal coleta ocorreu por meio do *software NC System* (NC SYSTEM, 2018), o qual auxilia a empresa no gerenciamento dos processos. A Figura 8 ilustra a interface do referido *software*. Nessa figura são destacados momentos de produção, início e fim de *setup* e início e fim de paradas. Em particular, um tempo de *setup* de mais de quatro horas pode ser observado na exemplificação de coleta de dados.

11/09/2017 12:37:16	FIM DE SET-UP
11/09/2017 08:23:11	INÍCIO DE SET-UP
11/09/2017 08:22:43	FIM DE PARADA
11/09/2017 07:46:43	INÍCIO DE PARADA

**Figura 8 – Exemplo de coleta das informações por meio do Sistema de Monitoramento na Empresa**

Fonte: Autor

### 3.4 Caracterização do Produto e da Demanda

Os componentes produzidos são completamente diferentes entre si, o que faz com que existam moldes muito diferentes e também projetados de formas diferentes. Este fato, conseqüentemente, impacta diretamente nos tempos de *setup* fazendo com que exista uma grande variação de tempos de troca dependendo da sequência definida para execução.

Também se faz importante ressaltar que há demanda de mão de obra especializada para a realização das trocas dos moldes, fato que pode limitar o número máximo de trocas que podem ocorrer em um dado instante de tempo. A *posteriori*, o modelo matemático desenvolvido leva em conta esta imposição de restrições oriundas das limitações de mão de obra no chão de fábrica.

De modo complementar, as características consideradas no estudo contemplam as variáveis que são sensíveis ao processo. A primeira variável, que é fundamental para construção do modelo, é o tempo de ciclo para cada molde, aliado ao OEE (*Overall Equipment Effectiveness*) de cada máquina para cada molde.

Foi realizada uma coleta de dados de 3 meses e os resultados obtidos estão sumarizados na Tabela 7. Também foram avaliadas as demandas semanais para todos os itens, conforme solicitado pelos clientes. Estas demandas são indicadas na Tabela 8.

Tabela 7 – Produção Horária Média

Componentes	Produção Horária Média (UN/h)
C1	78
C2	84
C3	100
C4	114
C5	86
C6	106
C7	432

Tabela 8 – Demanda Semanal Média dos Componentes

Componentes	Demanda Semanal Média (UN)
C1	3500
C2	700
C3	900
C4	4500
C5	500
C6	5000
C7	30.000

### 3.5 Caracterização dos Custos

Visando quantificar os custos fabris, e também o potencial retorno financeiro do modelo matemático, fez-se necessário calcular os custos envolvidos na fabricação dos componentes moldados por injeção de termoplásticos.

O dispêndio financeiro é composto por quatro principais vertentes que são: os custos de matéria prima, transformação, estoques e pós-produção, tais como fretes e impostos. Como o modelo proposto visa programar a produção, serão considerados apenas os valores referentes à transformação do material, uma vez que a variação nas despesas com matéria prima e pós vendas, no caso estudado, não sofrem impactos significativos pelo sequenciamento de produção. Já os custos de estoque foram desprezados do estudo devido à sua baixa relevância no valor total diante dos custos de transformação envolvidos. Esta consideração pode ser comprovada através do cálculo dos valores para o caso em estudo, conforme explicitado nas equações (3.1) a (3.3):

$$C_{est} = P_{ven} * Qtd * WK \quad 3.1$$

Onde,  $C_{est}$  é Custo de Estoque,  $P_{ven}$  é o preço de venda,  $Qtd$  é a quantidade de unidades em estoque e  $WK$  é o *working capital*.

A variável  $WK$ , a qual representa o *working capital*, é conhecida como o custo da oportunidade, ou seja, caso esse dinheiro estivesse investido em outros fundos econômicos, qual seria o retorno financeiro por parte da empresa. Na indústria ele é comumente comparado ao CDI bancário e, no caso estudado, considerou-se um valor de 6,31% ao ano, alinhado aos valores médios atualmente praticados no Brasil (BC, 2018).

Como o mercado de injeção de termoplásticos no contexto em análise é muito dinâmico, as peças ficam no máximo 20 dias em estoque. De fato, na prática, observa-se uma permanência média muito inferior a 20 dias, mas procedeu-se com uma análise de pior caso. Dessa forma, o  $WK$  é estimado por meio da equação (3.2):

$$WK = \frac{CDI}{12} * \frac{20}{30} \sim 0,34\% \quad 3.2$$

Considerando a peça de maior produtividade horária, caso não fosse realizada nenhuma venda e ela fosse produzida 24 horas por dia durante os 20 dias de estoque, o total de peças produzidas seria de 207 mil e o seu preço de venda praticado hoje é de 2,50 unidades monetárias (u.m.). Desta maneira, o custo de estoque pode ser estimado pela equação (3.3):

$$C_{est} = 2,50 * 207000 * 0,34\% = 1705 \text{ u. m.} \quad 3.3$$

Como é possível observar o custo de estoque estimado será 1705 u.m. contra um faturamento de 518400 u.m., o que nos mostra que o custo de estoque pode ser desprezado no presente estudo, representando menos de 0,4% do faturamento. Ressalta-se que a empresa em análise possui um espaço limitado destinado à

armazenagem dos produtos, conforme ilustrado na Figura 5, mas as restrições referentes à número máximo de produtos a serem armazenados serão, de fato, consideradas na modelagem matemática.

Já o custo de transformação unitário dos componentes é mensurado por meio da equação (3.4): (SIEMENS,2018)

$$C_{Trans} = \frac{C_{hora}}{P_{hora}} \quad 3.4$$

Onde,  $C_{Trans}$  é o Custo de Transformação,  $C_{hora}$  é o custo horário de produção e  $P_{hora}$  é a quantidade de peças produzidas por hora. O valor  $P_{hora}$  está explicitado na Tabela 7, já o valor  $C_{hora}$  é calculado por meio da equação (3.5): (SIEMENS,2018)

$$C_{hora} = MOD + \frac{Invest+Manut.}{H_{ano}*T_{dep.}} + E_{cons.} * C_{ener} + MOI \quad 3.5$$

Onde,  $MOD$  é custo de mão de obra direta por hora,  $Invest$  é o custo de aquisição da máquina injetora,  $Manut.$  é custo de manutenção,  $H_{ano}$  é total de horas trabalhadas por ano,  $T_{dep.}$  é o tempo de depreciação da máquina,  $E_{cons.}$  é o consumo de energia elétrica,  $C_{ener}$  é o custo de energia por hora e  $MOI$  é o custo de mão de obra indireta por hora.

Na região onde a empresa está situada o custo de mão de obra direta é de 18,50 unidades monetárias por hora, já o custo de energia elétrica pago no mês de janeiro de 2018 foi de 0,50 unidades monetárias por kw/h e o  $MOI$  foi de 18,50 unidades monetárias por hora. Como nesse estudo são considerados três máquinas de moldagem por injeção distintas e de tonelagens de máquina diferentes, o investimento, a manutenção e o consumo de energia variam conforme o tamanho de cada uma delas. Os valores para cada uma das máquinas estão explicitados na Tabela 9:

Tabela 9 – Custos de Investimento, Manutenção e Consumo de Energia Elétrica

<b>Componentes</b>	<b>Investimento (UM)</b>	<b>Manutenção (UM/ano)</b>	<b>Consumo de Energia Kwh</b>
M1	500.000	5000	110
M2	1.000.000	10000	190
M3	1.000.000	10000	190

O tempo de depreciação comumente utilizado para fábricas desse ramo de atuação é de 10 anos. Considerou-se que empresa trabalha 6336 horas por ano. Dessa maneira, aplicando os valores na equação (3.5) de custo hora, obtém-se os valores apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Custos Horário por Máquina

<b>Componentes</b>	<b>Custo Horário de Produção (UM/h)</b>
Injetora 1	100
Injetora 2	150
Injetora 3	150

Os resultados dos cálculos horários em conjunto com os dados de produtividade horária da Tabela 7 forneceram os dados para a aplicação na equação do custo unitário de fabricação (Equação 3.4), onde foram calculadas as despesas unitárias de fabricação para cada componente, em cada máquina na qual é possível ter produção. Esses custos estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Custos Unitário por Peça por Máquina (UM)

<b>Componentes</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>
C1	1,28	-	-
C2	-	1,78	1,78
C3	1,00	1,50	-
C4	0,88	-	1,32
C5	1,16	-	1,74
C6	-	1,42	1,42
C7	0,23	-	0,35



### 3.6 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo, foi delimitado e explicitado o problema de dimensionamento de lotes e sequenciamento de produção para a fabricação de componentes moldados por injeção de um exemplo encontrado na indústria. Foram descritas as principais características da fábrica em estudo e dos componentes que serão estudados, bem como as diferenças nos tempos de *setup* que são encontrados na linha de produção. No próximo capítulo, será apresentada a formulação matemática do modelo proposto, a qual foi desenvolvida utilizando o ambiente de modelagem e resolução computacional IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio*.

## 4 DESCRIÇÃO DO MODELO

Conforme mencionado no Capítulo 3, o modelo matemático que mais se aproxima da problemática deste estudo acadêmico é o proposto por Dastidar e Nagi (2005). Neste capítulo, serão apresentados todos os conceitos e metodologia utilizada, assim como as adaptações feitas em relação ao modelo original.

### 4.1 Hipóteses do Modelo

Com o objetivo de tornar o problema o mais próximo da realidade faz-se necessário levar em consideração dois pontos principais:

- i. Disponibilidade de Máquina: para a correta moldagem por injeção de termoplásticos é fundamental que a máquina, molde e componente sejam compatíveis. Ou seja, para realizar a produção conforme previamente programado é necessário que o molde seja do componente, além da máquina possuir as especificações corretas para a injeção, tais como: tonelagem, distância entre colunas, temperatura de aquecimento conforme a necessidade da matéria prima e potência adequada.
- ii. Disponibilidade de matéria prima e itens agregados: um componente moldado por injeção muitas vezes é composto pela mistura entre a matéria prima base e o *masterbatch*, que comumente representa entre 3% a 7% do material a ser injetado. Somado a isso, em alguns casos é necessário agregar componentes para a entrega de subconjuntos ao cliente. Desta forma, é essencial que tanto as matérias primas já prontas para a produção quanto os possíveis itens agregados estejam disponíveis no momento da produção para que não haja paradas de linha.

