

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA

**OTIMIZAÇÃO DE UM MODELO MATEMÁTICO PARA
MINIMIZAÇÃO DE CUSTOS EM LAVANDERIA TÊXTIL**

JULIANA ADRIAN EMIDIO
Engenheira de Produção, UEM, 2016.

Orientador: Prof. Dr. Esdras Penêdo de
Carvalho

Dissertação de Mestrado submetida
à Universidade Estadual de
Maringá, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia Química,
área de concentração
Desenvolvimento de Processos.

Maringá – PR – Brasil
Fevereiro de 2018.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá, PR, Brasil)

E53o Emidio, Juliana Adrian
Otimização de um modelo matemático para
minimização de custos em lavanderia têxtil / Juliana
Adrian Emidio. -- Maringá, 2018.
124 f. : il. color., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Esdras Penêdo de Carvalho.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Maringá, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Química, 2018.

1. Otimização. 2. Processos. 3. Indústria têxtil.
4. Programação Linear Inteira Mista (MILP). 5.
Planejamento e Controle da Produção (PCP). I.
Carvalho, Esdras Penêdo, orient. II. Universidade
Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Química. III. Título.

CDD 21.ed. 677

ECSL-1202/9

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

Esta é a versão final da Dissertação de Mestrado apresentada por Juliana Adrian Emidio perante a Comissão Julgadora do Curso de Mestrado em Engenharia Química em 19 de fevereiro de 2018.

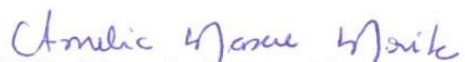
COMISSÃO JULGADORA



Prof. Dr. Esdras Penêdo de Carvalho
Orientador / Presidente



Prof. Dr. Mauro Antonio da Silva Sá Ravagnani
Membro



Prof.^a Dr.^a Amelia Masae Morita
Membro

Dedico este trabalho a Deus, pela permissão deste momento. Aos meus pais, João e Eleni, e a minha irmã, Patricia, por todo apoio para tornar essa conquista possível. E ao meu irmão Anderson (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aqueles que foram fundamentais nesta conquista...

A Deus, por ter me concedido saúde, inteligência e perseverança para superar todas as dificuldades encontradas no caminho até aqui e pela sua constante presença, revelada nos momentos mais inseguros.

Aos meus pais, João e Eleni, por todo apoio durante a minha formação e pelo esforço em permitir que eu alcançasse meus objetivos, pela compreensão nos momentos que precisei estar ausente da família e por me ensinarem valores fundamentais para a construção de quem sou hoje. Minha gratidão e admiração serão eternos.

À minha irmã, Patricia, por todo incentivo, por acreditar em mim e pelo companheirismo nesta caminhada.

Aos professores Dr. Esdras Penêdo de Carvalho e Dr. Mauro Antônio da Silva Sá Ravagnani pela atenção, paciência e disponibilidade para ajudar na realização deste trabalho. As professoras Dra. Amélia Masae Morita, Ma. Syntia Lemos Cotrim e Dr. Gislaine Camila Lapasini Leal pelo incentivo, colaboração e por terem contribuído para minha formação.

Aos meus amigos e companheiros de mestrado pelos momentos de alegrias e preocupações compartilhados e por tornarem esta fase mais alegre, Daiane, Claúdia, Charleston, Karoline, Nathalia, Roberta e Isabela.

Aos amigos Angélica, Bruna e Luís, pelo carinho de sempre, pelas boas conversas e por toda ajuda.

Aos funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da UEM e ao CNPq, pelo apoio financeiro.

Por fim, agradeço o incentivo e apoio de uma pessoa especial que esteve presente nos momentos finais deste trabalho, Carlos.

Muito Obrigada!

"O sonho é uma fonte infinita de inspiração."

(Luiz Tambucci)

"História, nossas histórias. Dias de luta, dias de glória."

(Charlie Brown Jr.)

OTIMIZAÇÃO DE UM MODELO MATEMÁTICO PARA MINIMIZAÇÃO DE CUSTOS EM LAVANDERIA TÊXTIL

AUTORA: JULIANA ADRIAN EMIDIO

ORIENTADOR: PROF. DR. ESDRAS PENÊDO DE CARVALHO

Dissertação de Mestrado; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química; Universidade Estadual de Maringá; Av. Colombo, 5790, BL E46 – 09; CEP: 87020-900 – Maringá – PR, Brasil, defendida em 19 de Fevereiro de 2018. 125 p.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um modelo matemático para minimizar os custos de produção com água, energia elétrica, mão de obra e custos fixos dos equipamentos em lavanderias industriais de beneficiamento têxtil. Para o desenvolvimento do modelo matemático foram utilizados os modelos clássicos para problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes e de seleção de processos. Para formular o problema, é apresentado um modelo de programação linear inteira mista (MILP). O estudo considera o setor produtivo de uma lavanderia industrial. Os processos abordados são lavagem, centrifugação e secagem de peças confeccionadas, com diferentes máquinas de capacidades distintas em cada etapa. Foi elaborado um exemplo ilustrativo para demonstrar os resultados do modelo, como também, dois estudos de caso, para analisar a consistência dos resultados e a comparação de custos. A implementação do modelo desenvolvido foi realizada no *software* GAMS (*General Algebraic Modeling System*), um otimizador eficiente na resolução deste tipo de problema. Os resultados obtidos por meio da aplicação do modelo mostram que a modelagem é capaz de dimensionar os lotes de produção de modo a utilizar da melhor forma os recursos e capacidades

disponíveis dos equipamentos, assim como, tem capacidade de minimizar os custos com a adequada programação da produção. Dessa forma, o modelo tem potencial para ser adaptado a outros casos de indústrias do mesmo setor.

Palavras-chaves: Otimização; Processos; Indústria Têxtil; Programação Linear Inteira Mista (MILP); Planejamento e Controle da Produção (PCP).

OPTIMIZATION OF A MATHEMATICAL MODEL FOR MINIMIZING COSTS IN TEXTILE LAUNDRY

AUTHOR: JULIANA ADRIAN EMIDIO

SUPERVISOR: PROF. DR. ESDRAS PENÊDO DE CARVALHO

Master Thesis; Chemical Engineering Post-Graduate Programs; State University of Maringá; Av. Colombo, 5790, BL E46 – 09; CEP: 87020-900 – Maringá – PR, Brasil, presented on 19th February, 2018. 125 p.

ABSTRACT

The objective of this work was to develop a mathematical model to minimize the costs of production with water, electricity, labor and fixed costs of the equipment in industrial laundries of textile beneficiation. The mathematical model was developed using the classic models for lotsizing and scheduling problem and process selection. To formulate the problem, a mixed integer linear programming (MILP) model is presented. The study considers the productive sector of an industrial laundry. The processes studied are laundry sector, centrifugation and drying of made parts with different machines of different capacities in each stage. An illustrative example was developed to demonstrate the results of the model, as well as two case studies, to analyze the consistency of the results and the comparison of costs. The implementation of the developed model was performed in the General Algebraic Modeling System (GAMS) software, an efficient optimizer to solve this type of problem. The results obtained from the model developed show that the modeling is capable of dimensioning the production batches in order to make the best use of the available resources and capacities of the equipment, as well as being able to

minimize the costs with the proper programming production. In this way, the model has the potential to be adapted to other cases of industries of the same sector.

Keywords: Optimization; Process; Textile Industry; Mixed Integer Linear Programming; Production Planning and Control.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Planejamento metodológico.....	55
Figura 2- Estrutura geral do modelo GAMS	72
Figura 3- Processo da Lavadora	88
Figura 4- Processo da Centrífuga	89
Figura 5- Processo da Secadora.....	90
Figura 6- Peças produzidas e custos por período- Cenário base.....	96
Figura 7- Custos de Produção dos períodos no Cenário base.....	96
Figura 8- Utilização dos equipamentos por período- Cenário base.....	97
Figura 9- Produção acumulada em cada processo. (a) Produção nas Lavadoras; (b) Produção nas Centrífugas; (c) Produção nas Secadoras.	104
Figura 10- Peças produzidas e custos por período- Cenário II	105
Figura 11- Custos de Produção dos períodos no Cenário II	105
Figura 12- Utilização dos equipamentos por período- Cenário II	106

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Disponibilidade Operacional.....	74
Tabela 2- Horas produtivas considerando a disponibilidade operacional.....	75
Tabela 3- Jornada de trabalho no ano	75
Tabela 4- Massa média de cada tipo de Peça	76
Tabela 5- Lote máximo de Peças- Lavadoras	77
Tabela 6- Lote Mínimo de Peças- Lavadoras.....	77
Tabela 7- Lote máximo de Peças- Centrífugas	78
Tabela 8- Lote Mínimo de Peças- Centrífugas	78
Tabela 9- Lote Máximo de Peças - Secadoras.....	79
Tabela 10- Lote Mínimo de Peças- Secadoras	79
Tabela 11- Demanda média de Produção diária de cada Tipo de Peça	80
Tabela 12- Parâmetros para a Capacidade Máxima e Limite mínimo por Dia- Lavadora	80
Tabela 13- Capacidade Máxima e Limite mínimo por Dia- Centrífuga	80
Tabela 14- Capacidade Máxima e Limite mínimo por Dia- Secadora	81
Tabela 15- Custos com Mão de Obra direta	81
Tabela 16- Potência (kW) dos equipamentos.....	82
Tabela 17- Custos Fixos dos Equipamentos.....	82
Tabela 18- Consumo de água nos equipamentos de lavagem	83
Tabela 19- Distribuição dos lotes de produção (X_{1ijty}) para as quatro primeiras horas.	84
Tabela 20- Resultado dos custos por período ($C_{ustosty}$) e da quantidade de peças processadas ($QTDE_{totalty}$).....	85
Tabela 21- Custos por processo calculado pelo modelo (C_{ustos_proclj} , C_{ustos_procKk} , C_{ustos_procSl}).....	85
Tabela 22- Complexidade do modelo no GAMS.	86
Tabela 23- Lote máximo de Peças –Lavadoras: Cenário base	91
Tabela 24- Lote Mínimo de Peças- Lavadoras: Cenário base.....	92
Tabela 25- Lote máximo de Peças- Centrífugas: Cenário base.....	93
Tabela 26- Lote Mínimo de Peças- Centrífugas: Cenário base.....	93

Tabela 27- Lote Máximo de Peças- Secadora: Cenário base	93
Tabela 28- Lote Mínimo de Peças- Secadora: Cenário base	94
Tabela 29- Distribuição dos lotes de produção para os primeiros quatro períodos- Secadoras- Cenário base.....	95
Tabela 30- Distribuição dos lotes de produção para os primeiros quatro períodos nas Lavadoras- Cenário I	98
Tabela 31- Distribuição dos lotes de produção para os primeiros quatro períodos nas Secadoras- Cenário I.....	99
Tabela 32- Distribuição dos lotes de produção para os primeiros oito períodos nas Centrífugas- Cenário I	100
Tabela 33- Lote máximo de Peças- Centrífugas: Cenário II.....	101
Tabela 34- Lote Mínimo de Peças- Centrífugas: Cenário II	101
Tabela 35- Distribuição dos lotes de produção para os primeiros quatro períodos nas Lavadoras- Cenário II	102
Tabela 36- Distribuição dos lotes de produção para os primeiros quatro períodos nas Centrífugas- Cenário II	102
Tabela 37- Distribuição dos lotes de produção para os primeiros quatro períodos nas Secadoras- Cenário II.....	103
Tabela 38- Resultados computacionais do Cenário II	106
Tabela 39- Distribuição dos lotes de produção para os primeiros quatro períodos nas Lavadoras- Cenário III	107
Tabela 40- Distribuição dos lotes de produção para os primeiros quatro períodos nas Centrífugas- Cenário III	108
Tabela 41- Distribuição dos lotes de produção para os primeiros quatro períodos nas Secadoras- Cenário III.....	108
Tabela 42- Resultados obtidos com o software GAMS.	109
Tabela 43- Lote máximo de Peças: Secadora- Estudo de Caso II.....	111
Tabela 44- Lote Mínimo de Peças: Secadora- Estudo de Caso II.....	112
Tabela 45- Comparação dos resultados do modelo e da produção do Caso II estudado.....	113

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	16
INTRODUÇÃO	16
1.1. Objetivos	20
1.1.1. Objetivo geral.....	20
1.1.2. Objetivos Específicos	20
1.2. Estrutura do Trabalho	21
CAPÍTULO II	22
REVISÃO DA LITERATURA	22
2.1. Setor Têxtil Brasileiro	22
2.2. Racionalização de recursos na Indústria Têxtil.....	24
2.3. Problema de Dimensionamento de Lotes e <i>Scheduling</i> (programação)	29
2.4. Problema de Dimensionamento de Lotes Capacitado (CLSP)	34
2.5. Problema de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes Discretos (DLSP) 36	
2.6. Problema de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes com preparação Contínua (CSLP).....	39
2.7. Problema de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes Proporcional (PLSP)	40
2.8. Problema Geral de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes (GLSP) 41	
2.9. Problema Geral com tempos de Setup dependentes da Sequência (GLSPST)	44
2.10. Problema Geral em Máquinas em Paralelo (GLSPPL)	46
2.11. Problema de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes Multiestágio.....	48
2.12. Problema Geral em Máquinas em Paralelo Multiestágio (GLSPMS) ...	50
CAPÍTULO III	53
METODOLOGIA	53
3.1. Considerações Iniciais	53
3.2. Conceitualização.....	54
3.3. Coleta de Dados	55
3.4. Modelagem	56
3.5. Experimento.....	56
3.6. Validação	56

3.7.	Documentação e Realimentação	56
3.8.	Modelagem do Problema	56
3.9.	Índices da Modelagem	57
3.10.	Parâmetros da Modelagem	57
3.11.	Variáveis da Modelagem	58
3.12.	Função Objetivo do Modelo Matemático	60
3.13.	Restrições da Modelagem	61
3.14.	Ambiente de Modelagem GAMS	70
CAPÍTULO IV		73
RESULTADOS COMPUTACIONAIS		73
4.1.	Considerações Iniciais	73
4.2.	Exemplo ilustrativo	73
4.3.	Estudo de Caso- I	86
4.3.1.	O Processo em estudo	86
4.3.2.	Comparação dos resultados do Cenário base e dos Cenários I, II e III 94	
4.4.	Estudo de Caso- II	110
CAPÍTULO V		114
CONCLUSÕES		114
CAPÍTULO VI		116
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS		116
REFERÊNCIAS		117

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Em virtude das transformações que tem afetado a economia mundial e, por consequência, influenciado a competitividade e exigências do mercado as organizações mostram-se cada vez mais preocupadas em melhorar seus processos produtivos, seja modernizando sua tecnologia ou seus processos gerenciais. Com a necessidade de atender seus clientes, cada vez mais exigentes, com entregas mais rápidas e produtos de melhor qualidade, surge o desafio do gerenciamento adequado dos sistemas produtivos de forma a cumprir sua função com os menores custos e aumento da produtividade.

Desta forma, estas empresas buscam reestruturar suas operações de forma a atender melhor seus clientes e se manterem competitivas. Estas empresas têm procurado produzir uma variedade maior de produtos em períodos de tempo mais curtos e utilizando menos recursos, demonstrando, assim, a importância da compreensão da gestão da produção e de suas operações (SLACK *et al.* 2002).

Conforme Wei *et al.* (2017) em muitas cadeias de suprimentos industriais (*supply chains*), as matérias-primas passam por uma série de etapas produtivas, sendo transformadas gradualmente em produtos finais e posteriormente entregues aos seus clientes para atender suas demandas. Em decorrência da globalização do mercado e das expansões do mercado internacional, diversas empresas vêm tentando otimizar seus sistemas produtivos e de distribuição simultaneamente de forma mais eficiente e econômica, objetivando atender todos os seus pedidos de modo que os custos globais sejam minimizados.

Em ambientes industriais, portanto, percebe-se a necessidade de realizar a função de Planejamento e Controle da Produção (PCP), buscando definir as quantidades de itens a serem produzidos, em quais máquinas ou linhas de produção que serão produzidos e em que período de tempo serão fabricados (TUBINO, 2006). As decisões do PCP podem ser divididas em níveis hierárquicos de planejamento, como o nível estratégico de longo prazo, o nível tático de médio prazo e por fim o nível operacional de curto prazo.

Uma questão importante é a integração do planejamento tático da produção com o planejamento operacional buscando boas soluções para os dois níveis. De acordo com Loveland *et al.* (2007), um modelo que conecta as decisões de nível tático e operacional visa estabelecer uma melhor comunicação e organização no chão de fábrica.

Comum em diversos processos industriais, existe o problema de dimensionamento de lotes (PDL) e sequenciamento. O problema de dimensionamento de lotes consiste em definir a quantidade dos produtos que serão produzidos em um horizonte de planejamento, o qual está inserido no nível tático do PCP, já o problema de sequenciamento define a ordem de produção dos itens e alocação de recursos buscando minimizar os custos operacionais e está contido no nível operacional. Desta forma, modelos matemáticos que tratem de forma integrada estes dois problemas trazem a possibilidade de integrar as decisões, algumas vezes conflitantes, tomadas nos níveis tático-operacional dos sistemas produtivos.

Com os progressos alcançados na área computacional e também por motivos econômicos, diversas organizações têm demonstrado o interesse em tornarem seus processos produtivos mais eficientes, o que influencia o surgimento de pesquisas acadêmicas de modelos de otimização para o controle e planejamento de sistemas produtivos (POLDI, 2007).

A pesquisa operacional pode ser entendida como a aplicação de métodos científicos a problemas complexos para apoiar a etapa de tomada de decisões como as decisões presentes em situações que necessitam de alocações eficientes de recursos limitados. Ela faz uso de modelos matemáticos para tratar o problema de tomada de decisão definindo variáveis e as relações matemáticas entre elas de forma a descrever o comportamento do sistema. Como exemplos de modelos matemáticos tem-se os modelos de programação matemática (otimização matemática), como: Programação Linear, Programação Linear Inteira, Programação Não-Linear, entre outros (ARENALES *et al.*, 2008).

O trabalho de otimização de processos consiste em uma ferramenta, apoiada por computadores, tecnologia e ferramentas matemáticas que fornecem uma eficiência e eficácia organizacional em todos os níveis de gestão. A otimização pode indicar as atividades de maior produtividade, bem como, os preços mais competitivos

(HIMMELBLAU, 2006). Na otimização de processos realiza-se uma simulação dos processos reais, de forma estruturada, por meio de uma modelagem (GOLDBARG, 2000).

De acordo com Binder *et al.* (2001) o processo de modelagem matemática é uma abstração dos sistemas de processos reais e busca capturar as características principais de interesse. Em sua maioria, os modelos de processo são baseados em princípios fundamentais ou observações empíricas, ou em ambos.

Sendo assim, para desenvolver um modelo matemático, devem ser feitas simplificações razoáveis do sistema ou do problema real e sua validação depende de a solução obtida ser coerente com o problema original. Desta forma, o modelo matemático é uma abstração (simplificação) do problema real e deve ser detalhado o suficiente para retratar os elementos principais do problema e, ao mesmo tempo, possível de ser tratado por métodos de resolução (ARENALES *et al.*, 2008).

Pagliarussi (2013) comenta que a elaboração e a solução de modelos de otimização aplicados a situações reais, em sua maioria, apresenta ser um desafio para os pesquisadores do mundo, em virtude das dificuldades existentes próprias da natureza combinatória dos problemas a serem modelados.

Dentre os diversos segmentos da indústria no país tem destaque a indústria têxtil. Atualmente, o setor representa um fator de grande importância para a economia brasileira, não somente pelo seu grande volume de produção e exportações crescentes, como também pela sua grande capacidade de gerar empregos (FUJITA e JORENTE, 2015).

O processo da cadeia produtiva têxtil brasileira tem início com as fibras têxteis, que são transformadas em fios nas fiações, posteriormente transformados em tecido nas tecelagens ou malharias, dando origem a tecidos planos ou malhas. Após essas etapas, têm início os processos de beneficiamento e acabamento que buscam agregar maior valor aos artigos têxteis, como as indústrias de tingimento/estamparia e lavanderia, onde estes processos podem ocorrer antes das peças confeccionadas ou como parte final do processo produtivo, depois da etapa final de confecção.

As lavanderias têxteis, que estão inseridas na etapa final de empresas de confecção e vestuário trabalham para melhorar a qualidade e criar efeitos diferenciados nas peças confeccionadas, por meio de diversas etapas de acabamento como desengomagem, amaciamento, tingimento, envelhecimento, alveamento, dentre outros (BASTIAN e ROCCO, 2009). Para tanto, fazem uso de grandes quantidades de recursos como produtos químicos, água e energia.

Segundo Angelis Dimakis *et al.* (2016), a indústria têxtil é um dos setores industriais que mais consomem água. Ela utiliza uma grande quantidade deste recurso em toda sua cadeia de valor, em especial em operações de processamento como tingimento e acabamento que utilizam uma grande quantidade de água para dissolver corantes e produtos químicos. Ainda, de acordo com Hasanbeigi e Price (2012), um dos principais fatores de custo na indústria têxtil é a energia.

Gomes *et al.* (2014) comentam que para tornar mais competitivos seus produtos, as organizações deste setor necessitam reduzir seus custos de produção, tendo em vista o aumento dos produtos asiáticos no mercado mundial, o que acirrou a competição global dos produtores de têxteis e confeccionados.

O planejamento da produção é uma das etapas mais importantes na fabricação de produtos. A programação da produção é realizada para se alcançar um bom equilíbrio entre a entrega da produção no prazo, o curto prazo para o atendimento do cliente e a máxima utilização de seus recursos (KO e WANG, 2011).

Os passos envolvidos na otimização de um planejamento da produção são parecidos aos usados na distribuição da produção e têm sido um problema estudado há muitas décadas. Qualquer problema de programação, independente dos tipos de restrições, em última análise, pode ser considerado como um problema de otimização matemática solucionável por algoritmos numéricos (JIANG *et al.*, 2010).

Os estudos atuais sobre a otimização da programação da produção estão focados principalmente em melhorar a eficiência da produção e poucas das vezes combinam a otimização do planejamento das operações com economia de recursos como a água e redução do descarte de águas residuais (ZHOU *et al.*, 2017).

Neste contexto, este trabalho tem como problema de estudo a redução dos custos de produção por meio da otimização da programação da produção em um ambiente de lavanderia têxtil industrial.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

O presente estudo tem como objetivo estruturar um modelo matemático voltado à minimização dos custos de produção em lavanderias de beneficiamento têxtil, otimizando o processo de tomada de decisão na programação da produção.

Assim, pretende-se apoiar algumas das mais importantes e complexas decisões envolvidas no Planejamento e Controle da Produção (PCP), como realizar a tarefa de planejar e programar a produção de forma eficiente respondendo perguntas como: quais produtos devem ser processados? Em quais quantidades? Em quais processos? E quando devem ser processados? Perguntas que são comuns às atividades do PCP em uma indústria, visando fornecer um modelo que poderá ser utilizado como uma ferramenta de auxílio para a programação da produção de empresas do mesmo setor.

1.1.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- I. Elaborar um modelo matemático de otimização para o problema de dimensionamento de lotes e programação da produção a partir de modelos já existentes na literatura e embasado no modelo apresentado por Oliveira (2013).
- II. Obter uma solução para o modelo desenvolvido usando o GAMS (*General Algebraic Modeling System*).
- III. Aprimorar o processo de tomada de decisão e melhorar a utilização dos equipamentos e recursos produtivos com a modelagem matemática.

1.2. Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em 6 capítulos.

No Capítulo 1 são apresentados a introdução, os objetivos e a estrutura do trabalho.

No Capítulo 2, intitulado Revisão da Literatura, encontram-se os principais estudos acerca do setor Têxtil, bem como, dos modelos de problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes mais relevantes.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia adotada na pesquisa para atingir os objetivos estabelecidos no Capítulo 1.

O Capítulo 4 disserta os resultados computacionais obtidos na pesquisa e suas análises.

O Capítulo 5 expõe as conclusões da pesquisa.

No Capítulo 6 são apresentadas sugestões para trabalhos futuros relacionados ao tema da pesquisa.

CAPÍTULO II

REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo tem como objetivo apresentar, resumidamente, o cenário da indústria têxtil brasileira, desde sua instalação até alguns de seus desafios frente ao mercado mundial de têxteis e confeccionados, como a preocupação com a utilização de alguns recursos como água, energia e a geração de efluentes.

Apresenta-se também, neste embasamento teórico, alguns dados da indústria têxtil no mundo e conceitos e formulações matemáticas apresentados na literatura sobre o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção.

2.1. Setor Têxtil Brasileiro

A atividade têxtil e de confecção é uma das mais antigas no Brasil, com cerca de aproximadamente 200 anos. Ela influenciou a industrialização e foi um setor com grande importância para a revolução industrial no país. Desponta como o segundo maior empregador na indústria de transformação e segundo maior gerador do primeiro emprego, empregando cerca de 1,7 milhões de pessoas de forma direta, onde 75 % são mulheres. Com isso, percebe-se a grande importância econômica e social deste setor para o país (ABIT, 2014).

O desenvolvimento da indústria têxtil brasileira deu-se no final do século XIX. Com o cancelamento das tarifas alfandegárias sobre a importação de maquinários o surgimento das tecelagens e fiações de algodão foram estimuladas. O centro da indústria têxtil concentrou-se inicialmente na região nordeste no período entre 1830 a 1884, sendo a Bahia seu principal centro devido à oferta de recursos e mão de obra. Ao longo do tempo, com a construção de estradas de ferro e o crescimento econômico de outras regiões, as fábricas começaram a concentrar-se na região centro-sul (FUJITA e JORENTE, 2015).

Durante a 2^o Guerra Mundial o setor têxtil brasileiro apresentou um grande crescimento devido ao aumento em suas exportações, pois os países envolvidos na guerra empregaram seus recursos na produção militar, dando espaço para produtos importados o que colocou o Brasil no segundo lugar em produção têxtil mundial (FUJITA e JORENTE, 2015).

Por muito tempo a indústria têxtil brasileira se beneficiou com diversos privilégios em relação à concorrência com outros países. Foram criadas inúmeras barreiras protecionistas que privilegiavam a indústria nacional no mercado interno. Entretanto, este setor apresentou seu último ciclo importante de modernização na segunda metade dos anos 70, vindo a ser fortemente atingida pelo processo de abertura comercial no início dos anos 90, colocando-o diante da concorrência internacional (RANGEL *et al.* 2010).

A cadeia produtiva têxtil reúne os processos de fiação, tecelagem, malharia, acabamento/beneficiamento e confecção e ao longo dos últimos anos sofreu grandes transformações com as mudanças tecnológicas, o que favoreceu expressivos crescimentos de produtividade (GORINI, 2000).

Segundo a Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (ABIT) a cadeia produtiva do país é a mais integrada do ocidente, produzindo desde as fibras até a confecção. Na maioria são confecções de pequeno e médio porte, reunindo mais de 33 mil empresas. Em 2014, o setor têxtil e de confecção apresentou um faturamento de US\$ 55,4 bilhões, em comparação aos US\$ 58,2 bilhões em 2013. Na indústria de transformação, o setor representa uma parcela de 5,7 % do valor total de produção (ABIT, 2015).

O Brasil é o quarto maior produtor mundial de artigos de vestuário e o quinto maior produtor de manufaturados têxteis, ficando atrás de alguns países como China e Índia que lideram o ranking. O país produziu no ano de 2014 o volume de 1,5 toneladas de algodão em pluma e cerca de 300 mil toneladas de fibras químicas (ABIT, 2015).

O país é autossuficiente na produção de algodão, dando origem à produção de fios e fibras naturais. Possui grandes investimentos na produção de fibras químicas, destacando-se como referência no cenário mundial de *beachwear*, *jeanswear* e *homewear* (CNI/ABIT, 2012).

Entretanto, verifica-se um grande crescimento da participação dos produtos importados no atendimento ao mercado brasileiro, apesar deste estar entre os oito maiores mercados consumidores de vestuário, cama, mesa e banho do mundo e é o que mais cresceu na última década. Diversas questões macroeconômicas e estruturais vêm tirando a competitividade da indústria da moda brasileira no país e no exterior, o que fez, por exemplo, a importação de vestuário aumentar de US\$ 148 milhões para US\$ 3,5 bilhões na última década (ABIT, 2014).

No ano de 2015 o país apresentou exportações no valor de US\$ 1,08 bilhões. Sua produção de artigos de vestuário atingiu a marca de 5,5 bilhões de peças e 1,9 milhões de toneladas de produtos têxteis, com investimentos no setor de cerca de US\$ 749 milhões. Dentre os produtos exportados pela indústria têxtil e de confecção estão fibras, fios, filamentos, tecidos planos de malha e algodão e vestuário. Entre os mercados consumidores de produtos brasileiros como fios, tecidos e vestuário, estão Argentina, União Europeia, Paraguai, Uruguai, EUA e México (PIMENTEL, 2016).

De acordo com Costa e Rocha (2009), ao longo dos últimos anos o setor têxtil e de confecção do Brasil está perdendo competitividade e espaço no mercado mundial, mesmo com o crescimento do consumo mundial de têxteis e confeccionados. Atualmente a competitividade neste mercado apresenta índices de crescimento, tendo em vista o crescimento exponencial dos produtos asiáticos no comércio internacional, com destaque para a China. Ainda segundo os autores, para a sobrevivência das empresas deste setor é de fundamental importância o desenvolvimento de estratégias competitivas diferenciadas fundamentadas, por exemplo, na utilização da inovação tecnológica como instrumento relevante para inserção no mercado mundial.

2.2. Racionalização de recursos na Indústria Têxtil

A competição na indústria têxtil sofreu implicações com as transformações tecnológicas, principalmente à delimitação de novos espaços da concorrência mais internacionalizados e o crescimento do ritmo de inovação tecnológico com a diminuição do ciclo de vida de produtos e processos e a necessidade de maior

diferencial de produtos. Neste novo cenário competitivo tem maior importância a qualidade do produto, flexibilidade, rapidez de entrega e inovatividade, além da racionalização dos custos de produção (RECH, 2006). Desta forma, conforme Gomes *et al.* (2014) para se manterem competitivas no mercado é imprescindível a redução dos custos de produção por meio de cortes no consumo de insumos, energia, redução da taxa de produção de rejeitos, entre outros.

Gomes *et al.* (2014) comentam que no setor têxtil, um dos seus desafios é alcançar a flexibilidade produtiva, com ganho de eficiência e produtividade, considerando que o setor trabalha com uma grande gama de produtos com ciclo de vida extremamente reduzido devido às tendências de moda.

A indústria têxtil representa um dos setores industriais que mais consomem água. Ela utiliza uma grande quantidade deste recurso em toda sua cadeia de valor, em especial em operações de processamento como tingimento e acabamento que utilizam uma grande quantidade de água para dissolver corantes e produtos químicos. Além disso, ela apresenta impactos ambientais diversos, particularmente afetando o ambiente aquático, por meio da poluição gerada pelo descarte das águas residuais do processo. Isto posto, é imprescindível monitorar seus impactos ambientais e seu crescimento em busca de um desenvolvimento sustentável (ANGELIS-DIMAKIS *et al.*, 2016).

De acordo com Hasanbeigi e Price (2015), os processos têxteis que fazem uso da água são um dos maiores consumidores deste recurso na indústria de transformação e, portanto, um dos principais geradores de águas residuais industriais. As águas residuais desta indústria possuem muitos produtos químicos tóxicos, uma vez que vários produtos químicos são utilizados em diferentes processos, como no pré-tratamento do artigo, tingimento e acabamento, o que pode causar graves problemas ambientais quando descartados incorretamente. Com isso, para que as empresas reduzam custos e permaneçam competitivas, é necessário racionalizar o consumo de água e resolver questões como o descarte de águas residuais.

No processo de tingimento da indústria têxtil a água é um recurso muito consumido, considerando que é o meio no qual corantes, produtos químicos e auxiliares são dissolvidos. As águas residuais desses processos estão classificadas entre os

resíduos industriais mais poluentes, elas contêm poluentes tóxicos, grandes quantidades de sólidos em suspensão, nutrientes, sais, alta demanda bioquímica (DBO) de oxigênio, como também metais pesados. Quando esses efluentes contaminados são eliminados em corpos de águas receptores, isso afeta o ecossistema aquático e terrestre e a saúde humana (ANGELIS-DIMAKIS *et al.*, 2016).

A falta de disponibilidade de recursos hídricos e a poluição do meio aquático agrava-se cada vez mais com o consumo excessivo de água e a sua falta de tratamento, como reflexo do contexto de crescimento econômico e o aumento da demanda industrial global pelo uso da água. O consumo anual de água e a demanda química de oxigênio (DQO) da indústria têxtil na China foi de 4 bilhões de m³ e 2 milhões de toneladas no ano de 2014 e na União Europeia, segundo maior exportador de têxteis do mundo, o consumo anual de água é de 600 milhões de m³ (VAJNHANDL e VALH, 2014; CHEN *et al.*, 2017).