No modelo proposto é considerado que tanto as máquinas quanto as matérias primas estarão disponíveis no momento que se der início efetivo a produção dos itens.

## 4.2 Descrição dos Parâmetros e Variáveis Adotadas

Nesta subseção serão apresentados os conceitos utilizados para o desenvolvimento do modelo matemático e apresentada a nomenclatura adotada.

### 4.2.1 Índices

O modelo proposto utiliza três diferentes índices para representar a realidade operacional: Itens ( $i, j = 1, \dots, P$ ), Máquinas ( $m=1, \dots, M$ ) e Períodos ( $t=1, \dots, T$ ).

O primeiro é o número de itens ou componentes ( $i, j$ ), o qual pode variar até  $P$  diferentes modelos. Já o índice  $m$  representa a máquina em análise, dentro do total de máquinas em avaliação ( $M$ ). Ressalta-se que houve consideração explícita à quantidade de máquinas disponíveis e compatíveis na fábrica, podendo-se variar a tonelage da máquina, além de alguns modelos de fabricação (vide seção 3.3, abordagem de decomposição do problema). Os períodos de tempo são representados por meio do índice  $t$ , o qual varia até  $T$  unidades, o qual representa a disponibilidade de produção, em horas, da planta industrial em estudo.

### 4.2.2 Variáveis de Decisão

No estudo proposto por Dastidar e Nagi (2005) são utilizadas três variáveis reais que auxiliam a decidir qual é a solução ótima para a problemática em análise e nessa adaptação serão também utilizadas as referidas variáveis.

A variável  $x_{imt}$  irá retornar a quantidade de componentes  $i$  que serão produzidos em determinado período de tempo  $t$  em uma máquina  $m$ . A variável  $e_{it}$  define a quantidade de peças que ficarão estocadas durante certo período de tempo  $t$ . A variável  $b_{it}$  explicita as penalidades por *backlogging*, caso o sistema não tenha capacidade de produzir toda a demanda necessária e a peça não esteja disponível em estoque. Por fim, acrescenta-se à modelagem da literatura a variável  $mod_m$ , a

qual retorna a quantidade de operadores necessários para a operação e manutenção de uma máquina  $m$ .

Além das quatro variáveis reais, também são utilizadas duas variáveis binárias. A primeira ( $\Phi_{imt}$ ) tem o objetivo de indicar em qual máquina  $m$  o componente  $i$  será produzido no tempo  $t$ . Assim, a variável  $\Phi_{imt}$  assume valor 1 quando esta relação é verdadeira, e caso seja falsa, assume o valor 0. Por fim, a variável  $\psi_{jimt}$  assume valor igual a 1 quando se faz necessário realizar a operação de *setup*, sendo que o componente  $j$  está em produção e em seu lugar será fabricado o item  $i$  na máquina  $m$  no tempo  $t$ , caso contrário, seu valor será igual a 0.

Vale notar que as variáveis binárias aqui empregadas possuem índices diferentes dos apresentados no modelo de Dastidar e Nagi (2005), fato que influencia, por exemplo, em como as restrições são formuladas. Conforme Tabela 4, as variáveis originalmente empregadas eram  $\varphi_{it}$  e  $\psi_{it}$ . Logo, modificações foram realizadas em relação à formulação original para contemplar as novas variáveis adotadas. Com as mudanças propostas nas variáveis, e na formulação, é possível determinar, por exemplo, qual máquina está configurada para a produção de um item  $i$  em um tempo  $t$  ( $\Phi_{imt}$ ) e não simplesmente que uma máquina está configurada para a produção de um item  $i$  no tempo  $t$  ( $\varphi_{it}$ , conforme modelo original). A nova proposição da variável  $\psi_{jimt}$  permite identificar de qual item para qual item ocorreu o *setup* e em qual máquina no tempo  $t$ . Conforme formulação original é possível identificar, simplesmente, que ocorreu o *setup* para a produção de um item  $i$  no tempo  $t$  ( $\psi_{it}$ ). As mudanças efetuadas trazem maior detalhamento à formulação proposta e, conseqüentemente, às respostas obtidas.

#### 4.2.3 Dados de entrada (Parâmetros)

Existe uma série de dados de entrada (parâmetros) que necessitam ser declarados para o modelo. O primeiro parâmetro  $D_{it}$  consiste na demanda do item  $i$  que é necessário produzir para o período tempo  $t$ . A capacidade produtiva da máquina  $m$  em relação ao item  $i$  é representada por  $C_{im}$ . Por sua vez, a

produtividade horária de peça associada a uma máquina  $m$  é explicitada por meio do parâmetro  $P_{im}$ .

Na operação de troca existem duas etapas principais, a primeira é a mudança da matéria prima que será injetada, que por sua vez não é realizada em todas as alterações de componentes em produção. Essa operação é representada no modelo por meio de  $\lambda_{ji}$ . A segunda etapa do processo de *setup* é a troca da matriz. Esse procedimento é realizado todas as vezes que existe alternância de componentes em produção. Essa etapa no modelo é explicitada por  $\tau_{jim}$ . Por fim, o custo total da operação é representado por  $S_{jim}$ .

Os custos de *backlogging* podem ter um impacto significativo no resultado financeiro da empresa, esse impacto é representado através de  $CB_i$ .

Na adaptação em relação ao modelo de Dastidar e Nagi (2005) foram adicionados cinco parâmetros ao modelo com o objetivo de explicitar o cotidiano do chão de fábrica. O primeiro é  $EO_i$ , o qual define a quantidade de peças já produzidas, ou seja, é o estoque inicial de produtos acabados disponíveis para a entrega. Já o parâmetro  $CU_{im}$  considera o custo de produção unitário de uma peça  $i$  em uma máquina  $m$ . O terceiro parâmetro é o  $MO_i$  que representa a quantidade de moldes disponíveis para a fabricação do item  $i$ . O quarto parâmetro adicional é denominado  $SET$ , o qual define a quantidade total de trocas de moldes e posterior preparação que um operador consegue executar em um período de análise (em unidades). O último parâmetro adicionado é o  $CT_m$ , referente ao custo do colaborador em unidades monetárias que é responsável pela operação da máquina e também por realizar as trocas de ferramental da máquina. Por fim, para garantir o correto funcionamento do modelo, o parâmetro  $\pi_{im}$ , quando assume o valor 1, garante que o componente  $i$  pode ser fabricado em uma máquina  $m$ .

A Tabela 12 a seguir sumariza os índices, parâmetros e variáveis utilizados no modelo matemático proposto, o qual é detalhado nas seções 4.3 e 4.4.

Tabela 12- Descrição dos Índices, Variáveis e Parâmetros do Modelo Proposto

	Simbologia	Descrição
Índices	$i, j = 1, \dots, P$	Itens
	$m = 1, \dots, M$	Máquinas
	$t = 1, \dots, T$	Períodos
Parâmetros	$D_{it}$	Demanda do componente $i$ para o período $t$ (em unidades ou, simplesmente, un)
	$E_{0i}$	Estoque Inicial do componente $i$ (un)
	$C_{im}$	Capacidade produtiva da máquina $m$ para o componente $i$ (em unidades de tempo, ou, simplesmente, ut)
	$P_{im}$	Produtividade do componente $i$ na máquina $m$ (un/ut)
	$\tau_{jim}$	Tempo de <i>setup</i> do componente $j$ para o componente $i$ na máquina $m$ (ut)
	$A_{ji}$	Tempo <i>setup</i> da matéria prima (ut)
	$S_{jim}$	Custo de <i>setup</i> do componente $j$ para o componente $i$ na máquina $m$ (\$)
	$CB_i$	Custo unitário de <i>backlogging</i> , ou atraso de entrega (\$/un)
	$CU_{im}$	Custo unitário de produção de uma peça $i$ em uma máquina $m$ (\$/un)
	$CT_m$	Custo do colaborador responsável pela operação da máquina (\$)
	$MO_i$	Quantidade de moldes disponíveis para injetar uma peça $i$ (em unidades de moldes)
	$BigM$	Parâmetro suficientemente grande para formulações <i>Big-M</i>
	$SET$	Quantidade total de trocas de moldes e posterior preparação que um operador consegue executar em um período de análise (em unidades)
	$\pi_{im}$	Indica se o componente $i$ pode ser fabricado na máquina $m$ ( $\pi_{im}=1$ ), caso contrário, $\pi_{im}=0$
Variáveis	$x_{imt}$	Quantidade produzida do item $i$ na máquina $m$ no período $t$ (un)
	$b_{it}$	<i>Backlog</i> do componente $i$ no período de tempo $t$ (un)
	$mod_m$	Quantidade de operadores por máquina no período total em análise
	$e_{it}$	Estoque de produtos $i$ no tempo $t$
	$\Phi_{imt}$	Variável binária. Indica que a máquina $m$ está configurada para a produção do item $i$ no período $t$ ( $\Phi_{imt} = 1$ ), caso contrário, $\Phi_{imt} = 0$
	$\psi_{jimt}$	Variável binária. Indica a ocorrência de <i>setup</i> do item $j$ para a produção do item $i$ no período $t$ na máquina $m$ ( $\psi_{jimt} = 1$ ), caso contrário, $\psi_{jimt} = 0$

Fonte: Autor.