Além da água, segundo Hasanbeigi e Price (2015), a indústria têxtil faz uso de uma grande quantidade de eletricidade e combustíveis em seus processos, eliminando assim, correspondentes quantidades de gases de efeito estufa (GEE). No processo de fiação a eletricidade é a principal fonte de energia, enquanto que em processos realizados a úmido a energia é obtida principalmente de combustíveis. Além das grandes emissões de CO₂ associadas a este consumo de energia, a combustão de combustíveis fósseis é uma importante fonte de poluentes atmosféricos, como os óxidos nitrosos (NO_x), dióxido de enxofre (SO₂) e materiais particulados (PM) na China.

A China é o maior fabricante de têxteis do mundo, sendo responsável por cerca de 2% de todas as fibras têxteis produzidas em todo o mundo em 2012, ficando à frente da Índia e Estados Unidos. O setor têxtil, em geral, é uma indústria de alta intensidade de energia e com consumo de energia e emissões de gases de efeito estufa (GEE) que podem ser classificados como relativamente altos entre as indústrias de fabricação (PENG *et al.*, 2015).

Em 2010, a indústria têxtil representou cerca de 4 % da energia total consumida na China (NBS, 2011), nos EUA, este consumo representou menos de 2 % (US DOE, 2010), considerando que o consumo de energia pela indústria têxtil em um

determinado país sujeita-se à estrutura do setor de produção neste país (HASANBEIGI e PRICE, 2015).

Um dos principais fatores de custo na indústria têxtil é a energia e a melhoria da eficiência energética deve ser uma questão chave a ser pensada, principalmente considerando períodos onde existem uma maior variação dos preços energéticos. Existem diversas opções economicamente viáveis para a eficiência energética neste tipo de indústria, no entanto, por serem em sua maioria pequenas e médias empresas (PME), faltam informações e recursos suficientes para sua aplicação. Assim, informações sobre práticas e tecnologias energéticas mais eficientes precisam ser disseminadas neste setor (HASANBEIGI e PRICE, 2012).

Um dos desafios deste tipo de indústria na China é a redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), pois ela é o sexto maior consumidor de energia no país. Uma de suas principais fontes de emissões de GEE é o consumo de carvão e a segunda maior é o consumo de eletricidade, que podem ser agravadas com a crescente escala de produção. Entretanto, a diminuição da intensidade energética e a otimização da estrutura energética podem reduzir as emissões de GEE de forma eficiente (HUANG *et al.*, 2017).

No Brasil, no ano de 2014, o consumo de energia na indústria têxtil representou 0,4% de todo o consumo de energia no país. São utilizadas várias fontes de energia para diversos usos finais como energia elétrica nas fiações para a força motriz de motores elétricos (bombas, ventiladores etc.) e refrigeração, nas tecelagens, malharias e confecções a energia elétrica também é utilizada para força motriz e iluminação, no beneficiamento é utilizado combustível para a geração de vapor e energia elétrica para a força motriz (GARCIA, 2015).

Conforme as projeções do relatório *World Population Prospects: The 2015 Revision*, lançado pela Organização das Nações Unidas (ONU), a população mundial atual de 7,2 bilhões deverá alcançar os 9,7 bilhões em 2050 (UN/ DESA, 2012). Portanto, este crescimento demográfico e o crescimento econômico em ascensão nos países em desenvolvimento, irão impulsionar crescimentos importantes na produção e consumo de artigos têxteis, o que, por sua vez, refletirá em significativos aumentos no consumo de energia, uso da água e emissões de

dióxido de carbono (CO₂), como outras emissões nocivas para o ambiente (HASANBEIGI e PRICE, 2015).

Buscando auxiliar os processos deste tipo de indústria, tornando suas atividades mais eficientes em termos de insumos, impactos ambientais e recursos financeiros, diversos estudos que abordam em conjunto essas questões com técnicas de modelagem matemática são encontrados na literatura.

Wu e Chang (2003) desenvolveram uma modelagem matemática para simular os processos de produção em uma fábrica de tingimento têxtil com o objetivo de controlar a geração de efluentes. Eles comprovaram que a otimização da programação da produção apresenta tanto benefícios econômicos como ambientais e que os pesquisadores que apenas focavam na melhoria da eficiência de produção não relacionavam o benefício ambiental com a eficiência econômica de otimizar a programação das operações.

O estudo de Jiang *et al.* (2010) propôs um algoritmo para a otimização do planejamento de produção em uma empresa de tingimento têxtil buscando reduzir o tempo de produção e a quantidade de consumo de água. Os resultados obtidos mostram que o método de programação otimizado pode economizar um significativo tempo de produção e em comparação com a programação manual ela reduz o tempo de produção entre 10 e 15 %. O consumo de água também foi reduzido entre 20 % e 30 %, a produção de resíduos de tingimento em 10 % e a geração de águas residuais em aproximadamente 20 %.

O estudo conduzido por Zhou *et al.* (2017) demonstrou a eficiência de um modelo que utiliza um algoritmo genético para otimizar o planejamento da produção em uma empresa de tingimento têxtil. O modelo permite reduzir o consumo de água entre 18,4% e 21% e o descarte de águas residuais.

Bao *et al.* (2017) realizaram um estudo que tinha por objetivo otimizar um programa de lavagem doméstica sustentável para reduzir o consumo de energia sem a necessidade de produtos químicos adicionais, considerando também como indicadores de desempenho a eficiência da lavagem e abrasão do tecido. Para isso o projeto buscou equilibrar a temperatura de lavagem, o tempo e a ação mecânica das máquinas. Os resultados do estudo mostraram que otimizando o programa de lavagem o consumo de energia pode ser reduzido com a qualidade de lavagem

mantida. O consumo de energia obtido foi em torno de 1/3 inferior ao consumo original, como também, sem acréscimos na taxa de abrasão do tecido, químicos ou água consumida.

Em seu estudo, Guo *et al.* (2006) buscou construir um modelo matemático universal para o problema de *scheduling* em *job shop* (*job shop scheduling- JSS*) para o processo de costura de peças de vestuário. O autor comenta que um JSS eficaz na indústria de transformação é importante para cumprir a demanda de produção e reduzir os custos de produção. O objetivo do modelo foi minimizar as penalidades totais da antecipação ou atraso ao definir quando começar a produzir cada ordem de produção e como atribuir as operações às máquinas de costura. Para resolver o problema foi proposto um processo de otimização baseado em Algoritmos Genéticos (AG), no qual, os resultados experimentais mostraram a eficácia do algoritmo proposto e que ele tem poder de auxiliar empresas de vestuário a cumprir seus prazos e reduzir estoques, otimizando o uso de recursos limitados.

2.3. Problema de Dimensionamento de Lotes e *Scheduling* (programação)

O Planejamento e Controle da Produção (PCP) é uma área de fundamental importância para os sistemas produtivos quanto às questões relacionadas a redução de custos de manufatura e eficiência no atendimento dos serviços aos seus clientes. De acordo com Tubino (2006), após serem definidas metas e estratégias, é necessário a elaboração de planos para alcançá-las, administrar os recursos humanos e físicos a partir dos planos, organizar a ação dos recursos humanos sobre os físicos e acompanhar esta ação. Essas atividades são desenvolvidas, portanto, em sistemas de produção pelo PCP.

Pode-se dizer, de maneira genérica, que as funções do planejamento e controle da produção são definir as quantidades que serão produzidas, realizar a gestão de estoques, emitir as ordens de produção, programar as ordens de fabricação, movimentar as ordens de produção e acompanhar a produção (RUSSOMANO, 2000). Como principais questões, ele busca atender à demanda de produção no prazo estabelecido, respeitando as capacidades limitadas dos recursos envolvidos e, em geral, com o menor custo possível.

Desta forma, as decisões do planejamento e controle da produção ocorrem em diferentes horizontes de tempos e períodos de replanejamento, como também, consideram diferentes níveis de agregação de informações (PEDROSO e CORRÊA, 1996). As decisões do PCP estão divididas em três níveis hierárquicos: Planejamento estratégico de longo prazo, Planejamento tático de médio prazo e Planejamento operacional de curto prazo.

Essa divisão está relacionada ao planejamento hierárquico da produção. Sendo que, as decisões tomadas em cada um dos níveis superiores alimentam diretamente o inferior. A cada nível, o horizonte de planejamento diminui e, assim, a facilidade de fazer planos e replanejamentos. Além disso, os níveis hierárquicos superiores abordam mais planejamento do que controle e essa se inverte na medida que os níveis diminuem (SABOIA, 2010).

O planejamento estratégico é o nível onde são tomadas decisões como as metas globais da empresa e as políticas adequadas para atingi-las, determinando os objetivos da empresa a longo prazo, como exemplo, determinar o número de máquinas e equipamentos de uma fábrica. No planejamento tático são implementadas as estratégias definidas no nível do planejamento estratégico, utilizando de forma eficiente os recursos disponíveis, como exemplo, níveis de mão-de-obra, subcontratação e horas extras em um horizonte de planejamento de meses a um ano. Por último, no planejamento operacional são tomadas as decisões do dia-a-dia da produção, como exemplo, atribuição de produtos a máquinas e a programação da produção, objetivando executar os planos definidos anteriormente (ARAUJO e ARENALES, 2000 ; SABOIA, 2010).

Conforme Tubino (2006), as informações dos três níveis hierárquicos devem ser conectadas. Desta forma, o Plano-mestre de Produção (PMP) obtido no nível tático, por meio do qual é possível realizar a conexão entre o planejamento estratégico e as atividades operacionais, só será viável se estiver compatível com as decisões tomadas a longo prazo, definidas no Planejamento Estratégico da Produção. Da mesma forma que a programação da fabricação de determinado item, realizada no nível operacional, só será efetiva se a capacidade produtiva tiver sido equacionada no PMP, com a determinação de número de turnos, recursos humanos, materiais alocados etc.

Desta forma, o planejamento da produção nos níveis tático-operacional consiste no processo de definir um plano que determine quanto produzir e/ou comprar nos próximos períodos de tempo (ou horizonte de planejamento), assim como, os níveis de estoque e os recursos necessários. Neste contexto, está inserido o problema de dimensionamento de lotes (*lot-sizing*), que consiste em planejar a quantidade de produtos a serem produzidos em várias (ou única) máquinas, em cada período de tempo de um horizonte de planejamento, de forma a atender uma demanda, sujeito a restrições de recursos e limitação de capacidade, com o objetivo de otimizar uma função, como exemplo, minimizar custos (ARAUJO e ARENALES, 2000).

O problema de dimensionamento de lotes pode ser entendido como um problema de planejamento da produção, ou seja, trata da definição dos itens e quantidades a serem produzidos. Dado esse planejamento, tem-se o problema de programação da produção, o qual define a ordem, ou sequência de fabricação (quais máquinas), visto que em processos industriais os tempos e custos de preparação (*setup*) da linha de produção podem ser dependentes da sequência de fabricação. Quando tratados juntos por modelos matemáticos ele é conhecido como problema integrado de dimensionamento e sequenciamento de lotes.

Segundo Karimi *et al.* (2003) algumas características consideradas neste problema afetam a sua modelagem e complexidade de decisões, como por exemplo:

- Horizonte de planejamento: O horizonte de planejamento é o intervalo de tempo para o qual o cronograma do plano mestre de produção é elaborado. Ele pode ser finito ou infinito. Junto ao horizonte de planejamento finito geralmente está uma demanda dinâmica e, ao planejamento infinito, uma demanda constante. Além disso, o sistema pode ser classificado como um sistema do tipo contínuo ou discreto. Em termos de terminologia do período de tempo, os problemas de dimensionamento de lotes podem ser denominados de *big bucket* ou *small bucket*. Os problemas *big bucket* apresentam um período de tempo longo o suficiente para produzir itens múltiplos, em casos de problema multi item, entretanto, em problemas *small bucket* o período de tempo é tão curto que só um item pode ser produzido em cada período de tempo.

- Número de estágios: Os sistemas de produção podem ser de estágio único ou multiestágio. Em sistemas de estágio único as matérias-primas, depois de serem processadas em uma única operação, são transformadas em produto final. As demandas de produtos são avaliadas diretamente a partir de pedidos de clientes ou previsões de mercado, sendo conhecida como demanda independente. Em sistemas multiestágio, as matérias-primas, após serem processadas em várias operações, são transformadas em produto final. Neste tipo de sistema a saída de uma operação (estágio) é entrada para outra operação e, portanto, possui uma demanda dependente. Problemas de multiestágio são mais difíceis de resolver do que problemas de nível único.
- Número de produtos: Existem dois tipos principais de sistemas de produção em termos do número de produtos. No planejamento de produção de item único, há apenas um item final (ou produto final) para o qual a atividade de planejamento é organizada, entretanto, para a produção de múltiplos itens, há vários itens finais. A complexidade dos problemas com vários itens é muito maior do que aquela dos problemas de item único.
- Restrições de capacidade ou recursos: Em sistemas de produção é comum encontrar restrições de capacidades ou recursos como mão-de-obra, equipamentos, máquinas, orçamento etc. Quando não há nenhuma restrição de recursos, o problema é denominado “não-capacitado” e quando as restrições de capacidade estão presente, o problema é dito “capacitado”. As restrições de capacidade são importantes e estão diretamente relacionadas com a complexidade do problema. Desta forma, problemas com restrições de capacidade possuem resolução mais difícil.
- Deterioração de produtos: Nos casos em que a deterioração dos itens é possível, encontra-se restrições no tempo de espera de estoque, afetando a complexidade do problema.
- Demanda: O tipo de demanda é considerado como uma entrada para o modelo do problema. A demanda estática, ou constante, não muda seu valor ao longo do tempo, enquanto que na demanda dinâmica ocorre o contrário. Se a demanda é conhecida antecipadamente (estática ou dinâmica), ela é dita determinística, entretanto, se for baseada em alguma probabilidade, é

denominada probabilística. Problemas com demanda dinâmica e dependente (multiestágio) são muito mais complexos do que problemas com demanda estática e/ ou independente. Assim como, problemas com demanda probabilística são mais complexos do que problemas com demanda determinística.

- Estrutura de preparação (*setup*): É comum ocorrer tempo de *setup* ou custo de *setup* entre a troca de produção de diferentes produtos. Os custos e/ ou tempo de *setup* geralmente são modelados pela introdução de variáveis binárias no modelo matemático do problema e faz com que sua resolução seja mais difícil. Existem dois tipos de estrutura de *setup*, estrutura de *setup* simples e complexa. Quando o tempo de *setup* e custo são independentes da sequência de produção e decisões de períodos anteriores, ele é dito *setup* simples, por outro lado, se depender da sequência de produção é chamado de *setup* complexo.

As pesquisas sobre o dimensionamento de lotes tiveram início com o modelo clássico *Economic Order Quantity* (EOQ), que considera um processo de produção de único estágio, sem restrições de capacidade, tornando o problema de item único, demanda estacionária, horizonte de planejamento infinito e solução ótima fácil de obter. Por apresentar suposições muito restritivas, outros modelos de dimensionamento de lote foram desenvolvidos, buscando uma melhor representação da realidade (DREXL e KIMMS, 1997).

Posteriormente novos modelos foram criados baseados no modelo *Economic Order Quantity* visando incluir características que melhor representassem os problemas reais. Assim, o modelo EOQ foi estendido para o *Economic Lot Scheduling Problem* (ELSP), onde estão presentes restrições de capacidade de produção. Os recursos são geralmente compartilhados por vários itens em comum, desta forma, este modelo é de multi item e de estágio único. Entretanto, o ELSP assume demanda estacionária também, tempo contínuo e horizonte de planejamento infinito. A resolução ótima do problema ELSP é considerada NP-hard, assim, métodos heurísticos são mais comuns (DREXL e KIMMS, 1997).

Segundo Hsu (1983), a aplicação rotineira da fórmula *Economic lot sizing* para cada produto separadamente, pode frequentemente levar ao fenômeno de

“interferência”, no qual, a máquina seria obrigada a produzir dois itens ao mesmo tempo, o que é impossível. Desta forma, o *Economic Lot Scheduling Problem* (ELSP) visa encontrar uma programação da produção viável que permita um padrão cíclico de produção para cada produto de tal forma que os custos de *setup* e de estoque para todos os produtos por unidade de tempo sejam minimizados.

Uma revisão de literatura sobre ELSP é encontrada em Bahl *et al.* (1987), De Bodt *et al.* (1984), Rogers (1958) e Elmaghraby (1978). Nos trabalhos de Dobson (1987), Gallego e Joneja (1994) e Zipkin (1991) são encontrados métodos heurísticos para a resolução deste problema. Autores como Federgruen e Tzur (1991), Aggarwal e Park (1993) e Wagelmans *et al.* (1992), propuseram métodos para solução exata deste problema.

O problema de Wagner e Whitin (1985) deu um passo diferente a partir dos pressupostos do modelo EOQ, considerando a demanda dinâmica e um horizonte de planejamento finito, subdividido em vários períodos discretos. A demanda é, portanto, dada por período e pode variar ao longo do tempo. Entretanto, ainda é considerada a capacidade ilimitada, o que significa que o problema WW de nível único considera a produção de um único item. As próximas gerações de modelos abordaram a combinação de restrições de capacidade e demanda dinâmica, pressupostos que incomodavam a comunidade acadêmica desde então (DREXL e KIMMS, 1997).

Portanto, em decorrência da importância deste problema para o planejamento e controle da produção é apresentado um breve panorama da teoria de formulações de problemas de dimensionamento de lotes e *scheduling* existentes.

2.4. Problema de Dimensionamento de Lotes Capacitado (CLSP)

Como uma extensão ao modelo Wagner–Whitin surge o modelo *Capacitated Lot Sizing Problem* (CLSP), com restrições de capacidade. De acordo com Karimi *et al.* (2003), o modelo assume pressupostos de planejamento da produção de único nível, com horizonte de planejamento finito e demanda dinâmica conhecida, sem ocorrência de atrasos. Seu objetivo é determinar um plano de produção com mínimo custo e as restrições de capacidade restringem a quantidade de produção

em cada período. Estão presentes também, um custo de *setup* fixo e um custo de manutenção de estoque proporcional à quantidade e ao tempo de estoque. No clássico modelo CLSP, ainda que os custos de *setup* possam variar para cada produto e período, eles são independentes da sequência. Entretanto, existem algumas variantes do CLSP, onde os *setups* são dependentes da sequência, o qual é denominado de estrutura de *setup* complexa.

O modelo CLSP é detalhado a seguir, como apresentado em Drexl e Kimms (1997):

Variáveis de decisão do modelo- CLSP:

I_{jt} Quantidade do item j em estoque no final do período t ;

q_{jt} Quantidade produzida do item j no período t ;

x_{jt} Variável binária que indica ocorrência de *setup* para a produção do item j no período t ($x_{jt} = 1$), caso contrário ($x_{jt} = 0$).

Parâmetros do modelo- CLSP:

C_t Capacidade disponível da máquina no período t ;

d_{jt} Demanda externa do produto j no período t ;

h_j Custo não negativo de estoque para o produto j ;

I_{j0} Estoque inicial do produto j ;

J Número de itens;

p_j Capacidade necessária para produção de uma unidade do produto j ;

s_j Custo não negativo de *setup* para o produto j ;

T Número de períodos.

$$\text{Minimizar } \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T (s_j x_{jt} + h_j I_{jt}) \quad (1)$$

Sujeito a:

$$I_{jt} = I_{j(t-1)} + q_{jt} - d_{jt} \quad j = 1, \dots, J \quad t = 1, \dots, T \quad (2)$$

$$p_j q_{jt} \leq C_t x_{jt} \quad j = 1, \dots, J \quad t = 1, \dots, T \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^J p_j q_{jt} \leq C_t \quad t = 1, \dots, T \quad (4)$$

$$x_{jt} \in \{0,1\} \quad j = 1, \dots, J \quad t = 1, \dots, T \quad (5)$$

$$I_{jt}, q_{jt} \geq 0 \quad j = 1, \dots, J \quad t = 1, \dots, T \quad (6)$$

A Equação (1), função objetivo, representa os custos de *setup* e estoque. A Equação (2) representa o balanceamento de estoque. A restrição (3) impõe que a produção de um item só pode ocorrer se a máquina estiver pronta para esse item em particular. A restrição (4) diz respeito à limitação da capacidade. A Equação (5) define como binárias as variáveis de *setup* e as desigualdades (6) são as condições de não-negatividade.

Ainda de acordo com Drexel e Kimms (1997), o modelo CLSP pode ser chamado de problema *big bucket*, no qual vários itens podem ser produzidos por período. Esse período normalmente diz respeito a um intervalo de tempo, por exemplo, uma semana, com horizonte de planejamento normalmente inferior a seis meses. Resolver o modelo CLSP de forma ótima pode ser considerado NP-hard. As decisões de sequenciamento não estão integradas ao modelo CLSP. Portanto, a abordagem usual seria resolver o problema inicialmente e depois, resolver um problema de sequenciamento para cada período separadamente. Trabalhos que tentam integrar problemas de dimensionamento de lote e sequenciamento podem ser encontrados em Dauzère-Péres e Lasserre (1994a), Dauzère-Péres e Lasserre (1994b), Lasserre (1992).

2.5. Problema de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes Discretos (DLSP)

Se subdividirmos os (macro) períodos do modelo CLSP em vários (micro) períodos temos o problema DLSP- Dimensionamento e sequenciamento de lotes discretos (*Discrete Lot Sizing and Scheduling*). A característica principal deste modelo é a chamada produção “tudo ou nada”, ou seja, somente um item pode ser produzido por período e, se for, a produção usa toda a capacidade disponível. Sendo assim,

devido a essa característica esse modelo é chamado de *small bucket* e seus períodos geralmente correspondem a pequenos intervalos de tempo como horas ou turnos (DREXL e KIMMS, 1997).

Conforme é apresentado por Fleischmann (1990) o DLSP consiste em programar vários produtos em uma única máquina, de forma a atender demanda dinâmica conhecida e minimizar a soma dos custos de estoque e *setup*. Como os intervalos de planejamento são divididos em vários curtos períodos, por exemplo, turnos ou dias, os *setups* podem ocorrer apenas no início de cada período. Ainda de acordo com o autor, em contrapartida do modelo *Capacitated Lotsizing Problem* (CLSP) que tem como principal suposição a existência de exatamente um *setup* por período para cada item que é produzido no período e não é considerada a sequência de lotes dentro de cada período, o problema DLSP assume que o processo de produção sempre executa períodos completos sem mudanças, implicando assim, na produção de apenas um item por período. Este modelo considera a sequência dos lotes de produção.

Para a formulação do modelo DLSP são utilizadas as mesmas variáveis de decisão e parâmetros do modelo CLSP. No entanto, os custos de *setup* acontecem somente se a produção de um novo lote é iniciada, ao contrário do modelo anterior, onde os custos de *setup* eram acrescentados em cada período em que ocorresse a produção. Conforme demonstrado por Drexel e Kimms (1997) para a modelagem do DLSP é necessário uma nova variável de decisão e um novo parâmetro, os quais, assim como a formulação do modelo, são apresentados a seguir tratado como um modelo de programação de inteiro misto.

Nova variável de decisão do modelo- DLSP (DREXL E KIMMS ; 1997):

y_{jt} Variável binária que indica se a máquina está configurada para a produção do item j no período t ($y_{jt} = 1$), caso contrário ($y_{jt} = 0$).

Novo parâmetro do modelo- DLSP:

y_{j0} Valor binário que indica se a máquina está configurada para a produção do item j no período t ($y_{j0} = 1$), caso contrário ($y_{j0} = 0$).

$$\text{Minimizar } \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T (s_j x_{jt} + h_j I_{jt}) \quad (7)$$

Sujeito a:

$$I_{jt} = I_{j(t-1)} + q_{jt} - d_{jt} \quad j = 1, \dots, J \quad t = 1, \dots, T \quad (8)$$

$$p_j q_{jt} = C_t y_{jt} \quad j = 1, \dots, J \quad t = 1, \dots, T \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^J y_{jt} \leq 1 \quad t = 1, \dots, T \quad (10)$$

$$x_{jt} \geq y_{jt} - y_{j(t-1)} \quad j = 1, \dots, J \quad t = 1, \dots, T \quad (11)$$

$$y_{jt} \in \{0,1\} \quad j = 1, \dots, J \quad t = 1, \dots, T \quad (12)$$

$$I_{jt}, q_{jt}, x_{jt} \geq 0 \quad j = 1, \dots, J \quad t = 1, \dots, T \quad (13)$$

A Equação (7), função objetivo, representa os custos com *setup* e estoques. A Equação (8) representa o balanço de estoque. A característica de “tudo ou nada”, a qual indica que quando um item é produzido dentro de um período é utilizada toda a capacidade de produção, é fornecida pela Equação (9), que em contraste com o modelo CLSP, iguala o lado direito e esquerdo da restrição. A restrição (10) diz que a máquina é preparada para processar apenas um item por período. O início de um novo lote é definido pela Equação (11). A Equação (12) define a variável de *setup* como binária. Como, por meio das equações (11) e (12), a variável x_{jt} é obtida pela combinação de variáveis binárias, somente uma restrição de não negatividade para ela é suficiente (13).

Segundo Brahim *et al.* (2006), além da desvantagem de utilização total da capacidade de produção para produzir um item, ou nada é produzido (suposição de tudo ou nada), outra desvantagem é tratada no *Continuous Setup Lot Sizing Problem* (CSLP), que permite o uso parcial da capacidade disponível em cada período, ainda que apenas um único item possa ser produzido. Já no *Proportional Lot Sizing and Scheduling Problem* (PLSP), a capacidade restante em um período é utilizada para produzir um segundo item.

2.6. Problema de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes com preparação Contínua (CSLP)

O modelo *Continuous Setup Lot Sizing Problem* (CSLP), apesar de ser muito semelhante ao modelo DLSP, utilizando as mesmas variáveis e parâmetros, não apresenta a rígida condição “tudo ou nada”. Entretanto, ainda é permitido a produção de somente um produto por período. Assim, uma vez que a capacidade de um período não precisa ser completamente utilizada, são permitidos lotes “contínuos” que se prolongam por vários períodos. O modelo CSLP é definido como *small bucket* (COPIL *et al.*, 2017).

A formulação do modelo CSLP é apresentada a seguir como um modelo de programação misto inteiro, como demonstrado em Drexel e Kimms (1997).

$$\text{Minimizar } \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T (s_j x_{jt} + h_j I_{jt}) \quad (14)$$

Sujeito a:

$$I_{jt} = I_{j(t-1)} + q_{jt} - d_{jt} \quad j = 1, \dots, J \quad t = 1, \dots, T \quad (15)$$

$$p_j q_{jt} \leq C_t y_{jt} \quad j = 1, \dots, J \quad t = 1, \dots, T \quad (16)$$

$$\sum_{j=1}^J y_{jt} \leq 1 \quad t = 1, \dots, T \quad (17)$$

$$x_{jt} \geq y_{jt} - y_{j(t-1)} \quad j = 1, \dots, J \quad t = 1, \dots, T \quad (18)$$

$$y_{jt} \in \{0,1\} \quad j = 1, \dots, J \quad t = 1, \dots, T \quad (19)$$

$$I_{jt}, q_{jt}, x_{jt} \geq 0 \quad j = 1, \dots, J \quad t = 1, \dots, T \quad (20)$$

Comparando os modelos DLSP e CSLP percebe-se uma diferença sutil, entre as restrições (9) e (16), sendo que agora são permitidos a produção de lotes contínuos, mesmo não violando as restrições de capacidade. Entretanto, uma característica importante que difere entre esses modelos é que no modelo DLSP os custos de *setup* são adicionados sempre que um novo lote começa. Considere, por exemplo, que um lote do produto j tenha sido concluído no período t e que outro lote para o mesmo produto j tenha sido programado para o período $t' > t$.

Considerando agora o caso em que a máquina encontra-se ociosa no período $\tau = t + 1, \dots, t' - 1$. No modelo DLSP, seriam incluídos duas vezes custos de *setup* para o produto j , o que não ocorre no modelo CSLP (DREXL e KIMMS, 1997). Comparações entre esses modelos também podem ser encontrados em Karmarkar *et al.* (1987), Karmarkar e Schrage (1985) e Bitran e Matsuo (1986).

2.7. Problema de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes Proporcional (PLSP)

No modelo CSLP a capacidade de um período que não é totalmente utilizada fica ociosa, como uma tentativa de aproveitar essa capacidade ociosa desenvolve-se o *Proportional lotsizing and scheduling problem* (PLSP). Este modelo, introduzido por Hasse (1994), permite a ocorrência de no máximo um *setup* dentro de cada período, ou seja, a produção de no máximo dois produtos diferentes por período. O PLSP é definido como *small bucket* e os custos de *setup* dependem da sequência (COPIIL *et al.*, 2017).

Conforme Jans e Degraeve (2008) o PLSP relaxa a restrição de permitir a produção de apenas um produto por período, presente nos modelos DLSP e CSLP. Permitindo no máximo um *setup* por período, mas onde o *setup* do período anterior pode ser transferido para o próximo período, faz com que seja possível a produção de no máximo dois produtos diferentes por período. Desta forma, se dois itens forem produzidos no período t o primeiro deve ser o mesmo que o último item do período anterior. Este modelo representa problemas de dimensionamento de lotes que abrangem cada vez mais aspectos de sequenciamento, visto que é necessário se os custos ou tempos de *setup* são dependentes da sequência. Um modelo de programação inteiro misto pode se formulado para o modelo PLSP.

Modelo- PLSP (DREXL E KIMMS ,1997):

$$\text{Minimizar } \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T (s_j x_{jt} + h_j I_{jt}) \quad (21)$$

Sujeito a:

$$I_{jt} = I_{j(t-1)} + q_{jt} - d_{jt} \quad j = 1, \dots, J \quad t = 1, \dots, T \quad (22)$$

$$p_j q_{jt} \leq C_t (y_{j(t-1)} + y_{jt}) \quad j = 1, \dots, J \quad t = 1, \dots, T \quad (23)$$

$$\sum_{j=1}^J p_j q_{jt} \leq C_t \quad t = 1, \dots, T \quad (24)$$

$$\sum_{j=1}^J y_{jt} \leq 1 \quad t = 1, \dots, T \quad (25)$$

$$x_{jt} \geq y_{jt} - y_{j(t-1)} \quad j = 1, \dots, J \quad t = 1, \dots, T \quad (26)$$

$$y_{jt} \in \{0,1\} \quad j = 1, \dots, J \quad t = 1, \dots, T \quad (27)$$

$$I_{jt}, q_{jt}, x_{jt} \geq 0 \quad j = 1, \dots, J \quad t = 1, \dots, T \quad (28)$$

A função objetivo e a maioria das restrições do modelo PLSP são as mesmas do modelo CSLP, exceto nas equações (23) e (24). A Equação (23) diz que a produção de um item em um determinado período só pode ocorrer se a máquina estiver adequadamente programada no início ou no final desse período, o que permite utilizar a configuração da máquina do período anterior para a continuidade da produção no período seguinte. A restrição (24) garante que, mesmo com a produção de mais de um item por período, a capacidade total do período seja respeitada. Similar ao modelo CSLP, períodos ociosos entre dois lotes do mesmo produto não incorrem em custos adicionais de *setup*. Outras variações do modelo PSLP podem ser encontrados em Drexl e Haase (1995), Drexl e Haase (1996), Haase (1994), Kimms (1996) e Kimms (1997).

2.8. Problema Geral de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes (GLSP)

O Problema de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes Generalizado-GLSP (*General Lotsizing and Scheduling Problem*) estudado por Fleischmann e Meyr (1997) aborda um problema que integra as decisões de dimensionamento e sequenciamento de lotes de vários produtos em uma única máquina, com restrições de capacidade. Os lotes, que são contínuos e atendem uma demanda dinâmica e

determinística em um horizonte de planejamento finito e sem *backlogging* (atraso), são programados com o objetivo de minimizar os custos com estoque e *setup*, dependentes da sequência.

Uma crítica aos modelos *small bucket* é que, para o tamanho dos problemas do mundo real o número de períodos é proibitivamente grande (DREXL e KIMMS, 1997). Entretanto, no modelo GLSP os macroperíodos são divididos em períodos menores (subperíodos). As mudanças de estado ocorrem no início e final dos microperíodos, desta forma, a suposição “tudo ou nada” ocorrem agora nos microperíodos, definidos *a priori* com comprimento variável. Em cada subperíodo somente um item é produzido.

Modelo GLSP (DREXL E KIMMS, 1997):

Novo parâmetro para o modelo:

N_t Conjunto dos subperíodos n , pertencentes ao período t .