### 4.3 Função Objetivo do Modelo

A função objetivo é dada por meio da formulação (4.1):

$$\begin{aligned} \min z = & \sum_{i,j=1}^P \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M S_{jim} \psi_{jimt} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^P CB_i b_{it} + \sum_{i=1}^P \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M CU_{im} x_{imt} \\ & + \sum_{m=1}^M CT_m mod_m \quad (4.1) \end{aligned}$$

O objetivo desta função é minimizar os custos de *setup*, *backlogging*, produção e mão de obra em relação a cada máquina. O primeiro somatório representa os custos de troca de ferramenta entre o componente  $j$  e  $i$  para uma máquina  $m$ . É importante ressaltar que a variável binária  $\psi_{jimt}$  garante a consideração correta do custo referente ao *setup*, uma vez que quando não ocorre o *setup* ela assume o valor zero e, conseqüentemente, anula essa parcela do custo.

A segunda parcela da equação representa os custos de *backlogging*. Idealmente, esta parcela deve assumir um valor nulo, indicando que a solução proposta não acarretará atrasos nas entregas de produtos (a variável binária  $b_{it}$  assumirá o valor zero). Em casos em que as capacidades fabris estão subutilizadas, provavelmente essa parcela assumirá valor zero.

O terceiro somatório visa minimizar os custos de produção de cada componente  $i$  em relação a cada máquina  $m$  que pode vir a ser utilizada no tempo  $t$ . Devido à variação no tamanho das máquinas avaliadas, e conforme explicitado na seção 3.6, faz-se necessário ressaltar que esse termo da função objetivo tem papel importante no somatório dos custos totais, visto que o dispêndio financeiro é significativamente menor na máquina de 380 toneladas, conforme Tabela 11.

Por fim o último somatório busca minimizar os custos de mão de obra. Avaliando-se de modo simplificado, a variável  $mod_m$  deve assumir o mínimo valor possível, mas pode ser necessário, por exemplo, que o número de operadores tenda

a subir para viabilizar mais trocas de moldes em uma dada máquina no período de análise.

#### 4.4 Restrições do Modelo

Visando representar as condições do ambiente fabril em análise, foram elaborados grupos de restrições que serão explicitados na sequência.

**Grupo 1 – Restrição de Balanço de Massa:** A Inequação (4.2) estabelece o correto balanço entre estoques, itens produzidos e *backlogging*. Busca-se, assim, que todos os pedidos sejam atendidos sem que um componente tenha estoque demasiadamente elevado.

$$\sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M x_{imt} - \sum_{t=1}^T e_{it} + \sum_{t=1}^T b_{it} + E_{0i} \geq \sum_{t=1}^T D_{it} \quad \forall i \in P \quad (4.2)$$

**Grupo 2 – Restrição de Capacidade de Máquina e Produtividade:** O segundo grupo de restrições envolve as inequações (4.3) e (4.4):

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^P \sum_{t=1}^T \frac{x_{imt}}{P_{im}} + \sum_{i=1}^P \sum_{t=1|t>1}^T \frac{e_{i(t-1)}}{P_{im}} \\ \leq C_{im} - \sum_{i,j=1}^P \sum_{t=1}^T (\tau_{jim} + \Lambda_{ji}) * \psi_{jimt} \quad \forall m \in M \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$x_{imt} \leq P_{im} \quad \forall i \in P, m \in M, t \in T \quad (4.4)$$

Conforme é possível observar, a restrição (4.3) impõe que a capacidade da máquina não deve ser excedida, uma vez que o parâmetro que representa a



capacidade da máquina  $C_{im}$ , em horas (ou unidades de tempo), sem considerar *setups* e outras ineficiências, será o valor máximo utilizado pelo modelo. O somatório do lado direito da inequação configura os desperdícios que estão intrínsecos ao processo produtivo, tais como tempo necessário para a troca da matriz  $\tau_{jim}$  e troca de matéria prima  $\Lambda_{ji}$ . A variável binária  $\psi_{jimt}$  garante que estes desperdícios serão contabilizados apenas quando efetivamente ocorrer a operação de *setup*. Já a restrição (4.4) garante que o modelo não irá produzir mais peças que sua capacidade real horária.

**Grupo 3 – Restrições de Uso dos Moldes:** A inequação (4.4) assegura que serão programados apenas os moldes existentes para a produção do item  $i$  na máquina  $m$  impossibilitando, assim, que ocorra uma programação de produção sem a existência de moldes disponíveis.

$$\sum_{m=1}^M \Phi_{imt} \leq MO_i \quad \forall i \in P, t \in T \quad (4.5)$$

**Grupo 4 – Restrições que Evitam Sobreposições nas Máquinas:** A inequação (4.6) assegura que apenas um componente possa ser produzido por vez em cada máquina. Esta restrição é fundamental para o correto funcionamento do modelo, uma vez que é impossível produzir itens que possuam moldes diferentes na mesma máquina.

$$\sum_{i=1}^P \Phi_{imt} \leq 1 \quad \forall m \in M, t \in T \quad (4.6)$$

**Grupo 5 – Grupo de Restrições para Determinação de *Setup*:** O conjunto de restrições (4.7), (4.8), (4.9) e (4.10) representa, por meio das variáveis binárias  $\psi_{jimt}$  e  $\Phi_{imt}$ , quando existe a ocorrência de *setup*. De fato, a variável  $\psi_{jimt}$  assume o valor de um “e lógico” (*and* lógico) entre as variáveis binárias  $\Phi_{imt}$  e  $\Phi_{jm(t-1)}$ .

$$\psi_{jimt} \geq \Phi_{imt} + \Phi_{jm(t-1)} - 1 \quad \forall i, j \in P, m \in M, t \in T | t > 1 \quad (4.7)$$

$$\psi_{jimt} \leq \Phi_{imt} \quad \forall i, j \in P, m \in M, t \in T | t > 1 \quad (4.8)$$

$$\psi_{jimt} \leq \Phi_{jm(t-1)} \quad \forall i, j \in P, m \in M, t \in T | t > 1 \quad (4.9)$$

$$\psi_{jimt} = 0 \quad \forall i, j \in P, m \in M, t \in T | t = 1 \quad (4.10)$$

**Grupo 6 – Restrições para Determinação do Uso de Máquinas em Cada Unidade de Tempo e Quantidade de Setups Semanais:** O conjunto de inequações entre (4.11) a (4.13) tem como função garantir que a variável binária  $\Phi$  assume sempre o valor um quando existe uma peça em produção em uma máquina. Para tanto foi utilizada a metodologia *Big-M*. Já a inequação (4.14) garante que o número de *setups* realizados no horizonte de tempo em análise (no caso estudado, uma semana) será menor que o parâmetro *SET* multiplicado pela quantidade de operadores definidos por meio da variável *mod<sub>m</sub>*. Por fim a inequação 4.15 garante que pelo menos um operador por máquina seja alocado no modelo, uma vez que, na prática, é necessário ter esse operador para efetuar potenciais manutenções não previstas e, também, garantir a correta operação da máquina.

$$\sum_{i=1}^P \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \Phi_{imt} \leq BigM \quad (4.11)$$

$$x_{imt} \geq \Phi_{imt} \quad \forall i \in P, m \in M, t \in T \quad (4.12)$$

$$x_{imt} \leq BigM * \Phi_{imt} \quad \forall i \in P, m \in M, t \in T \quad (4.13)$$

$$\sum_{i,j=1}^P \sum_{t=1}^T \psi_{jimt} \leq SET * mod_m \quad \forall m \in M \quad (4.14)$$

$$mod_m \geq 1 \quad \forall m \in M \quad (4.15)$$

**Grupo 7 – Restrições para Determinação do Domínio das Variáveis:** Por fim, as restrições (4.16), (4.17) e (4.18) limitam os domínios de cada conjunto de variáveis.

$$\Phi_{imt} \in \{0,1\} \quad (4.16)$$

$$\psi_{jimt} \in \{0,1\} \quad (4.17)$$

$$mod_t \in Z_+ \quad (4.18)$$

$$x_{imt}, e_{it}, b_{it} \geq 0 \quad \forall i \in P, m \in M, t \in T \quad (4.19)$$

Com o objetivo de automatizar o planejamento e controle de produção, foi proposto nesse capítulo uma formulação matemática apresentada nas expressões (4.1) a (4.19). Apesar de ter tomado como base o processo de fabricação de moldagem por injeção de termoplásticos, esta modelagem pode ser utilizada em outros processos produtivos similares como, por exemplo, estampagem de materiais metálicos.

Sendo assim, uma contribuição deste trabalho acadêmico é propor um modelo matemático que, além de auxiliar a redução de custos em processos de injeção plástica, também permite solucionar problemas em outros campos da produção industrial, mediante customizações de parâmetros de entrada.

O Capítulo 5 a seguir traz resultados computacionais obtidos pela aplicação do referido modelo ao cenário de estudo, bem como discute os resultados obtidos, além de realizar estudos sobre as possíveis dificuldades computacionais do modelo com o crescimento dos cenários de entrada avaliados.

## 5 RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se os resultados dos testes realizados. O primeiro conjunto de testes, detalhado nas seções 5.1 e 5.2 utilizou dados reais da planta fabril e explicita uma comparação entre os custos reais e o custo que seria obtido por meio da solução do modelo matemático proposto. As principais questões avaliadas são: sequência de produção, quantidade de *setups* realizados e o custo de fabricação individual de cada peça em sua respectiva máquina. A análise destes resultados permite identificar qual é o sequenciamento de produção otimizado, visando sempre o menor custo, e que atenda às demandas de produção, minimizando o *backlogging*.

Já o segundo conjunto de testes, detalhado na seção 5.3, visa estudar a escalabilidade do modelo proposto em relação à carga computacional usando uma série de dados fictícios. Objetiva-se evidenciar os limites computacionais do modelo com as variações de parâmetros de entrada. As principais questões avaliadas são: (i) o tempo para convergência variando a quantidade de produtos a serem produzidos em um conjunto de máquinas  $m$ ; e (ii) a convergência do modelo quando ocorrem variações das demandas totais comparadas às capacidades de fabricação das  $m$  máquinas.

Ressalta-se que durante o processo de validação do modelo de dimensionamento de lotes e sequenciamento de produção por meio de PLIM, foram inicialmente realizados inúmeros testes com parâmetros simbólicos (condições simplificadas), tendo em vista analisar as respostas do modelo para diversas situações e, adicionalmente, buscando-se verificar a abrangência da formulação proposta. Após a etapa de testes iniciais e validação, realizou-se uma análise com dados históricos relativos a duas semanas de produção no cenário em estudo. Obteve-se, então, a melhor sequência de produção para as demandas para o período de observação. Os fatores analisados foram, em essência: o sequenciamento de produção e o custo de produção total nestas duas semanas, conforme detalhado nas seções 5.1 e 5.2 a seguir apresentadas.

## 5.1 Sequenciamento de Produção

Para o dimensionamento de lotes e sequenciamento de produção das máquinas da família de 450 toneladas foram feitas duas execuções (“simulações de cenário”) sendo denominadas S1 e S2. A simulação S1 representa a semana de trabalho entre 21/01/2018 e 27/01/2018 e S2 a semana entre 28/01/2018 e 03/02/2018. Desta maneira, tem-se análise de 14 dias de produção que foram extraídas dentro do espaço amostral de 90 dias coletados e explicitados no Capítulo 3, sendo consideradas as flutuações das ordens de venda.

Todas as execuções foram realizadas utilizando-se o ambiente de modelagem e otimização IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio* 12.6 (OPL, 2017), executado em um computador com sistema operacional Windows 10, 64 bits, Intel i7-4510U, 2.00GHz (2 CPUs), 16GB RAM. Para a resolução do referido estudo de caso, o modelo matemático gerado e resolvido por meio do *solver* continha para as semanas 1 e 2, respectivamente, 12442 variáveis, 8437 destas sendo binárias e 28661 restrições. Os tempos computacionais até a obtenção das soluções ótimas foram inferiores a 60 minutos em todas as execuções realizadas.

Uma vez que o processo de injeção plástica é dinâmico e flexível, as demandas semanais de entrega também sofrem variação, conforme o período temporal em análise. Diante disso, a Tabela 13 explicita as demandas da unidade fabril que foram utilizadas nas simulações S1 e S2. Já a Tabela 14 indica os estoques iniciais dos componentes na semana 1.

Tabela 13 – Demandas para Semana 1 e Semana 2

Componentes	Demanda S1	Demanda S2
C1	4516	4025
C2	0	0
C3	0	0
C4	5000	4500
C5	0	450
C6	4000	4000
C7	26689	31072

Tabela 14 – Estoque Inicial Semana 1

Componentes	Estoque
C1	2200
C2	1000
C3	3000
C4	2000
C5	0
C6	7000
C7	15100

Já os estoques iniciais da semana 2, são obtidos de forma trivial por meio da diferença entre peças produzidas, estoque inicial da semana 1 e demanda. Os valores para estoque inicial da semana 2 estão na Tabela 15:

Tabela 15 – Estoque Inicial Semana 2

Componentes	Estoque Inicial S1	Produção S1	Demanda S1	Estoque S2
C1	2200	2654	4516	138
C2	1000	0	0	1000
C3	3000	0	0	3000
C4	2000	3314	5000	314
C5	0	0	0	0
C6	7000	0	4000	3000
C7	15100	12300	26689	711

### 5.1.1 Programação de Produção Semana 1

Por meio do *software NC System* (NC SYSTEM, 2018) foi possível recriar a agenda de produção para os 14 dias em que foram feitas as simulações numéricas.

Entre a Figura 9 e a Figura 11 é apresentado o sequenciamento de produção realizado pela empresa (agendamento de produção), usado como referência para a simulação S1. Ressalta-se que, por questões de legibilidade, a escala gráfica é representada em partes: da hora 1 a 48; da hora 49 a 96; e, finalmente, da hora 97 a 143. De modo complementar, representa-se ao lado esquerdo do respectivo eixo temporal em análise os tempos relativos de início no eixo da produção (ou ausência de produção). Lógica similar é empregada em outras representações de agendamento da produção no documento.

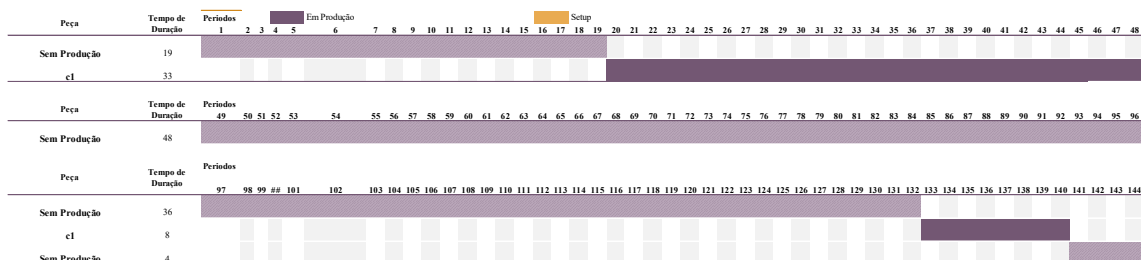


Figura 9 – Agenda de Produção Realizada na Máquina 1 entre as horas 1 e 144 Semana 1

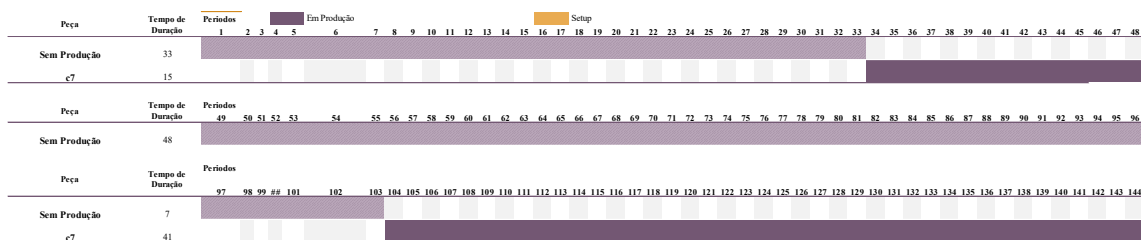


Figura 10 - Agenda de Produção Realizada na Máquina 2 entre as horas 1 e 144 Semana 1

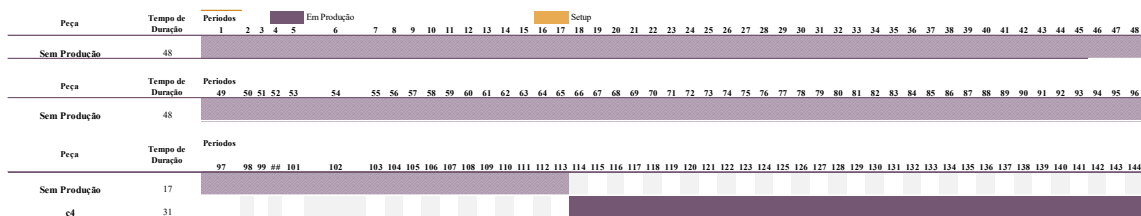


Figura 11 - Agenda de Produção Realizada na Máquina 3 entre as horas 1 e 144 Semana 1

Como é possível observar na agenda de produção representada da Figura 9 à Figura 11, a fábrica em estudo passa por um momento de ociosidade das suas linhas de produção. Dessa forma, o profissional responsável pela elaboração da agenda de produção tem espaço e tempo suficiente para evitar *setups* e, conseqüentemente, diminuir os desperdícios com este quesito.

Para essa semana todas as máquinas produziram apenas um item em cada uma delas, sendo que havia disponibilidade de peças em estoque do item C6 e não se fez necessário colocá-lo em produção. Já entre a Figura 12 e a Figura 14 são apresentados os resultados encontrados por meio do modelo em PLIM proposto.

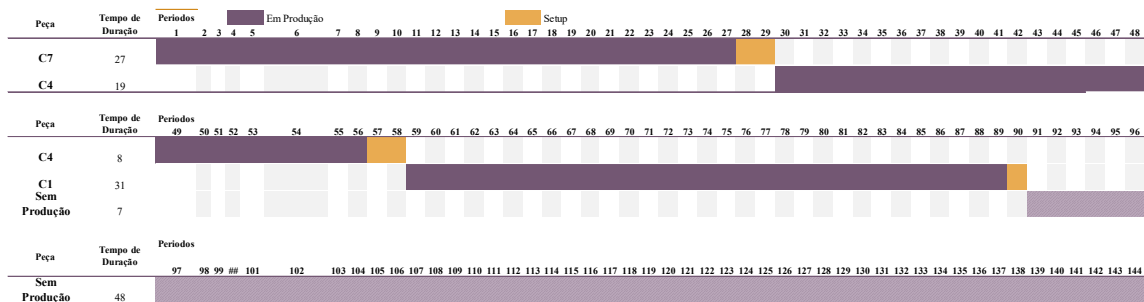


Figura 12 – Agenda de Produção Simulada Máquina 1 entre as horas 1 e 144 Semana 1

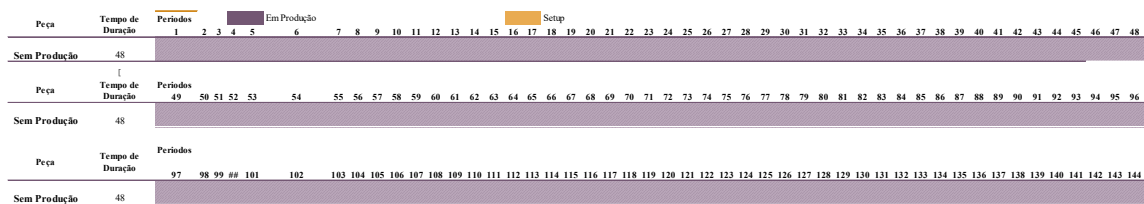


Figura 13 - Agenda de Produção Simulada Máquina 2 entre as horas 1 e 144 Semana 1