Variáveis de decisão para o modelo:

I_{jt} Estoque do item j no final do período t ;

q_{jn} Quantidade produzida do item j no subperíodo n ;

x_{jn} Indica se existe um *setup* para a produção do item j no subperíodo n ($x_{jn} = 1$), caso contrário ($x_{jn} = 0$);

y_{jn} Indica se a máquina está pronta para produzir o item j no subperíodo n ($y_{jn} = 1$), caso contrário ($y_{jn} = 0$).

Para indicar o primeiro subperíodo do período t , usa-se:

$$F_t = 1 + \sum_{\tau=1}^{t-1} N_{\tau} \quad (29)$$

Para indicar o último subperíodo do período t , usa-se:

$$L_t = F_t + N_t - 1 \quad (30)$$

Tem-se que,

$$N = \sum_{t=1}^T N_t \quad (31)$$

representa o número total de subperíodos e, portanto, o número máximo de lotes.

$$\text{Minimizar } \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N s_j x_{jn} + \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T h_j I_{jt} \quad (32)$$

Sujeito a:

$$I_{jt} = I_{j(t-1)} + \sum_{n=F_t}^{L_t} q_{jn} - d_{jt} \quad j = 1, \dots, J \quad t = 1, \dots, T \quad (33)$$

$$p_j q_{jn} \leq C_t y_{jn} \quad j = 1, \dots, J \quad t = 1, \dots, T \quad (34)$$

$$n = F_t, \dots, L_t$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{n=F_t}^{L_t} p_j q_{jn} \leq C_t \quad t = 1, \dots, T \quad (35)$$

$$\sum_{j=1}^J y_{jn} \leq 1 \quad n = 1, \dots, N \quad (36)$$

$$x_{jn} \geq y_{jn} - y_{j(n-1)} \quad j = 1, \dots, J \quad n = 1, \dots, N \quad (37)$$

$$y_{jn} \in \{0,1\} \quad j = 1, \dots, J \quad n = 1, \dots, N \quad (38)$$

$$I_{jt} \geq 0 \quad j = 1, \dots, J \quad t = 1, \dots, T \quad (39)$$

$$q_{jn}, x_{jn} \geq 0 \quad j = 1, \dots, J \quad t = 1, \dots, T \quad (40)$$

A função objetivo, Equação (32), é a soma dos custos com estoque e *setup*. A Equação (33) representa o balanceamento de estoque, a qual demonstra que um produto específico pode ser produzido em vários subperíodos em um período. A Equação (34) diz que a máquina deve estar configurada para a produção do item j no subperíodo n . A Equação (35) assegura que a soma dos tempos de produção não ultrapasse a capacidade do período t . A Equação (36) diz que só um produto é produzido em cada subperíodo. O subperíodo em que um *setup* deve ser realizado é indicado na Equação (37), ou seja, o começo de um novo lote. As Equações (38), (39) e (40) indicam o domínio das variáveis.

2.9. Problema Geral com tempos de Setup dependentes da Sequência (GLSPST)

As trocas entre produtos que utilizam a mesma linha de produção muitas vezes causam significativos tempos e custos de *setup* que são dependentes da sequência. Assim, Meyr (2000) apresentou uma extensão do modelo GLSP para tratar de tempo e custo de *setup* dependentes da sequência, o qual é chamado GLSPST (*General Lot Sizing and Scheduling Problem- Setup Times*). O problema é, portanto, definir a programação de lotes contínuos de vários produtos em uma única máquina (linha de produção), atendendo uma demanda determinística e dinâmica em um horizonte de planejamento finito sem *backlogging*, com o objetivo de minimizar os custos com *setup* e estoque (MEYR, 2000).

A seguir é formulado o modelo GLSPST, como apresentado por Meyr (2000):

Parâmetros do modelo:

S_t Conjunto de microperíodos s , pertencentes ao macroperíodo ;

K_t Capacidade (tempo) disponível no macroperíodo ;

a_j Consumo de capacidade (tempo) necessário para produzir uma unidade do produto j ;

m_j Lote mínimo do produto j (unidade);

h_j Custo de estoque do produto j (por unidade e período);

s_{ij} Custo de setup para a troca da produção do item i para o item j ;

st_{ij} Tempo de setup para a troca da produção do item i para o item j ;

d_{jt} Demanda do produto j no período t (unidade);

I_{j0} Estoque inicial do produto j no início do horizonte de planejamento (unidades);

y_{j0} Indica se a máquina está configurada para a produção do item j no primeiro subperíodo do horizonte de planejamento ($y_{j0} = 1$), caso contrário ($y_{j0} = 0$).

Variáveis do modelo:

$I_{jt} \geq 0$ Estoque do produto j no final do macroperíodo (unidades);

$x_{js} \geq 0$ Quantidade produzida do item j no microperíodo s (unidades);

$y_{js} \in \{0,1\}$ Indica que a máquina está configurada para produzir o item j no microperíodo s ($y_{js} = 1$), caso contrário ($y_{js} = 0$).

$z_{ijs} \geq 0$ Indica mudança de produção do item i para o item j no início do microperíodo s ($z_{ijs} = 1$), caso contrário ($z_{ijs} = 0$).

$$\text{Minimizar } \sum_{j,t} h_j I_{jt} + \sum_{i,j,s} s_{ij} z_{ijs} \quad (41)$$

Sujeito a:

$$I_{jt} = I_{j,t-1} + \sum_{s \in S_t} x_{js} - d_{jt} \quad \forall t, j, \quad (42)$$

$$\sum_{j,s \in S_t} a_j x_{js} + \sum_{i,j,s \in S_t} s_{ij} z_{ijs} \leq K_t \quad \forall t, \quad (43)$$

$$x_{js} \leq \frac{K_t}{a_j} y_{js} \quad \forall s, j, \quad (44)$$

$$x_{js} \geq m_j (y_{js} - y_{j,s-1}) \quad \forall s, j, \quad (45)$$

$$\sum_j y_{js} = 1 \quad \forall s, \quad (46)$$

$$z_{ijs} \geq y_{i,s-1} + y_{js} - 1 \quad \forall s, i, j, \quad (47)$$

A função objetivo, equação (41), representa os custos com estoque e *setup* dependentes da sequência. A equação (42) diz respeito ao balanceamento de estoque, que em conjunto com $I_{jt} \geq 0$, assegura que a demanda seja atendida sem *backlogging*. A equação (43) impõe que os tempos de produção e *setup* de um período t não ultrapassem a capacidade do macroperíodo t . As restrições (44) e (45) indicam que a produção de um produto j só pode ocorrer em um microperíodo quando a máquina está configurada para este produto e que apenas um *setup* é configurado em cada microperíodo. Para a mudança de configuração de produção do item i para o item j , deve ser realizada uma troca dentro do mesmo macro período, acrescentando tempo e custos de *setup*. A equação (46) impõe um lote

mínimo para cada item, evitando mudanças de *setup* sem alteração do produto, o que levaria a um acréscimo errado de custos e tempo de *setup*. A equação (47) indica se houve troca de produção do tipo de produto entre dois subperíodos.

2.10. Problema Geral em Máquinas em Paralelo (GLSPPL)

Meyr (2002) desenvolveu o modelo de Fleischmann e Meyr (1997) para o caso com máquinas operando em paralelo, denominado de *general lot-sizing and scheduling problem parallel production line* (GLSPPL). O problema assume múltiplos produtos, múltiplas máquinas distintas capacitadas, tempos de *setup* dependentes da sequência, sem *backlogging* e como função objetivo minimizar os custos com *setup* (dependentes da sequência), com estoque e produção (DASTIDAR e NAGI, 2005). A formulação do modelo, seus parâmetros e variáveis são apresentadas a seguir.

Modelo GLSPPL (MEYR, 2002):

Parâmetros do modelo:

S_{lt} Conjunto de microperíodos s , pertencentes ao macro período t na máquina l ;

K_{lt} Capacidade (tempo) de produção disponível na máquina l no macro período t ;

a_{lj} Consumo de capacidade (tempo) necessário para produzir uma unidade do produto j na máquina l ;

m_{lj} Lote mínimo do produto j (unidade) produzido na máquina l ;

h_j Custo de estoque do produto j (por unidade e período);

c_{lj} Custo de produção do produto j (unidade) na máquina l ;

s_{lij} Custo de *setup* para a troca da produção do item i para o item j na máquina l ;

st_{lij} Tempo de *setup* para a troca da produção do item i para o item j na máquina l ;

d_{jt} Demanda do produto j no período t (unidade);

I_{j0} Estoque inicial do produto j no início do horizonte de planejamento (unidades);

y_{lj0} Indica se a máquina l está configurada para a produção do item j no primeiro subperíodo do horizonte de planejamento ($y_{j0} = 1$), caso contrário ($y_{j0} = 0$).

Variáveis do modelo:

$I_{jt} \geq 0$ Estoque do produto j no final do macro período t (unidades);

$x_{ljs} \geq 0$ Quantidade produzida do item j no microperíodo s (unidades) na máquina l ;

$y_{ljs} \in \{0,1\}$ Indica que a máquina l está configurada para produzir o item j no microperíodo s ($y_{js} = 1$), caso contrário ($y_{js} = 0$);

$z_{ljs} \geq 0$ Indica mudança de produção do item i para o item j na máquina l no início do microperíodo s ($z_{ijs} = 1$), caso contrário ($z_{ijs} = 0$).

$$\text{Minimizar } \sum_{t,j} h_j I_{jt} + \sum_{l,i,j,s} s_{lij} z_{ljs} + \sum_{l,j,s} c_{lj} x_{ljs} \quad (48)$$

Sujeito a:

$$I_{jt} = I_{j,t-1} + \sum_{l,s \in S_{jt}} x_{ljs} - d_{jt} \quad \forall t, j, \quad (49)$$

$$\sum_{j,s \in S_{lt}} a_{lj} x_{ljs} \leq K_{lt} - \sum_{i,j,s \in S_{lt}} s_{lij} z_{ljs} \quad \forall l, t, \quad (50)$$

$$x_{ljs} \leq \frac{K_{lt}}{a_{lj}} y_{ljs} \quad \forall l, j, s, \quad (51)$$

$$x_{ljs} \geq m_{lj} (y_{ljs} - y_{lj,s-1}) \quad \forall l, j, s, \quad (52)$$

$$\sum_j y_{ljs} = 1 \quad \forall l, s, \quad (53)$$

$$z_{ljs} \geq y_{li,s-1} + y_{ljs} - 1 \quad \forall l, i, j, s. \quad (54)$$

A função objetivo, equação (48), tem por objetivo minimizar os custos com estoque, *setup* e produção. A equação (49) faz o balanceamento de estoque, que em conjunto com $I_{jt} \geq 0$ assegura que a demanda é atendida sem backlogging. A equação (50) indica que o tempo de produção deve ser menor que a capacidade disponível, que é reduzida pelo tempo de *setup*. As equações (51) e (52) impõem que a produção de um item j só pode ocorrer no subperíodo s se a máquina l estiver configurada para este item e que a capacidade da máquina será totalmente utilizada para este item, caso seja produzido. A equação (53) define um lote mínimo de produção para cada produto, evitando *setups* sem troca de produtos. A equação (54) indica se houve troca de produção do produto i para o produto j entre dois subperíodos.

2.11. Problema de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes Multiestágio

Os métodos estudados até agora abordam processos produtivos de único nível (ou estágio), entretanto, no mundo real e principalmente em situações industriais, os processos apresentam complexas estruturas de produção em diversos níveis produtivos, o que faz necessário estudos desta configuração.

Tentando abordar uma estrutura de produção com múltiplos níveis (ou multiestágio) Kimms (1996) propôs um modelo baseado no PLSP (*A PLSP- model for multi-level*), entretanto, ainda considerando a limitação da produção em uma única máquina (*single-machine*).

Drexel e Kimms (1997) apresentaram um modelo *multi-level* a partir do modelo de nível único PLSP denominado *multi-level* PLSP. Utilizando as mesmas variáveis do modelo *single-level*, com novos parâmetros e outros redefinidos, ele considera que a produção de um produto final exige a produção de itens intermediários obtidos em diferentes estágios anteriores. A formulação deste modelo é demonstrada a seguir.

Modelo *multi-level*-PLSP (DREXL E KIMMS ,1997):

Parâmetros do modelo:

a_{ji} Seu valor é zero se o item i não for um sucessor imediato do item j . Caso contrário, representa a quantidade do item j que é diretamente necessário para produzir um item i ;

C_{mt} Capacidade disponível da máquina m no período t ;

d_{jt} Demanda externa do item j no período t ;

h_j Custo de estoque não negativo para ter uma unidade do item j por um período no estoque;

q_{it} Quantidade do item i produzido no período t ;

I_{j0} Estoque inicial para o item j ;

Φ_m Conjunto de todos os itens que compartilham a máquina m ;

J Número de itens;

M Número de máquinas;

m_j Máquina onde o item j é produzido;

p_j Capacidade necessária para produzir um item j ;

s_j Custo não negativo de setup para o item j ;

S_j Conjunto de sucessores imediatos do item j ;

T Número de períodos;

v_j Tempo de processamento (lead time) do item i ;

y_{j0} Estado de setup inicial;

$$\text{Minimizar } \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T (s_j x_{jt} + h_j I_{jt}) \quad (55)$$

Sujeito a:

$$I_{jt} = I_{j(t-1)} + q_{jt} - d_{jt} - \sum_{i \in S_j} a_{ji} q_{it} \quad j = 1, \dots, J, \quad t = 1, \dots, T, \quad (56)$$

$$I_{jt} \geq \sum_{i \in S_j} \sum_{\tau=t+1}^{\min\{t+v_j, T\}} a_{ji} q_{i\tau} \quad j = 1, \dots, J, \quad t = 0, \dots, T-1, \quad (57)$$

$$p_j q_{jt} \leq C_{m,jt} (y_{j(t-1)} + y_{jt}) \quad j = 1, \dots, J, \quad t = 1, \dots, T, \quad (58)$$

$$\sum_{j \in \Phi_m} p_j q_{jt} \leq C_{mt} \quad m = 1, \dots, M \quad t = 1, \dots, T \quad (59)$$

$$\sum_{j \in \Phi_m} y_{jt} \leq 1 \quad m = 1, \dots, M \quad t = 1, \dots, T, \quad (60)$$

$$x_{jt} \geq y_{jt} - y_{j(t-1)} \quad j = 1, \dots, J, \quad t = 1, \dots, T, \quad (61)$$

$$y_{jt} \in \{0, 1\} \quad j = 1, \dots, J \quad t = 1, \dots, T, \quad (62)$$

$$I_{jt}, q_{jt}, x_{jt} \geq 0 \quad j = 1, \dots, J \quad t = 1, \dots, T. \quad (63)$$

O modelo apresenta função objetivo e a maioria das restrições como o *single-level* PLSP. A equação (55), função objetivo, representa os custos com *setup* e estoque. A equação (56) realiza o balanceamento de estoques, sendo que no final de um período t tem-se em estoque o que estava lá no final do período anterior ($t-1$) mais o que foi produzido no período menos a demanda externa e interna. A equação (57) assegura que no final do período tenha quantidades suficientes de item j em estoque para atender a demanda interna. A restrição (58) diz que somente será produzido o item j se a máquina estiver configurada para sua produção. A equação (59) diz que a capacidade da máquina m no período t não deve ser ultrapassada. A restrição (60) impõe que somente um item seja produzido na máquina m por período. A equação (61) mostra o início de um novo lote. As equações (62) e (63) mostram o domínio das variáveis.

2.12. Problema Geral em Máquinas em Paralelo Multiestágio (GLSPMS)

O trabalho de Seeanner e Meyr (2013) apresenta um modelo melhorado do *General Lot-sizing and Scheduling Problem for Multiple production Stages* (GLSPMS), também estudado no trabalho de Meyr (2004). Ele trata de um problema simultâneo

de dimensionamento e programação de lotes de múltiplos itens e *multi-level*. O modelo assume uma demanda dinâmica determinística, sem *backlogging*, com tempo de *setup* dependentes da sequência e como função objetivo a soma dos custos de produção, custos de *setup*, custos de estoque, compra externa, hora extra e esperas.

A característica principal do modelo é considerar uma grade de tempo comum para todas as linhas de produção dos diferentes estágios, que se baseiam em curtos períodos de tempo (micro). Em cada microperíodo podem ser realizadas atividades de *setup*, produção e esperas, ou seja, o comprimento de um microperíodo pode ser compartilhado entre tempos de *setup*, produção e ocioso. Permite, também, que a produção de um item iniciada em parte de um microperíodo seja finalizado no microperíodo seguinte, ocasionando o *work-in-process (WIP) stock* (SEEANNER e MEYR, 2013).

O tempo de *setup* de uma máquina pode ser entendido como o tempo incorrido desde o final do processamento de uma tarefa até o início da tarefa seguinte (BARROS e MOCCELLIN, 2004). O tempo gasto no *setup* tem relação direta com o grau de similaridade entre as duas tarefas processadas na sequência em uma mesma máquina. Desta forma, se duas tarefas processadas sucessivamente são similares, o tempo necessário para o *setup* é relativamente pequeno, caso contrário, o tempo necessário será proporcionalmente maior (FLYNN, 1987).

Segundo Allahverdi *et al.* (1999) as operações de *setup* (tempo e custo) têm sido consideradas, na grande maioria das pesquisas sobre *scheduling*, pouco relevantes e, portanto, ignoradas ou incorporadas como parte do tempo de processamento, para o caso de tempo de *setup*. Embora, essa suposição de simplificação possa afetar a qualidade da solução para aplicações que exigem um tratamento explícito do *setup*.

De acordo com Barros e Moccellin (2004), incluir os tempos de *setup* no tempo de processamento simplifica muito a análise em certas aplicações, em especial quando os tempos de *setup* são consideravelmente menores que os tempos de processamento, ou em situações em que o *setup* é realizado para a produção de lotes e ocorre somente uma vez para um grande lote de produção. O que não é o caso de situações onde o tempo de *setup* apresenta uma razão significativa em

relação ao tempo de processamento, onde existe a necessidade de tratá-los em separado, uma vez que eles influenciam na disponibilidade de equipamentos e geram custos específicos, como a necessidade de técnicos especializados para sua execução.

No problema abordado neste trabalho, verificou-se que o tempo de *setup* entre os lotes deste processo é relativamente pequeno em relação ao tempo de processamento, desta forma estes tempos foram considerados parte do tempo de processo nesta pesquisa.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

3.1. Considerações Iniciais

Este trabalho utiliza uma abordagem de pesquisa quantitativa de natureza aplicada, pois está baseado na criação de um modelo quantitativo de planejamento da produção, descrito por um problema de otimização de dimensionamento e sequenciamento de lotes. Segundo Meredith *et al.* (1989), pesquisas em gestão de produção e operações apoiadas em modelos quantitativos podem ser identificadas como uma abordagem de geração de conhecimento racional. Como princípio elas consideram que é possível construir modelos que expliquem ao menos parte do conhecimento de processos reais, ou que é possível identificar parte dos problemas de tomada de decisão encontrados em processos reais (MORABITO e PUREZA, 2012).

De acordo com Bertrand e Fransoo (2002) podem ser encontradas duas classes diferentes de pesquisas quantitativas na literatura, pesquisa axiomática quantitativa e empírica quantitativa. A primeira classe, pesquisa axiomática, é primeiramente direcionada a modelos de problemas idealizados. Sendo assim, a principal preocupação do pesquisador é encontrar soluções para o modelo em questão e garantir que as soluções obtidas tornem possível esclarecer a estrutura do problema retratado no modelo. A pesquisa empírica quantitativa é dirigida por descobertas e medidas empíricas, onde o pesquisador tem como principal preocupação garantir que exista adesão entre observações e ações na realidade e o modelo desenvolvido da realidade estudada (MORABITO e PUREZA, 2012). Dentro das pesquisas quantitativas, a pesquisa proposta pode ser caracterizada como uma pesquisa axiomática.

As pesquisas axiomáticas quantitativas possuem duas classificações, normativa (ou prescritiva) ou descritiva. A pesquisa axiomática normativa tem por objetivo desenvolver normas, políticas, estratégias e ações visando melhorar os resultados

encontrados na literatura, obter uma solução ótima para um problema novo ou comparar a eficiência de estratégias que abordem um mesmo problema, de forma simplificada, ela baseia-se em modelos que prescrevem uma decisão para o problema, como os modelos de programação matemática. A pesquisa axiomática descritiva é direcionada para analisar modelos quantitativos, principalmente com o objetivo de compreender o processo modelado ou explicar suas características, desta forma, ele é fundamentado em modelos que descrevem o comportamento do sistema ou problema modelado (MORABITO e PUREZA, 2012). A pesquisa apresentada neste trabalho pode ser classificada como axiomática quantitativa e normativa, considerando que ela visa encontrar melhores soluções para questões da programação da produção.

Os problemas de planejamento, programação e controle da produção, em sua maioria, envolvem ambientes complexos e incertos, com restrições de capacidade dos processos produtivos, necessidades de matérias-primas e estoque intermediário, limitações de disponibilidade de recursos como mão-de-obra e capital, entre outros (MORABITO, 2008). Desta forma, a pesquisa operacional tem sido amplamente aplicada para tratar atividades deste tipo. Segundo Law e Kelton (1991), a simulação, como técnica, é uma das mais utilizadas na pesquisa operacional. Este trabalho utiliza como método de pesquisa a modelagem e simulação.

O planejamento metodológico adotado nesta pesquisa pode ser resumida pelo método proposto por Law e Kelton (1991), típico de pesquisa operacional. Estudos de pesquisa operacional, em sua maioria, seguem algumas etapas características, embora, na literatura sejam encontradas variações de quantidade e denominação de etapas. As etapas contempladas neste trabalho são apresentadas na Figura 1.

3.2. Conceitualização

Nesta fase são definidos o escopo do problema estudado, uma declaração clara dos objetivos gerais e as questões específicas a serem abordadas, como também, o modelo conceitual do problema. Para a compreensão do processo de produção em lavanderia têxtil e a forma como ocorre a programação da produção, bem como

suas limitações, foram utilizadas informações e dados obtidos no estudo de Oliveira (2013), que desenvolveu um estudo em lavanderia têxtil em sua dissertação de mestrado, pela Universidade Estadual de Maringá, em 2013. A literatura que aborda este tipo de processo também foi revisada.

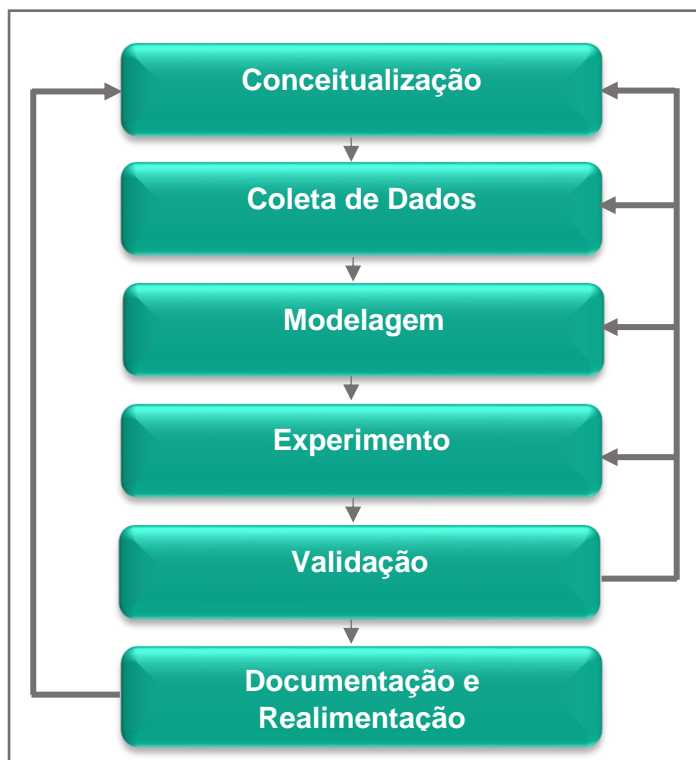


Figura 1- Planejamento metodológico
Fonte: Adaptada de Law e Kelton (1991).

3.3. Coleta de Dados

Consiste na coleta de informações e dados no sistema de interesse (se ele existir) para obter os valores dos parâmetros que serão necessários para utilizar no modelo. Os parâmetros de entrada foram obtidos por meio do desenvolvimento de um problema idealizado em ambiente industrial de lavanderia e por dois estudos de caso.

Para definir as etapas industriais a serem consideradas foi pesquisado na literatura os processos típicos em lavanderia, sendo escolhidos os processos de lavagem, centrifugação e secagem. Desta forma, foram selecionados equipamentos característicos para os processos, peças para a formação dos lotes de produção,

equipes de trabalho e definidos turnos de produção, afim de obter valores para os parâmetros necessários ao modelo.

3.4. Modelagem

Consiste na construção de um modelo matemático para representar o modelo conceitual. Em geral, os modelos matemáticos são construídos a partir de outros modelos presentes na literatura. Assim, após uma revisão dos modelos de dimensionamento e sequenciamento de lotes encontrados na literatura, desenvolve-se um modelo matemático baseado no problema integrado de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção, sendo esse embasado no trabalho de Oliveira (2013), entretanto, abrangendo um maior número de etapas industriais e custos de produção.

3.5. Experimento

A etapa de experimento consiste no processo de obtenção de uma solução para o modelo científico desenvolvido na etapa anterior. Nessa fase utilizou-se o ambiente de modelagem algébrica GAMS (*General Algebraic Modeling System*) para a implementação do modelo desenvolvido e o *solver* CPLEX para resolvê-lo.

3.6. Validação

Verifica se o modelo científico representa apropriadamente o problema, ou seja, se ele descreve à realidade ou ao recorte da realidade considerado. Para a verificação do funcionamento do código computacional foi utilizado um exemplo ilustrativo de menor dimensão e dois estudos de caso.

3.7. Documentação e Realimentação

Consiste na análise e documentação da coerência entre a solução computacional e o modelo conceitual. Nesta etapa inclui-se a redação desta dissertação.

3.8. Modelagem do Problema

Nesta seção é apresentado o modelo matemático elaborado, o qual é do tipo multiperíodo, multi-itens, multimáquinas, multiestágio e multiprocesso, com

capacidade limitada e integrando decisões de dimensionamento e sequenciamento de lotes.

3.9. Índices da Modelagem

No Quadro 1 são apresentados os índices utilizados no modelo matemático.

Quadro 1- Índices do modelo matemático

Simbologia	Descrição
R	Peças de roupa (=roupa)
<i>i</i>	Tipo de Produto (=1,...,N)
<i>j</i>	Processo da Lavadora (=1,...,J)
<i>k</i>	Processo da Centrífuga (=1,...,K)
<i>l</i>	Processo da Secadora (=1,...,L)
<i>t</i>	Período (=h1,...,T)
<i>y</i>	Dia (=dia1,..., Y)

Fonte: Autor (2017)

3.10. Parâmetros da Modelagem

O Quadro 2 apresenta os parâmetros utilizados no modelo.

Quadro 2- Parâmetros utilizados pelo modelo

Simbologia	Descrição
Max_dia _{<i>i</i>}	Quantidade máxima de produto tipo <i>i</i> produzido por dia nas Lavadoras
Min_dia _{<i>i</i>}	Quantidade mínima de produto tipo <i>i</i> produzido por dia nas Lavadoras

Simbologia	Descrição (continuação)
Prev01 _{R*}	Previsão de produção de peças para todo período nas Lavadoras
CEL _{ji}	Custo de energia para processar o produto <i>i</i> na máquina <i>j</i>
CEC _{ki}	Custo de energia para processar o produto <i>i</i> na máquina <i>k</i>
CES _{li}	Custo de energia para processar o produto <i>i</i> na máquina <i>l</i>
CML _{ji}	Custo de mão-de-obra para processar o produto <i>i</i> na máquina <i>j</i>
CMC _{ki}	Custo de mão-de-obra para processar o produto <i>i</i> na máquina <i>k</i>
CMS _{li}	Custo de mão-de-obra para processar o produto <i>i</i> na máquina <i>l</i>
CAL _{ji}	Custo de água para processar o produto <i>i</i> na máquina <i>j</i>
CAC _{ki}	Custo de água para processar o produto <i>i</i> na máquina <i>k</i>
CAS _{li}	Custo de água para processar o produto <i>i</i> na máquina <i>l</i>
CFL _{ji}	Custo fixo para processar o produto <i>i</i> na máquina <i>j</i>
CFC _{ji}	Custo fixo para processar o produto <i>i</i> na máquina <i>k</i>
CFS _{ji}	Custo fixo para processar o produto <i>i</i> na máquina <i>l</i>
Lote_maxL _{ji}	Capacidade máxima de processar o produto <i>i</i> na máquina <i>j</i>
Lote_maxC _{ki}	Capacidade máxima de processar o produto <i>i</i> na máquina <i>k</i>
Lote_maxS _{li}	Capacidade máxima de processar o produto <i>i</i> na máquina <i>l</i>
Lote_minL _{ji}	Limite mínimo para processar o produto <i>i</i> na máquina <i>j</i>
Lote_minC _{ki}	Limite mínimo para processar o produto <i>i</i> na máquina <i>k</i>
Lote_minS _{li}	Limite mínimo para processar o produto <i>i</i> na máquina <i>l</i>

Fonte: Autor (2017)

3.11. Variáveis da Modelagem

As variáveis do modelo são apresentadas no Quadro 3 a seguir.

Quadro 3- Variáveis utilizadas pelo modelo

Simbologia	Descrição
Disp1 _{Rty}	Quantidade de peças disponíveis para serem processadas no período <i>t</i> e dia <i>y</i> nas Lavadoras

Simbologia	Descrição (continuação)
$Disp2_{Rty}$	Quantidade de peças disponíveis para serem processadas no período t e dia y nas Centrífugas
$Disp3_{Rty}$	Quantidade de peças disponíveis para serem processadas no período t e dia y nas Secadoras
$RD1_{Rty}$	Variável de decisão de quantidade de peça processada nas Lavadoras no período t do dia y
$RD2_{Rty}$	Variável de decisão de quantidade de peça processada nas Centrífugas no período t do dia y
$RD3_{Rty}$	Variável de decisão de quantidade de peça processada nas Secadoras no período t do dia y
$Custos_{ty}$	Define os custos de processo para determinado período t do dia y
$Custos_procl_j$	Define o custo total do processo j em todo período analisado
$Custos_procC_k$	Define o custo total do processo k em todo período analisado
$Custos_procS_l$	Define o custo total do processo l em todo período analisado
$X1_{ijty}$	Variável de decisão de quantidade de produto tipo i processado no processo j no período t do dia y
$X2_{ikty}$	Variável de decisão de quantidade de produto tipo i processado no processo k no período t do dia y
$X3_{ilty}$	Variável de decisão de quantidade de produto tipo i processado no processo l no período t do dia y
$QTDEL_{ity}$	Quantidade de produto tipo i processado nas Lavadoras no período t do dia y
$QTDEC_{ity}$	Quantidade de produto tipo i processado nas Centrífugas no período t do dia y
$QTDES_{ity}$	Quantidade de produto tipo i processado nas Secadoras no período t do dia y
$QTDE_procl_i$	Quantidade total de produto tipo i processado nas Lavadoras
$QTDE_procC_i$	Quantidade total de produto tipo i processado nas Centrífugas
$QTDE_procS_i$	Quantidade total de produto tipo i processado nas Secadoras
$QTDETOTAL$	Quantidade total de peças processadas

Simbologia	Descrição (conclusão)
$QTDEdeI_i$	Quantidade total de produto tipo i processado em todos os processos e período analisado
$QTDE_total_{ty}$	Quantidade total de peças processadas em determinado período t do dia y
$P1_{ijty}$	Variável de seleção de processo- Decisão de processar o produto i no processo j no período t do dia y ($P1_{ijty} = 1$), ou não processar ($P2_{ijty} = 0$).
$P2_{ikty}$	Variável de seleção de processo- Decisão de processar o produto i no processo k no período t do dia y ($P1_{ijty} = 1$), ou não processar ($P2_{ijty} = 0$).
$P3_{ilty}$	Variável de seleção de processo- Decisão de processar o produto i no processo l no período t do dia y ($P1_{ijty} = 1$), ou não processar ($P2_{ijty} = 0$).
$Prev02_R$	Previsão de produção de peças para todo período nas Centrífugas
$Prev03_R$	Previsão de produção de peças para todo período nas Secadoras
$CustoE$	Define os custos com energia das peças processadas em todo período
$CustoA$	Define os custos com água das peças processadas em todo período
$CustoM$	Define os custos com mão de obra das peças processadas em todo período
$CustoF$	Define os custos fixos das peças processadas em todo período

Fonte: Autor (2017)

3.12. Função Objetivo do Modelo Matemático

Tendo estabelecido os índices, parâmetros e as variáveis do modelo apresentamos agora sua formulação matemática. Na modelagem, para simplificação, as numerações 1, 2 e 3 correspondem, respectivamente, aos processos de lavagem, centrifugação e secagem.