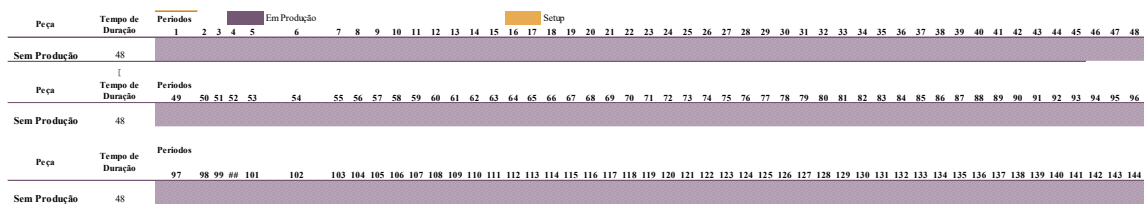


Figura 14 - Agenda de Produção Simulada Máquina 3 entre as horas 1 e 144 Semana 1

O modelo trouxe uma sugestão de mudança na operação das máquinas. Sugere-se utilizar apenas a máquina 1, que conforme descrito na seção 3.5, tem custo de operação menor que as outras máquinas. Dessa maneira, as máquinas 2 e 3 permaneceram desligadas. Salienta-se que, para o componente c6, o estoque inicial foi suficiente para atender à demanda.



### 5.1.2 Sequenciamento de Produção Semana 2

Utilizando a mesma metodologia da seção 5.1.1, estão explicitadas entre a Figura 15 e a Figura 17 as programações de produção realizadas pela empresa, mas agora para a segunda semana de análise:

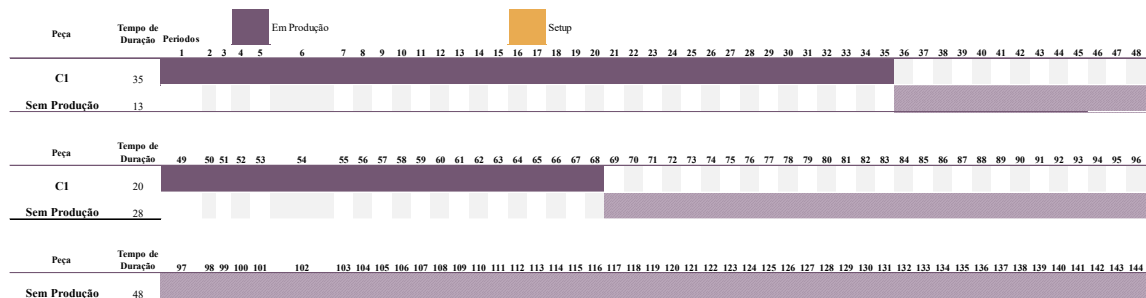


Figura 15 – Agenda de Produção Realizada na Máquina 1 entre as horas 1 e 144 Semana 2

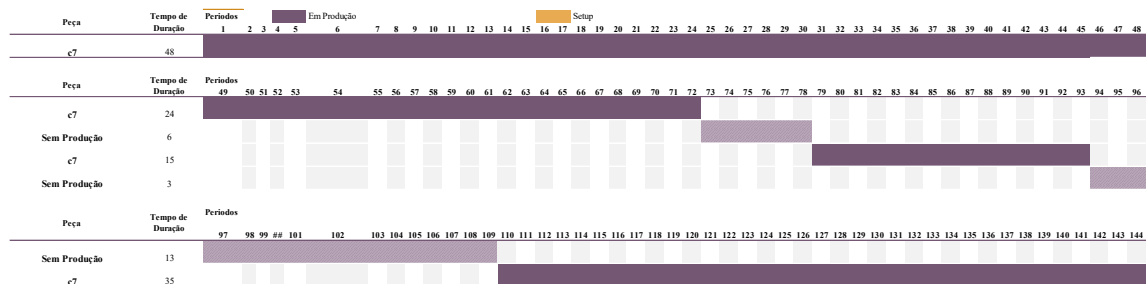


Figura 16 - Agenda de Produção Realizada na Máquina 2 entre as horas 1 e 144 Semana 2

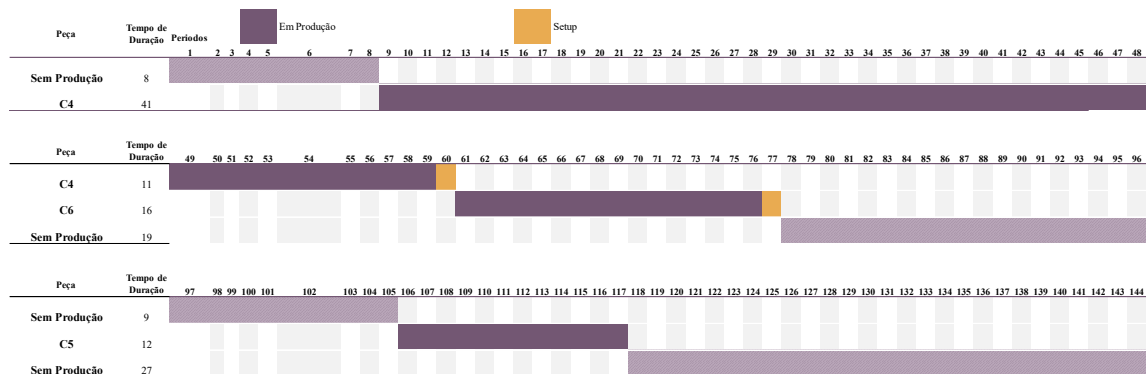
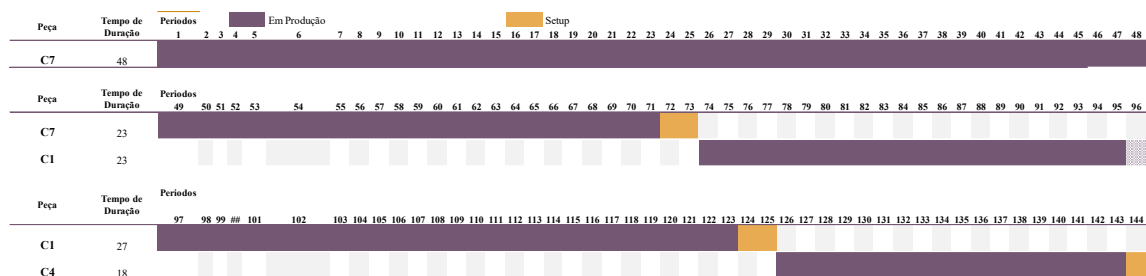


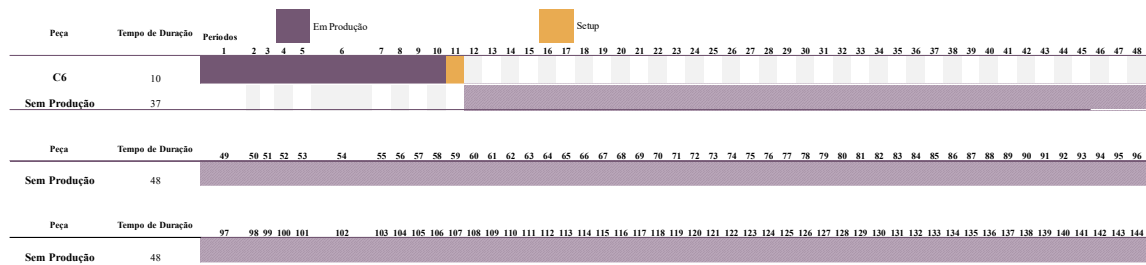
Figura 17 - Agenda de Produção Realizada na Máquina 3 entre as horas 1 e 144 Semana 2

Assim como na agenda de produção da primeira semana, as máquinas estão ociosas. Dessa maneira novamente o profissional responsável pela elaboração da programação de produção teve tempo suficiente para continuar evitando os *setups*.

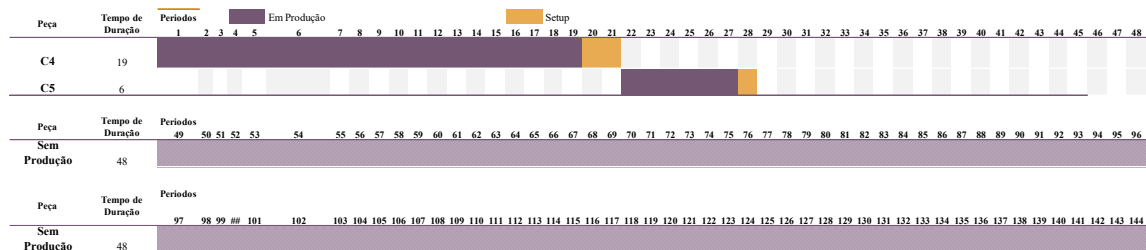
Para essa semana as máquinas 1 e 2 produziram apenas um item em cada uma delas, enquanto a máquina 3 produziu os itens C4, C5 e C6. Já entre a Figura 18 e a Figura 20 são apresentados os resultados encontrados por meio do modelo PLIM.



**Figura 18 – Agenda de Produção Simulada Máquina 1 entre as horas 1 e 144 Semana 2**



**Figura 19 - Agenda de Produção Simulada Máquina 2 entre as horas 1 e 144 Semana 2**



**Figura 20 - Agenda de Produção Simulada Máquina 3 entre as horas 1 e 144 Semana 2**

Assim como na semana 1, o modelo ocupou toda a capacidade fabril da máquina 1, que conforme descrito na seção 3.5, tem custo de operação menor que

as outras máquinas. Dessa maneira a máquina 2 produziu as peças do modelo C6 na quantidade exata para atender a demanda de entrega; já a máquina 3 produziu a quantidade residual do componente C4 e também o volume C5, entretanto essa carga de produção foi bem pequena sendo a utilização da máquina inferior a 30% do tempo total disponível para produção.