Função objetivo:

$$\begin{aligned}
 \text{Minimizar } z = & \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y CEL * X1_{ijty} \\
 & + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y CML_{ji} * X1_{ijty} \\
 & + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y CAL_{ji} * X1_{ijty} \\
 & + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y CFL_{ji} * P1_{ijty} \\
 & + \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y CEC_{ki} * X2_{ikty} \\
 & + \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y CMC_{ki} * X2_{ikty} \\
 & + \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y CAC_{ki} * X2_{ikty} \\
 & + \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y CFC_{ki} * P2_{ikty} \\
 & + \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y CES_{li} * X3_{ilty} \\
 & + \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y CMS_{li} * X3_{ilty} \\
 & + \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y CAS_{li} * X3_{ilty} \\
 & + \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y CFS_{li} * P3_{ilty}
 \end{aligned} \tag{1}$$

A função objetivo (1) representa os custos de produção com energia elétrica, água, mão-de-obra e custos fixos dos equipamentos dos três processos e consiste em minimizar a soma desses custos.

3.13. Restrições da Modelagem

A seguir são apresentadas as equações de restrição do modelo.

Restrições:

A restrição (2) define a quantidade de peças disponíveis para serem processadas nas lavadoras durante o período analisado.

$$Disp1_{Rty} = Disp1_{R,t-1,y} - RD1_{R,t-1,y} \geq RD1_{Rty} \quad t = 1, \dots, T; y = dia1, \dots, Y \quad (2)$$

A restrição (3) representa a compatibilidade entre a quantidade de roupa processada por período t do dia y e todas as peças i processadas no processo j neste mesmo período e dia.

$$\sum_R RD1_{Rty} = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N X1_{ijty} \quad t = 1, \dots, T; y = dia1, \dots, Y \quad (3)$$

A restrição (4) é uma restrição de balanço que impõem que a quantidade de roupa processada nas lavadoras no período t do dia y seja menor ou igual a quantidade disponível para este período.

$$RD1_{Rty} \leq Disp1_{Rty} \quad t = 1, \dots, T; y = dia1, \dots, Y \quad (4)$$

A restrição (5) é uma restrição de consumo total que garante que todas as peças disponíveis para serem lavadas no início da produção sejam completamente processadas.

$$\sum_R Disp1_{R11} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y X1_{ijty} \quad (5)$$

A restrição (6) calcula a previsão de produção para o processo de centrifugação conforme a quantidade de peças lavadas.

$$Prev02_R = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y X1_{ijty} \quad (6)$$

A restrição (7) define a quantidade de peças disponíveis para serem processadas nas centrífugas durante o período analisado.

$$Disp2_{Rty} = Disp2_{R,t-1,y} - RD2_{R,t-1,y} \geq RD2_{Rty} \quad t = 1, \dots, T; y = dia1, \dots, Y \quad (7)$$

A restrição (8) representa a compatibilidade entre a quantidade de roupa processada por período t do dia y e todas as peças i processadas nos processos k neste mesmo período e dia.

$$\sum_R RD2_{Rty} = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N X2_{ikty} \quad t = 1, \dots, T; y = dia1, \dots, Y \quad (8)$$

A restrição (9) é uma restrição de balanço que impõem que a quantidade de roupa processada nas centrífugas no período t do dia y seja menor ou igual a quantidade disponível para este período.

$$RD2_{Rty} \leq Disp2_{Rty} \quad t = 1, \dots, T; y = dia1, \dots, Y \quad (9)$$

A restrição de consumo total (10) garante que todas as peças disponíveis para serem centrifugadas no início da produção sejam completamente processadas.

$$\sum_R Disp2_{R11} = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y X2_{ikty} \quad (10)$$

A restrição (11) calcula a previsão de produção para os processos de secagem conforme a quantidade de peças lavadas.

$$Prev03_R = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y X1_{ijty} \quad (11)$$

A restrição (12) define a quantidade de peças disponíveis para serem processadas nas secadoras durante o período analisado.

$$Disp3_{Rty} = Disp3_{R,t-1,y} - RD3_{R,t-1,y} \geq RD3_{Rty} \quad t = 1, \dots, T; y = dia1, \dots, Y \quad (12)$$

A restrição (13) diz respeito a compatibilidade entre a quantidade de roupa processada por período t do dia y e todas as peças i processadas nos processos l neste mesmo período e dia.

$$\sum_R RD3_{Rty} = \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^N X3_{ilty} \quad t = 1, \dots, T; y = dia1, \dots, Y \quad (13)$$

A restrição (14) é uma restrição de balanço que impõem que a quantidade de roupa processada nas secadoras no período t do dia y seja menor ou igual a quantidade disponível para este período.

$$RD3_{Rty} \leq Disp3_{Rty} \quad t = 1, \dots, T; y = dia1, \dots, Y \quad (14)$$

A restrição de consumo total (15) garante que todas as peças disponíveis para serem processadas nas secadoras no início da produção sejam completamente processadas.

$$\sum_R Disp3_{R11} = \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y X3_{ilty} \quad (15)$$

As restrições (16), (17) e (18) restringem a produção conforme a capacidade diária de produção da cada peça i, garantindo que a produção não seja calculada somente para um dia, mas distribuída em todos os dias analisados.

$$\sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T X1_{ijty} \leq Max_dia_i \quad i = 1, \dots, N; y = dia1, \dots, Y \quad (16)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T X2_{ikty} \leq Max_dia_i \quad i = 1, \dots, N; y = dia1, \dots, Y \quad (17)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T X3_{ilty} \leq Max_dia_i \quad i = 1, \dots, N; y = dia1, \dots, Y \quad (18)$$

As restrições (19), (20) e (21) tratam do limite mínimo de produção diária para cada peça i, garantindo que uma certa demanda de cada tipo de peça seja processada.

$$\sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T X1_{ijty} \geq Min_dia_i \quad i = 1, \dots, N; y = dia1, \dots, Y \quad (19)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T X2_{ikty} \geq Min_dia_i \quad i = 1, \dots, N; y = dia1, \dots, Y \quad (20)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T X3_{ilty} \geq Min_dia_i \quad i = 1, \dots, N; y = dia1, \dots, Y \quad (21)$$

As restrições (22), (23) e (24) impõem que apenas um tipo de peça i seja processada em cada um dos processos j , k ou l , em cada período t , em cada dia y . Dessa forma, a restrição garante que não será considerada uma produção mista com mais de um tipo de peça por processo em cada período. As variáveis $P1_{ijty}$, $P2_{ikty}$ e $P3_{ilty}$ são variáveis binárias de seleção de processos para utilizar ($P1_{ijty} = 1$, $P2_{ikty} = 1$ e $P3_{ilty} = 1$) ou não utilizar ($P1_{ijty} = 0$, $P2_{ikty} = 0$ e $P3_{ilty} = 0$) o produto i no processo j , k , ou l , no período t , para cada dia y .

$$\sum_{i=1}^N P1_{ijty} = 1 \quad j = 1, \dots, J; t = 1, \dots, T; y = dia1, \dots, Y \quad (22)$$

$$\sum_{i=1}^N P2_{ikty} = 1 \quad k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T; y = dia1, \dots, Y \quad (23)$$

$$\sum_{i=1}^N P3_{ilty} = 1 \quad l = 1, \dots, L; t = 1, \dots, T; y = dia1, \dots, Y \quad (24)$$

As restrições (25) à (30) impõem que em todos os períodos t que a quantidade de peça por processo seja nula sempre que o processo equivalente não esteja sendo utilizado ($P1_{ijty}$, $P2_{ikty}$ ou $P3_{ilty} = 0$) ou, caso contrário, seja menor que o lote máximo e maior que o lote mínimo do processo produzir a peça i .

$$X1_{ijty} \leq Lote_maxL_{ji} * P1_{ijty} \quad i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, J; t = 1, \dots, T; y = dia1, \dots, Y \quad (25)$$

$$X1_{ijty} \geq Lote_minL_{ji} * P1_{ijty} \quad i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, J; t = 1, \dots, T; y = dia1, \dots, Y \quad (26)$$

$$X2_{ikty} \leq Lote_maxC_{ki} * P2_{ikty} \quad i = 1, \dots, N; k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T; y = dia1, \dots, Y \quad (27)$$

$$X2_{ikty} \geq Lote_minC_{ki} * P2_{ikty} \quad i = 1, \dots, N; k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T; y = dia1, \dots, Y \quad (28)$$

$$X3_{ilty} \leq Lote_maxS_{li} * P3_{ilty} \quad i = 1, \dots, N; l = 1, \dots, L; t = 1, \dots, T; y = dia1, \dots, Y \quad (29)$$

$$X3_{ilty} \geq Lote_minS_{li} * P3_{ilty} \quad \begin{matrix} i = 1, \dots, N; l = 1, \dots, L; t = 1, \dots, T; y \\ = dia1, \dots, Y \end{matrix} \quad (30)$$

As restrições (31), (32) e (33) definem as quantidades de peças i processadas em cada período t do dia y em cada um dos processos.

$$QTDEL_{ity} = \sum_{j=1}^J X1_{ijty} \quad i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T; y = dia1, \dots, Y \quad (31)$$

$$QTDEC_{ity} = \sum_{k=1}^K X2_{ikty} \quad i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T; y = dia1, \dots, Y \quad (32)$$

$$QTDES_{ity} = \sum_{l=1}^L X3_{ilty} \quad i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T; y = dia1, \dots, Y \quad (33)$$

As restrições (34), (35) e (36) calculam a quantidade total de cada peça i produzida em todo período analisado em cada um dos processos.

$$QTDE_procL_i = \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y QTDEL_{ity} \quad i = 1, \dots, N \quad (34)$$

$$QTDE_procC_i = \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y QTDEC_{ity} \quad i = 1, \dots, N \quad (35)$$

$$QTDE_procS_i = \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y QTDES_{ity} \quad i = 1, \dots, N \quad (36)$$

A restrição (37) define a quantidade total de peças processadas em todos os três processos.

$$QTDE_{TOTAL} = \sum_{i=1}^N QTDE_procL_i + \sum_{i=1}^N QTDE_procC_i + \sum_{i=1}^N QTDE_procS_i \quad (37)$$

A equação (38) define a quantidade total de peça i processada em todos os períodos e processos.

$$\begin{aligned}
 QTDEdel_i = & \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y QTDEL_{ity} \\
 & + \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y QTDEC_{ity} \\
 & + \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y QTDES_{ity}
 \end{aligned} \quad i = 1, \dots, N \quad (38)$$

A equação (39) define a quantidade total de peças processadas em cada período t do dia y .

$$\begin{aligned}
 QTDE_total_{ty} &= \sum_{i=1}^N QTDEL_{ity} \\
 &+ \sum_{i=1}^N QTDEC_{ity} + \sum_{i=1}^N QTDES_{ity}
 \end{aligned} \quad t = 1, \dots, T; y = dia1, \dots, Y \quad (39)$$

A equação (40) define os custos totais de processo em cada período t do dia y .

$$\begin{aligned}
 Custos_{ty} = & \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J (CEL_{ji} * X1_{ijty} + CML_{ji} * X1_{ijty} \\
 & + CAL_{ji} * X1_{ijty} + CFL * P1_{ijty}) \\
 & + \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K (CEC_{ki} * X2_{ikty} + CMC_{ki} \\
 & * X2_{ikty} + CAC_{ki} * X2_{ikty} + CFC_{ki} \\
 & * P2_{ikty}) \\
 & + \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^L (CES_{li} * X3_{ilty} + CMS_{li} \\
 & * X3_{ilty} + CAS_{li} * X3_{ilty} + CFS_{li} \\
 & * P3_{ilty})
 \end{aligned} \quad t = 1, \dots, T; y = 1, \dots, Y \quad (40)$$

A equação (41) define os custos do processo de lavagem.

$$\begin{aligned}
& Custos_procl_j \\
&= \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y CEL_{ji} * X1_{ijty} \\
&+ \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y CML_{ji} * X1_{ijty} \\
&+ \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y CAL_{ji} * X1_{ijty} \\
&+ \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y CFL_{ji} * P1_{ijty}
\end{aligned} \quad j = 1, \dots, J \quad (41)$$

A equação (42) define os custos do processo de centrifugação.

$$\begin{aligned}
& Custos_proc_k \\
&= \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y CEC * X2_{ikty} \\
&+ \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y CMC_{ki} * X2_{ikty} \\
&+ \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y CAC_{ki} * X2_{ikty} \\
&+ \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y CFC_{ki} * P2_{ikty}
\end{aligned} \quad k = 1, \dots, K \quad (42)$$

A equação (43) define os custos do processo de secagem.

$$\begin{aligned}
& Custos_procl_l \\
&= \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y CES_{li} * X3_{ilty} \\
&+ \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y CMS_{li} * X3_{ilty} \\
&+ \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y CAS_{li} * X3_{ilty} \\
&+ \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y CFS_{li} * P3_{ilty}
\end{aligned} \quad l = 1, \dots, L \quad (43)$$

A equação (44) define os custos com energia elétrica.

$$\begin{aligned}
 CustoE = & \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y CEL_{ji} * X1_{ijty} \\
 & + \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y CEC_{ki} * X2_{ikty} \\
 & + \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y CES_{li} * X3_{ilty}
 \end{aligned} \tag{44}$$

A equação (45) define os custos com água.

$$\begin{aligned}
 CustoA = & \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y CAL_{ji} * X1_{ijty} \\
 & + \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y CAC_{ki} * X2_{ikty} \\
 & + \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y CAS_{li} * X3_{ilty}
 \end{aligned} \tag{45}$$

A equação (46) define os custos com mão-de-obra.

$$\begin{aligned}
 CustoM = & \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y CML_{ji} * X1_{ijty} \\
 & + \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y CMC_{ki} * X2_{ikty} \\
 & + \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y CMS_{li} * X3_{ilty}
 \end{aligned} \tag{46}$$

A equação (47) define os custos fixos.

$$\begin{aligned}
CustoF = & \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y CFL_{ji} * P1_{ijty} \\
& + \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y CFC_{ki} * P2_{ikty} \\
& + \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T \sum_{y=dia1}^Y CFS_{li} * P3_{ilty}
\end{aligned} \tag{47}$$

A equação (48) apresenta as variáveis de não negatividade.

Conjunto de restrições: Domínio das Variáveis

$$\begin{aligned}
Disp1_{Rty} & \geq 0; Disp2_{Rty} \geq 0; Disp3_{Rty} \geq 0; \\
RD1_{Rty} & \geq 0; RD2_{Rty} \geq 0; RD3_{Rty} \geq 0; \\
Custos_{ty} & \geq 0; Custos_{procL_j} \geq 0; Custos_{procC_k} \geq 0; \\
Custos_{procS_i} & \geq 0; \\
X1_{ijty} & \geq 0; X2_{ikty} \geq 0; X3_{ilty} \geq 0; \\
QTDEL_{ity} & \geq 0; QTDEC_{ity} \geq 0; QTDES_{ity} \geq 0; \\
QTDE_{procL_i} & \geq 0; QTDE_{procC_i} \geq 0; QTDE_{procS_i} \geq 0; \\
QTDE_{TOTAL} & \geq 0; QTDE_{del_i} \geq 0; QTDE_{total_{ty}} \geq 0; \\
P1_{ijty} & \in \{0,1\}; P2_{ikty} \in \{0,1\}, P3_{ilty} \in \{0,1\}.
\end{aligned} \tag{48}$$

3.14. Ambiente de Modelagem GAMS

No decorrer das décadas de 1950 e 1960 fez-se um importante progresso no desenvolvimento de algoritmos e códigos computacionais para solucionar grandes problemas de programação matemática. De acordo com Brooke *et al.* (1997), para o desenvolvimento de um modelo era necessário despendar uma grande parte do tempo na preparação dos dados e dos relatórios de saída. Desta forma, foram estudados os meios para reduzir esse tempo, e assim, foram desenvolvidos os geradores de matrizes para a programação linear, que faziam transformações dos modelos matemáticos para a forma algorítmica exigida pelos softwares (PAIVA, 2006; FERNANDES e MORABITO, 1993).

O que deu início para adequação desses objetivos foi o desenvolvimento das linguagens de modelagem (LMs). As LMs empregam, em diferentes graus, os conceitos de modelagem estruturada, que têm por objetivo oferecer uma estrutura matemática formal em ambiente computacional na manipulação de uma grande variedade de modelos (FERNANDES e MORABITO, 1993).