## **5.2 Custo total de fabricação**

Nesta seção é analisado como o custo de fabricação unitário das peças entre as diferentes máquinas influencia no resultado financeiro da empresa em estudo. Para tanto, segue-se os cálculos de custo ilustrados na seção 3.5.

### **5.2.1 Custos de Fabricação Semana 1**

Os custos de fabricação para a produção realizada e para as simulações são apresentados na Tabela 16 e Tabela 17, respectivamente, para a semana 1.

Tabela 16 – Custos Totais de Fabricação Realizado Semana 1

Componentes	Demanda (un)	Peças Produzidas (un)	Máquina Utilizada	Horas Trabalhadas	Custo Hora (\$/H)	Custo Total (\$)
C1	4516	2664	1	41	100	4100
C2	-	-	-	-	-	-
C3	-	-	-	-	-	-
C4	5000	3314	3	31	150	4650
C5	-	-	-	-	-	-
C6	4000	-	-	-	-	-
C7	26689	12300	2	56	150	8400
Total				128		17150

Tabela 17 – Custos Totais de Fabricação Simulado Semana 1

Componentes	Demanda (un)	Peças Produzidas (un)	Máquina Utilizada	Horas Trabalhadas	Custo Hora (\$/H)	Custo Total (\$)
C1	4516	2574	1	32	100	3100
C2	-	-	-	-	-	-
C3	-	-	-	-	-	-
C4	5000	3078	1	29	100	2900
C5	-	-	-	-	-	-
C6	4000	-	-	-	-	-
C7	26689	11644	1	29	100	2900
Total				90		8900

Analisando os resultados apresentados, observam-se diferenças significativas entre os custos realizados e o custo ótimo apresentado pelo modelo. Nesse caso a diferença entre esses custos se deve à programação de produção em que o operador responsável não utilizou a capacidade total da máquina 1, mas evitou a realização de *setups*. É importante ressaltar que os custos de *setups* foram considerados dentro do tempo total de produção, ou seja, na coluna horas trabalhadas na Tabela 16 e na Tabela 17 tem-se a soma das horas com as operações de injeção com o tempo de troca do ferramental. Também é possível perceber que com a alta ociosidade a empresa perde produtividade como, por exemplo, no caso do item C7, para o qual o ritmo de produção foi 50% de sua capacidade nominal.

Com o auxílio do modelo percebe-se que o ideal é utilizar toda a capacidade de produção da máquina 1, uma vez que o dispêndio financeiro da empresa é menor realizando *setups* e consolidando os volumes nesta máquina do que não realizar *setups* e utilizar todas as máquinas. Por fim, a economia financeira da empresa em estudo, caso tivesse utilizado a programação conforme explicitado pelo modelo, seria de 8250 unidades monetárias nessa semana.

### 5.2.2 Custos de Fabricação Semana 2

Os custos de fabricação para a produção realizada e para as simulações são apresentados nas Tabela 18 e Tabela 19, respectivamente, para a semana 2.

**Tabela 18 – Custos Totais de Fabricação Realizado Semana 2**

Componentes	Demanda (un)	Peças Produzidas (un)	Máquina Utilizada	Horas Trabalhadas	Custo Hora (\$/H)	Custo Total (\$)
C1	4025	4000	1	55	100	5500
C2	0	-	-	-	-	-
C3	0	-	-	-	-	-
C4	4500	5928	3	53	150	7950
C5	450	1036	3	12	150	1800
C6	4080	1696	3	17	150	2550
C7	31072	40076	2	122	150	18300
Total						36100

**Tabela 19 – Custos Totais de Fabricação Simulado Semana 2**

Componentes	Demanda (un)	Peças Produzidas (un)	Máquina Utilizada	Horas Trabalhadas	Custo Hora (\$/H)	Custo Total (\$)
C1	4025	3887	1	52	100	5200
C2	0	-	-	-	-	-
C3	0	-	-	-	-	-
C4	4500	2052	1	19	100	1900
		2166	3	21	150	3150
C5	450	450	3	7	150	1050
C6	4000	1000	2	11	150	1650
C7	31072	30361	1	73	100	7300
Total				181		20250

Analisando os resultados apresentados, observam-se diferenças significativas entre os custos realizados e o custo ótimo apresentado pelo modelo, de forma muito similar à semana 1. Nesse caso a diferença entre esses custos também se deve à não consolidação de volumes na máquina de menor custo e também à superprodução dos itens. Novamente, com o auxílio da simulação percebe-se que o ideal é utilizar toda a capacidade de produção da máquina 1, uma vez que o dispêndio financeiro da empresa é menor realizando *setups* e consolidando os volumes nesta unidade fabril do que não realizar *setups* e utilizar todas as máquinas.

Por fim, a economia financeira da empresa em estudo caso tivesse utilizado a programação conforme explicitado pelo modelo seria de 15250 unidades monetárias nessa semana. Quando consideramos o somatório entre as economias geradas entre as duas semanas temos o valor de 23500 unidades monetárias ou 44% de todo o custo fabril, o que traria maior competitividade e também melhor rentabilidade, considerando-se um mercado com margens extremamente apertadas, como é o ramo da injeção de termoplásticos.

### **5.3 ESCALABILIDADE DO MODELO**

O mercado de injeção plástica é dinâmico e competitivo. Existem inúmeras empresas no Brasil e no mundo que fornecem peças para grandes companhias ou as vendem no mercado com suas próprias marcas. Diante desse contexto, é fundamental entender a escalabilidade e os limites computacionais do modelo para a aplicação em diversos cenários produtivos.

Com o objetivo de padronizar as simulações computacionais efetuadas, todos os testes apresentados foram executados em um computador Windows 10, 64 bits, Intel i7-4510U, 2.00GHz (2 CPUs), 16GB RAM. É importante ressaltar que o computador estava com configuração definida para “alto desempenho”, logo sem diminuições de processamento devido a configurações que priorizassem economia de energia. Deste modo, as variações no tempo computacional são ocasionadas por diferenças das demandas na execução do modelo.

Visando representar uma situação real onde os planejadores têm que tomar decisões rápidas de ajustes na produção, foi definido dentro do modelo um tempo limite de execução (*timeout*) de 5 minutos. Nesse tempo se espera que o modelo atinja *gap's* de convergência suficientemente baixos para otimizar o agendamento de produção. Após a definição das condições de execução, foram realizadas quatro baterias de experimentos, onde em cada experimento o tempo total em horas para o atendimento da demanda era mantido constante, enquanto era variado o número de produtos que podem ser injetados naquele conjunto de máquinas. No primeiro experimento o tempo total para satisfazer a demanda foi de 113 horas por máquina, contra uma disponibilidade de 143 horas (ocupação de, aproximadamente, 78%). No segundo, este mesmo tempo foi de 140 horas (ocupação de 98%); por fim no terceiro e quarto experimentos era necessário que as máquinas trabalhassem 170 e 320 horas, respectivamente, para entregar as demandas (ocupações de, respectivamente, 119% e 224%). Desta forma, um atraso na entrega dos produtos era inevitável. A partir das condições descritas, as demandas entre os produtos foram balanceadas de forma a atender a carga máquina para cada um dos experimentos, alcançando os resultados que estão indicados nas Tabela 20 a Tabela 23.

**Tabela 20 – Análise Dados de Saída para Ocupação de 78% das Máquinas**

Componentes	Tempo de Simulação (s)	GAP Convergência (%)	Variáveis Binárias	Outras Variáveis	Restrições
5	116	0	11011	3862	36350
6	140	0	15444	4291	50022
7	300	3,27%	21021	5006	67254

**Tabela 21 – Análise Dados de Saída para Ocupação de 98% das Máquinas**

Componentes	Tempo de Simulação (s)	GAP Convergência (%)	Variáveis Binárias	Outras Variáveis	Restrições
5	300	65,24%	11011	3862	36350
6	300	89,10%	15444	4291	50022
7	300	40,21%	21021	5006	67254

Tabela 22 – Análise Dados de Saída para Ocupação de 119% das Máquinas

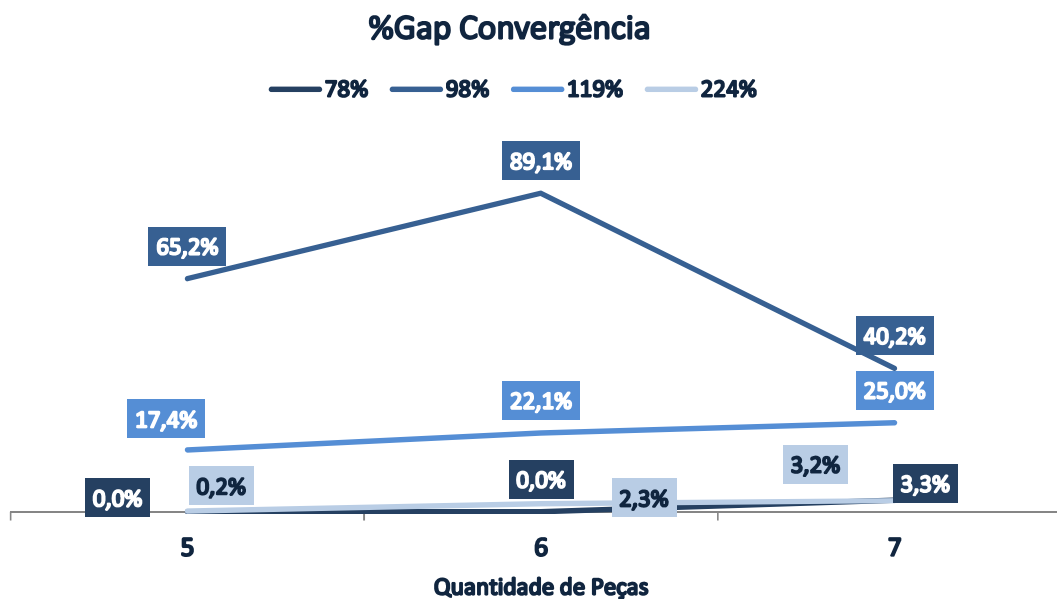
Componentes	Tempo de Simulação (s)	GAP Convergência (%)	Variáveis Binárias	Outras Variáveis	Restrições
5	300	17,35%	11011	3862	36350
6	300	22,10%	15444	4291	50022
7	300	24,96%	21021	5006	67254

Tabela 23 – Análise Dados de Saída para Ocupação de 224% das Máquinas

Componentes	Tempo de Simulação (s)	GAP Convergência (%)	Variáveis Binárias	Outras Variáveis	Restrições
5	300	0,20%	11011	3862	36350
6	300	2,31%	15444	4291	50022
7	300	3,15%	21021	5006	67254

Como é possível observar entre a Tabela 20 e a Tabela 23, para os casos testados, a inclusão de demandas de novas peças no modelo, mantendo-se as cargas das máquinas estáveis (respectivamente, 78%, 98%, 119% e 224%), gerou condições em que o *gap* entre a solução ótima e a apresentada após 5 minutos manteve-se na mesma ordem de grandeza. A fim de facilitar a visualização dessa observação, foram plotados os gráficos entre quantidade de produtos e *gap* de convergência para os quatro casos em estudo. Estes gráficos estão explicitados na Figura 21:





**Figura 21 – Gráfico *Gap* de Convergência x Quantidade de Peças Simuladas no Modelo de acordo com as ocupações de máquina (78%, 98%, 119% e 224%)**

Os resultados ilustrados na Figura 21 sugerem, a princípio, que o modelo não mostrou ter significativa dificuldade em escolher qual a melhor sequência de produção para vários itens, desde que o tempo em horas para atendimento da demanda não fosse próximo ou superior à capacidade das máquinas. Entretanto, após essa análise os mesmos resultados foram rearranjados, sendo apresentada a variação no tempo computacional, variando as cargas das máquinas no modelo para a mesma quantidade de itens. Estes valores estão apresentados entre a Tabela 24 e a Tabela 26.

**Tabela 24 – Análise Dados de Saída para 5 componentes no modelo.**

Carga Máquina	Tempo de Simulação (s)	GAP Convergência (%)	Variáveis Binárias	Outras Variáveis	Restrições
78%	116	0,00%	11011	3862	36350
98%	300	65,24%	11011	3862	36350
119%	300	17,35%	11011	3862	36350
224%	300	0,20%	11011	3862	36350

Tabela 25 – Análise Dados de Saída para 6 componentes no modelo.

Carga Máquina	Tempo de Simulação (s)	GAP Convergência (%)	Variáveis Binárias	Outras Variáveis	Restrições
78%	140	0,00%	15444	4291	50022
98%	300	89,10%	15444	4291	50022
119%	300	22,10%	15444	4291	50022
224%	300	2,31%	15444	4291	50022

Tabela 26 – Análise Dados de Saída para 7 componentes no modelo.

Carga Máquina	Tempo de Simulação (s)	GAP Convergência (%)	Variáveis Binárias	Outras Variáveis	Restrições
78%	300	3,27%	21021	5006	67254
98%	300	40,21%	21021	5006	67254
119%	300	24,96%	21021	5006	67254
224%	300	3,15%	21021	5006	67254

A análise da Tabela 24 à Tabela 26, sugere que o modelo encontra dificuldades para atingir a otimalidade quando a ocupação das máquinas está próxima a 100%. Este fato ocorre, possivelmente, por existirem inúmeras soluções diferentes que têm resultados da função objetivo muito próximas entre si, causando degenerescência numérica. Visando entender esse comportamento de convergência de forma gráfica, foram plotados os gráficos indicados na Figura 22.

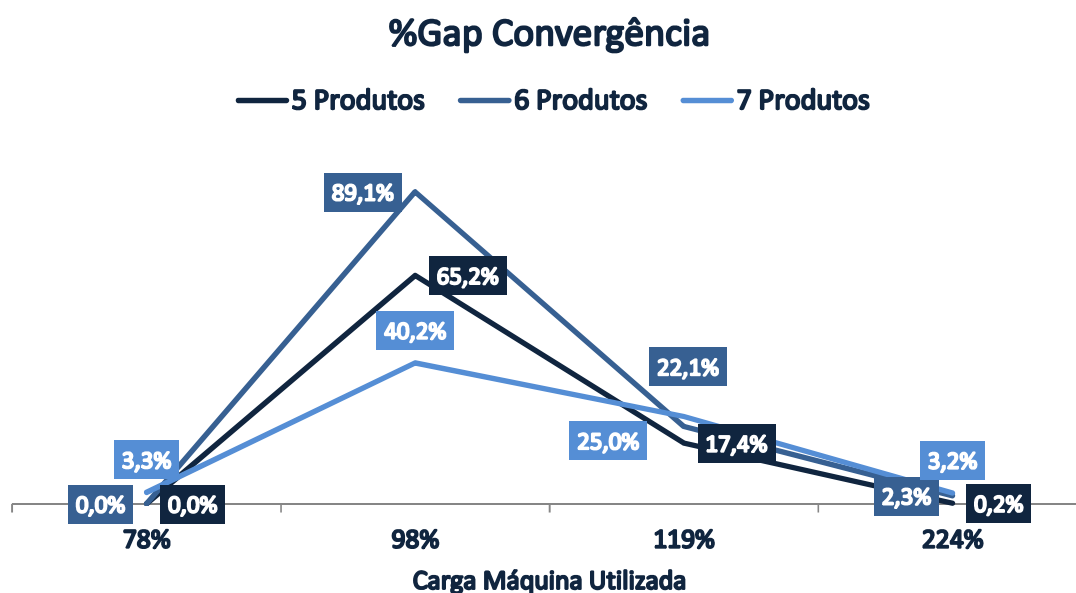


Figura 22 - Gráfico Gap de Convergência x Quantidade de Peças para 5, 6 e 7 itens.

Como é possível observar nas séries de dados explicitadas no gráfico da Figura 22, o modelo perde desempenho para situações onde a utilização da máquina é muito próxima a 100%, tanto com ou sem atraso na produção. Este efeito deve-se principalmente à dificuldade em definir quais componentes serão produzidos na máquina que tem menor custo horário e também aos custos de *backlogging* que são iguais para todos os itens que são injetados na fábrica. Os custos de *backlogging* foram considerados iguais para todos os itens porque as indústrias de injeção, em geral, pagam multas por paradas de linha nos clientes, independentemente do componente que foi atrasado. Também é importante ressaltar que o valor da multa é significativamente maior que os custos de fabricação. Dessa maneira, o valor de multas por atraso tem maior impacto na função objetivo, o que gera a dificuldade do modelo em convergir.

Por outro lado, a partir do momento em que o atraso é muito grande (e inevitável) o modelo volta a convergir de forma rápida. Isso ocorre porque ele deixa de produzir automaticamente toda a demanda dos itens que têm custo de produção unitário mais alto e conseqüentemente produtividade menor, priorizando itens mais baratos e também que têm um volume de produção horário maior (vide Tabela 7), fato que evita o pagamento de multas de maior valor. Esta escolha é interessante e muitas vezes não é levada em consideração no chão de fábrica, uma vez que objetivo é sempre produzir os itens de maior valor agregado e, conseqüentemente, com maiores custos de produção.

## 6 CONCLUSÃO

### 6.1 Considerações Finais

Este trabalho abordou o problema de programação de produção em uma fábrica de componentes moldados por injeção plástica. Foi proposto um modelo matemático em Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para resolver o dimensionamento de lotes e o sequenciamento produtivo, considerando-se os custos produtivos, de *backlogging* e de *setup*. Este modelo desenvolvido teve por base o modelo em PLIM proposto por Dastidar e Nagi (2005) com a inclusão dos custos de fabricação unitários por máquina e algumas restrições adicionais, tais como a quantidade de moldes disponíveis para injeção dos componentes e também a quantidade máxima de *setups* por período de tempo em análise que um operador é capaz de realizar.

Os resultados obtidos mostram uma redução de aproximadamente 24400 unidades monetárias no custo em um intervalo de duas semanas de operação do conjunto de máquinas selecionadas. A solução otimizada acarreta uma redução de aproximadamente 46% no custo em relação à solução baseada na experiência do operador. Além disto, estima-se um ganho financeiro de 500000 unidades monetárias no intervalo de 12 meses, com o uso da solução otimizada.

Os ensaios de escalabilidade do modelo foram realizados alterando-se parâmetros de entrada como: número de produtos envolvidos no sequenciamento produtivo e taxa de ocupação das máquinas. Os resultados obtidos permitiram evidenciar que a carga computacional tende a aumentar nos casos em que a ocupação das máquinas está próxima a 100%.

Por fim, o desenvolvimento da presente dissertação demonstra a importância do correto dimensionamento e sequenciamento da agenda de produção, principalmente em um mercado competitivo e de margens apertadas como é o caso das indústrias de injeção de termoplásticos.

## 6.2 Trabalhos Futuros

Para a continuidade do estudo desta dissertação recomenda-se a implementação da simulação online o sequenciamento e dimensionamento da produção, a inclusão de características operacionais não abordadas neste trabalho, tais como o custo de capital imobilizado de matérias primas estocadas além de uma interface intuitiva para a entrada de dados e simulações de cenários por parte dos tomadores de decisão.

A metodologia desenvolvida nesta dissertação pode ser aplicada em outros ramos da indústria de base, tais como o mercado de estampagem de peças em aço, o qual também sofre com inúmeros *setups*, margens apertadas e um forte mercado competidor.

## REFERÊNCIAS

BLACK, J.T. **O projeto da fábrica com futuro**. Tradução de Gustavo Kannenberg. Porto Alegre: Artes Médicas, 1998.

BLASS, Arno. **Processamento de polímeros**. Florianópolis: Editora UFSC, 1988.

BC – Banco Central do Brasil. **Taxa Selic**. Disponível em: <  
<https://www.bcb.gov.br/Pec/Copom/Port/taxaSelic.asp>>. Acesso: 06/11/2018

BRAGLIA, M.; FROSOLINI, M.; ZAMMORI, F. **Overall equipment effectiveness of a manufacturing line (OEEML) - an integrated approach to assess systems performance**. Journal of Manufacturing Technology Management, v. 20, n. 1, p. 8-29, 2009.

CAUCHICK MIGUEL, PAULO AUGUSTO ET AL. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações** - Elsevier - 2012.

DASTIDAR, S.G.; NAGI, R. **Scheduling injection molding operations with multiple resource constraints and sequence dependent setup times and costs**. Computers and Operations Research, v. 32, p. 2987-3005, 2005.

FERREIRA, D. **Abordagens para o Problema Integrado de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes da Produção de Bebidas**. 247f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-graduação em Engenharia da Produção, UFSCAR – São Paulo, 2006.

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

FLEISCHMANN, B.; MEYR, H. ***The general lot-sizing and scheduling problem.*** OR Spektrum, v. 19, p. 11- 21, 1997.

FORD, Henry. ***My life and work – 1863-1947.*** Garden City Publishing Co Inc. New York, 1922.

GE Plastics. ***Moldagem por Injeção – variáveis do processo.*** Disponível em < <https://www.ge.com/keywords/ge-plastics> >. Acesso: 06/11/2018.

GIL, A. C. ***Como Elaborar Projetos de Pesquisa.*** São Paulo: Atlas, 1991.

GODINHO FILHO, Moacir & FERNANDES, Flávio C.F. ***Manufatura Enxuta: Uma Revisão que classifica e analisa os trabalhos apontando perspectivas de pesquisas futuras.*** Universidade Federal de São Carlos. São Carlos 2004

HARRIS, F.W. ***How Many Parts to Make at Once.*** The Magazine of Management, v. 10, n. 2, p. 135-136, 1913.

ISLNOTES. ***Basic Process Factors in Injection Molding.*** Disponível em: <[http://islnotes.cps.msu.edu/trp/inj/int\\_bas.html](http://islnotes.cps.msu.edu/trp/inj/int_bas.html)>. Acessado em: 06/11/2018

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. d. A. ***Metodologia do trabalho científico.*** São Paulo: McGraw-Hill, Inc, 1991.

LAURINDO, F.J.B & MESQUITA, M.A. ***Material Requeriment Planning: 25 anos de história – Uma revisão do Passado e prospecção do futuro.*** Revista Gestão & Produção. vol. 7, n. 3, p.320-337, dez. 2000.

LIEKER, J. K. ***O modelo Toyota: 14 princípios de gestão do maior fabricante do mundo.*** Porto alegre: Bookman, 2005, 316p.

LOPES A. R.; **Planejamento e Controle da Produção: Um Estudo de Caso no Setor de Artigos Esportivos de uma Indústria Manufatureira**. XXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. Rio de Janeiro, 2008.

LOPES, H. S., STEINER, M. T. A & RODRIGUES, L. C. A. **Meta-Heurísticas em Pesquisa Operacional** (2013) - Curitiba - PR; Omnipax - 2013.

LUBBEN, Richard T. – **Just in Time: uma estratégia avançada de produção**. São Paulo, McGraw-Hill, 1989.

MAES, J.; McCLAIN, J.O.; VAN WASSENHOVE, L.N. **Multilevel capacitated lot sizing complexity and LP-based heuristics**. European Journal of Operational Research, v. 53, n. 2, p. 131-148, 1991.

MAGATÃO, Leandro. **Mixed Integer Linear Programming and Constraint Logic Programming: Towards a Unified Modeling Framework** - Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial - Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Curitiba - 2005.

MARTINS, Pérsio P. P. & BIDIN, Leandro A.M. - **O sistema Just in Time: uma visão crítica de sua implementação**. XIII SIMPEP, Bauru – 2006.

MEIRA, M. S. Otimização de produção de uma linha de montagem mista na indústria automotiva por meio de programação matemática. **Dissertação de mestrado Universidade Tecnológica Federal do Paraná**, 2015.

MEYR, H. **Simultaneous lot sizing and scheduling by combining local search with dual reoptimization**. European Journal of Operational Research, v. 120, p. 311–326, 2000.



MEYR, H. ***Simultaneous lot sizing and scheduling on parallel machines.*** European Journal of Operational Research, v. 139, p. 277–292, 2002.

MILLER, A.J.; NEMHAUSER, G.L.; SAVELSBERGH, W.P. ***On the polyhedral structure of a multi-item production planning model with setup times.*** Mathematical Programming, v 94, p. 375-405, 2003

NC SYSTEM. ***Soluções em Tempo Real para Disponibilizar Informações no Chão de Fábrica.*** Disponível em: <http://www.ncsystems.com.br/>. Consultado em 31/10/2018.

NAKAJIMA, S. ***Introduction to Total Productive Maintenance - TPM.*** Cambridge: Productivity Press, 1989.

OPL. IBM ILOG CPLEX ***Optimization Studio: Kit de ferramentas de desenvolvimento de modelo de otimização para programação matemática e de restrição.*** Disponível em: <https://www.ibm.com/br-pt/marketplace/ibm-ilog-cplex>. Consultado em 31/10/2018.

SALAMA,S; ELTAWIL A. B. ***A Decision Support System Architecture Based on Simulation Optimization for Cyber Physical Systems.*** 46th SME North American Manufacturing Research Conference, NAMRC 46, Texas, USA.

SANDRETTO DO BRASIL ***Características das Máquinas Injetoras.*** Disponível em < <http://www.sandretto.com.br> > Acesso em: 18 de fevereiro de 2018.

SHINGO, Shigeo. ***O Sistema Toyota de Produção do Ponto de Vista da Engenharia de Produção.*** Porto Alegre: Artmed, 1996.

SHINGO, Shigeo. **Sistemas de produção com estoque zero: o Sistema Shingo para melhorias contínuas**. Porto Alegre: Artmed, 1996.

SIEMENS. **Teamcenter Product Cost Management**. Disponível em: <https://www.plm.automation.siemens.com/pt/products/teamcenter/product-cost-management/>. Acessado em: 01/06/2018.

SLACK, Nigel; CHAMBERS, Stuart; JOHNSTON, Robert. **Administração da Produção**. 3ª edição. São Paulo: Editora Atlas, 2009.

TRIGEIRO, W.W.; THOMAS, L.J., MCCLAIN, J.O.. **Capacitated Lot Sizing With Setup Times**. Management Science, v. 35,p 353-366,1989.

ULBRICHT, Gerson. **Um modelo de planejamento da produção multiestágio com estoques intermediários limitados**. Tese de Doutorado em Métodos Numéricos em Engenharia (PPGMNE – UFPR), Curitiba, 2015

VANDER. **Preparadores de Injetoras**. Disponível em: <http://vanderbsolidworks.blogspot.com.br/2011/07/preparadores-de-injetoras.html>. Consultado: 31/05/2018

VAIDYA, Saurabh ; PRASHANT, Ambad; SANTOSH, Bhosle. **Industry 4.0 – A Glimpse**. 2<sup>nd</sup> International Conference on Materials Manufacturing and Design Engineering.

WILLIAMS, H. PAUL. **Model Building in Mathematical Programming - 5th edition** - John Wiley & Sons - United Kingdom - 2013.

WOMACK, J. P., Jones, D. T., Ross, D. **A máquina que mudou o mundo.** Rio de Janeiro: Campus, 1992, 347p.

WOMACK, James P.; JONES Daniel T. **A mentalidade enxuta nas empresas Lean Thinking.** 3ª edição. São Paulo: Editora Campos, 2004.

## 7 APÊNDICES

### 7.1 DADOS COMPILADOS PARA SIMULAÇÃO DO MODELO

#### Demandas:

Componentes	Demanda S1	Demanda S2
C1	4516	4025
C2	0	0
C3	0	0
C4	5000	4500
C5	0	450
C6	4000	4000
C7	26689	31072

#### Estoque Inicial:

Componentes	Estoque Inicial S1	Estoque S2
C1	2200	138
C2	1000	1000
C3	3000	3000
C4	2000	314
C5	0	0
C6	7000	3000
C7	15100	711

#### Tempo de Produção das Máquinas:

Componentes	Disponibilidade de Produção (h)
M1	144
M2	144
M3	144

**Peças/ Hora:**

Componentes	Produção Horária Média (UN/h)
C1	78
C2	84
C3	100
C4	114
C5	86
C6	106
C7	432

**Tempos de *setup* entre as peças**

Componentes	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
C1	-	115	85	120	115	145	130
C2	115	-	115	175	115	145	120
C3	85	115	-	205	115	175	115
C4	120	175	205	-	120	105	110
C5	115	115	115	120	-	145	150
C6	145	145	175	105	145	-	125
C7	130	120	115	110	150	125	-

**Custo *Backlogging* (Iguar para todos os tempos de 1 a 144)**

Componentes	Custo Horário de Backlogging
C1	10000
C2	10000
C3	10000
C4	10000
C5	10000
C6	10000
C7	10000

### Possibilidade de Injeção

Componentes	INJ 01	INJ 02	INJ 03
C1	X		
C2		X	X
C3	X	X	
C4	X		X
C5	X		X
C6		X	X
C7	X		X

### Custo Hora

Componentes	Custo Horário de Produção (UM/h)
M1	100
M2	150
M3	150

### Moldes Disponíveis

Componentes	Moldes (Unidades)
C1	1
C2	1
C3	1
C4	1
C5	1
C6	1
C7	1