Na década de 80 e início da década de 90 algumas LMs se destacaram, por exemplo: CML (*Conversational Modeling Language*), a LPM (*System for constructing Linear Programming System*), a LAMP (*Language for Interactive General Optimization*), LINGO (*Language for Interactive General Optimization*) e o GAMS (*General Algebraic Modeling System*). Essas LMs permitem que os modeladores invistam cada vez mais tempo na solução dos problemas referentes ao modelo e não na implementação computacional. Portanto, elas vêm adquirindo maiores significâncias para os modeladores, visto que os problemas analisados estão se tornando cada vez mais complexos (SILVA, 2009).

O GAMS (Sistema Geral de Modelagem Algébrica) é o sistema de Programação Matemática mais utilizado em todo o mundo para modelagem em Pesquisa Operacional e foi desenvolvido a partir das experiências frustrantes de um grupo de modelagem econômica do Banco Mundial. Ele foi projetado para realizar a construção e resolução de modelos matemáticos amplos e complexos de forma mais direta para programadores, e mais inteligível para usuários de modelos em outras disciplinas, por exemplo, economistas. Uma vez que ele é capaz de efetuar enunciados concisos de modelos em uma linguagem que pode ser facilmente lida por especialistas ou computadores, GAMS pode aumentar de forma considerável a produtividade dos modelistas e expandir bastante a extensão e o uso das aplicações de programação matemática em análise de políticas e tomadas de decisão (BROOKE *et al.*, 1997). As principais vantagens intrínsecas a utilização do GAMS são:

- a) Fornecer uma linguagem de alto nível para uma representação compacta de modelos extensos e complexos;
- b) Permitir mudanças na especificação dos modelos de forma simples e segura;
- c) Permitir relações algébricas enunciadas de forma ambígua;

- d) Permitir descrições de modelos independentes dos algoritmos de solução;
- e) Simplificar a preparação de dados de entrada e relatórios de saída e;
- f) Transformar automaticamente os dados para a forma requerida pelos pacotes de programação matemática.

A estrutura típica da linguagem de modelagem GAMS possui a forma apresentada na Figura 2.

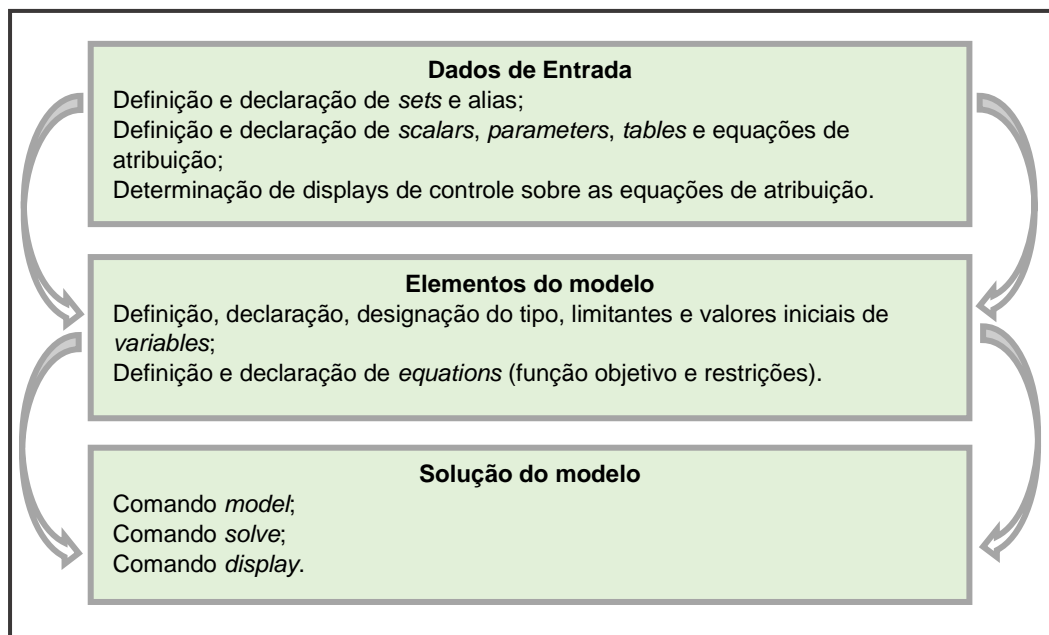


Figura 2- Estrutura geral do modelo GAMS
Fonte: Adaptado de Brooke *et al.* (1997)

CAPÍTULO IV

RESULTADOS COMPUTACIONAIS

4.1. Considerações Iniciais

O desenvolvimento deste trabalho foi inspirado em um trabalho realizado em uma lavandeira industrial localizada na cidade de Maringá-PR. Em sua dissertação de mestrado, pela Universidade Estadual de Maringá, Oliveira (2013) desenvolveu um modelo de otimização multiobjetivo para o planejamento da produção no setor de secagem de uma lavanderia industrial de peças confeccionadas.

Para a elaboração deste trabalho foram utilizados alguns dados obtidos por Oliveira (2013), como também, informações que tratam da descrição do processo produtivo em lavanderia têxtil e suas limitações de processo.

De modo a possibilitar o entendimento do modelo matemático desenvolvido e obter os resultados computacionais, um problema em ambiente industrial de lavanderia têxtil foi gerado, para o qual foram utilizados parâmetros fictícios. Em seguida, apresenta-se uma análise da consistência deste modelo por meio da implementação com dados de dois estudos de caso.

4.2. Exemplo ilustrativo

O problema gerado considera o processamento de quatro tipos de peças de roupas (R) diferentes, calças, saias, jaquetas e calças sociais. Embora existam tamanhos diferentes de cada tipo de peça, neste trabalho vamos considerar uma média de massa por tipo de peça.

Essas peças passam pelos setores de lavagem, centrifugação e secagem, em sequência. Em cada um destes setores existem máquinas paralelas que operam com capacidades de produção diferentes, onde os itens podem ser processados em quaisquer das máquinas em cada estágio, respeitando suas capacidades.

Para o horizonte de planejamento (Y) foi considerado a produção para um dia, onde o período t representa as horas produtivas do dia. No Quadro 4 são mostrados os índices do modelo.

Quadro 4- Índices gerais aplicados ao modelo

Índice	Descrição/ Valor
Peças de roupa (R)	Roupa
Tipos de produto (N)	4 (= Calça, Jaqueta, Saia, Calça Social)
Número de máquinas- Lavadoras (J)	12 (= Lavadora1,..., Lavadora12)
Número de máquinas- Centrífugas (K)	7 (= Centrífuga1,..., Centrífuga7)
Número de máquinas- Secadoras (L)	13 (= Secadora1,..., Secadora13)
Número de períodos (T)	19 (= h1,...,h19)
Número de dias (Y)	1 (= dia1)

Fonte: Autor (2017)

Para a definição do número de horas produtivas por dia considerou-se três turnos produtivos por dia de 8h, com uma hora de parada em cada turno, conforme exigências trabalhistas para jornadas superiores a 6h. Desta forma, cada dia de produção contém 21 horas. Entretanto, conforme a Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos (ABRAMAN, 2013), a disponibilidade operacional em empresas brasileiras é em média de 89,29 %, devido à indisponibilidade por manutenção e outros (Tabela 1).

Tabela 1- Disponibilidade Operacional

Indicadores de Disponibilidade (%)							
Tipo	2001	2003	2005	2007	2009	2011	2013
Disponibilidade Operacional	91,36	89,48	88,20	90,82	90,27	91,30	89,29
Indisponibilidade devido à Manutenção	5,15	5,82	5,80	5,30	5,43	5,44	6,15

Fonte: Adaptado de Abramam (2013)

Desta forma o cálculo das horas produtivas por dia foi refeito considerando este valor. O resultado é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2- Horas produtivas considerando a disponibilidade operacional

Horas Produtivas/Dia		
Horas Produtivas	Disponibilidade Operacional	Total/ horas produtivas
21h	89,29 %	18,8h

Fonte: Autor (2017)

Sendo assim, para facilidade de implementação do modelo no GAMS, foi considerado um período t de 19h. O cálculo dos dias produtivos no mês e no ano, como também as horas produtivas nestes períodos são apresentados na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3- Jornada de trabalho no ano

Jornada de Trabalho		
Jornada diária de Trabalho	19	horas
Dias trabalhados na semana considerando os dias úteis na semana	5	dias
A- Cálculo dos dias produtivos no ano		
Média de dias do ano	365,25	dias
(-) Média dos domingos do ano	52,14	dias
(-) Média dos Sábados do ano	52,29	dias
(-) Média dos Feriados do ano	10,57	dias
Total A=	250,25	dias
B- Cálculo dos dias produtivos no mês		
Total A/Nº de meses do Ano=	20,85	dias
C- Cálculo das horas produtivas no mês		
B x Hora Jornada Diária=	396,23	horas/mês
D- Cálculo das horas produtivas no ano		
C x12 meses=	4754,75	horas/ano

Fonte: Autor (2017)

Para o cálculo da quantidade de peças que cada equipamento tem capacidade de processar foi necessário utilizar a massa média de cada tipo de roupa, visto que as

capacidades dos equipamentos são fornecidas em quilos e é necessário encontrar suas respectivas capacidades em unidade de peças. Esses valores são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4- Massa média de cada tipo de Peça

Peso médio por tipo de roupa (Kg)			
Calça	Jaqueta	Saia	Calça Social
0,650	0,650	0,350	0,450

Fonte: Oliveira (2013)

O problema aborda o planejamento e programação da produção das peças nos setores de lavanderia, centrifugação e secagem. Na etapa de lavagem é onde são atribuídos os efeitos desejados nos artigos confeccionados conforme o tipo de lavagem e demanda do cliente, por meio de processos como desengomagem, estonagem, desbotamento, alvejamento oxidativo, *used*, lixado, tingimento e outros. Após a lavagem é realizada a centrifugação para a retirada do excesso de água nas peças, em seguida elas passam pela secagem para a remoção total de água.

Em cada etapa existem equipamentos paralelos com diferentes capacidades de processamento, que diferem também conforme a peça. Para o cálculo dos lotes máximo e mínimo permitidos em cada máquina foram considerados percentuais de utilização dos equipamentos. Conforme Oliveira (2013) a utilização de fatores de segurança garante que a carga da máquina utilizada permita a correta realização dos processos nas peças confeccionadas.

Desta forma, foi considerado para os lotes máximo 75 % da capacidade dos equipamentos no setor de lavagem e secagem e 70 % para os equipamentos de centrifugação. Para a definição dos lotes mínimos foi considerado 50 % da capacidade para uma utilização mínima dos equipamentos disponíveis em todos os setores.

O tempo de processamento de cada lote nas lavadoras e secadoras, foi considerado de 45 minutos com um tempo de 15 minutos de *setup*, resultando em um ciclo de uma hora. Já as centrífugas processam cada lote em um tempo médio de 15 minutos, resultando em um ciclo de trinta minutos, considerando também o tempo de troca de lotes.

A seguir, nas Tabelas 5 a 10, são apresentados os parâmetros correspondentes ao lote máximo e lote mínimo de cada peça em cada máquina.

Tabela 5- Lote máximo de Peças- Lavadoras

Máquinas	Capacidade		Tipo de Peças (Unid.)			
	Capacidade Total (Kg)	75 % da Capacidade (Kg)	Calça 0,650 (Kg)	Jaqueta 0,650 (Kg)	Saia 0,350 (Kg)	Calça Social 0,450 (Kg)
Lavadora 1	30	23	35	35	64	50
Lavadora 2	30	23	35	35	64	50
Lavadora 3	50	38	58	58	107	83
Lavadora 4	50	38	58	58	107	83
Lavadora 5	100	75	115	115	214	167
Lavadora 6	100	75	115	115	214	167
Lavadora 7	100	75	115	115	214	167
Lavadora 8	100	75	115	115	214	167
Lavadora 9	100	75	115	115	214	167
Lavadora 10	200	150	231	231	429	333
Total	860	645				

Fonte: Autor (2017)

Tabela 6- Lote Mínimo de Peças- Lavadoras

Máquinas	Capacidade		Tipo de Peças (Unid.)			
	Capacidade Total (Kg)	50 % da Capacidade (Kg)	Calça 0,650 (Kg)	Jaqueta 0,650 (Kg)	Saia 0,350 (Kg)	Calça Social 0,450 (Kg)
Lavadora 1	30	15	23	23	43	33
Lavadora 2	30	15	23	23	43	33
Lavadora 3	50	25	38	38	71	56
Lavadora 4	50	25	38	38	71	56
Lavadora 5	100	50	77	77	143	111
Lavadora 6	100	50	77	77	143	111
Lavadora 7	100	50	77	77	143	111
Lavadora 8	100	50	77	77	143	111
Lavadora 9	100	50	77	77	143	111
Lavadora 10	200	100	154	154	286	222
Total	860	430				

Fonte: Autor (2017)

Tabela 7- Lote máximo de Peças- Centrífugas

Máquinas	Capacidade		Tipo de Peças (Unid.)			
	Capacidade Total (Kg)	70 % da Capacidade (Kg)	Calças 0,650 (Kg)	Jaquetas 0,650 (Kg)	Saias 0,350 (Kg)	Calça Social 0,450 (Kg)
Centrífuga 1	30	21	32	32	60	47
Centrífuga 2	50	35	54	54	100	78
Centrífuga 3	50	35	54	54	100	78
Centrífuga 4	50	35	54	54	100	78
Centrífuga 5	100	70	108	108	200	156
Centrífuga 6	100	70	108	108	200	156
Centrífuga 7	100	70	108	108	200	156
Total	480	336				

Fonte: Autor (2017)

Tabela 8- Lote Mínimo de Peças- Centrífugas

Máquinas	Capacidade		Tipo de Peças (Unid.)			
	Capacidade Total (Kg)	50 % da Capacidade (Kg)	Calças 0,650 (Kg)	Jaquetas 0,650 (Kg)	Saias 0,350 (Kg)	Calça Social 0,450 (Kg)
Centrifuga 1	30	15	23	23	43	33
Centrifuga 2	50	25	38	38	71	56
Centrifuga 3	50	25	38	38	71	56
Centrifuga 4	50	25	38	38	71	56
Centrifuga 5	100	50	77	77	143	111
Centrifuga 6	100	50	77	77	143	111
Centrifuga 7	100	50	77	77	143	111
Total	480	240				

Fonte: Autor (2017)

Tabela 9- Lote Máximo de Peças - Secadoras

Máquinas	Capacidade		Tipo de Peças (Unid.)			
	Capacidade Total (Kg)	75 % da Capacidade (Kg)	Calça 0,650 (Kg)	Jaqueta 0,650 (Kg)	Saia 0,350 (Kg)	Calça Social 0,450 (Kg)
Secadora 1	30	23	35	35	64	50
Secadora 2	30	23	35	35	64	50
Secadora 3	50	38	58	58	107	83
Secadora 4	50	38	58	58	107	83
Secadora 5	50	38	58	58	109	84
Secadora 6	50	38	58	58	107	83
Secadora 7	100	75	115	115	214	167
Secadora 8	100	75	115	115	214	167
Secadora 9	100	75	115	115	214	167
Secadora 10	100	75	115	115	214	167
Secadora 11	100	75	115	115	214	167
Secadora 12	100	75	115	115	214	167
Secadora 13	100	75	115	115	214	167
Total	960	721				

Fonte: Autor (2017)

Tabela 10- Lote Mínimo de Peças- Secadoras

Máquinas	Capacidade		Tipo de Peça (Unid.)			
	Capacidade Total (Kg)	50 % da Capacidade (Kg)	Calça 0,650 (Kg)	Jaqueta 0,650 (Kg)	Saia 0,350 (Kg)	Calça Social 0,450 (Kg)
Secadora 1	30	15	23	23	43	33
Secadora 2	30	15	23	23	43	33
Secadora 3	50	25	38	38	71	56
Secadora 4	50	25	38	38	71	56
Secadora 5	50	25	38	38	71	56
Secadora 6	50	25	38	38	71	56
Secadora 7	100	50	77	77	143	111
Secadora 8	100	50	77	77	143	111
Secadora 9	100	50	77	77	143	111
Secadora 10	100	50	77	77	143	111
Secadora 11	100	50	77	77	143	111
Secadora 12	100	50	77	77	143	111
Secadora 13	100	50	77	77	143	111
Total	960	480				

Fonte: Autor (2017)

A capacidade máxima de produção por dia (Max_dia_i) para cada peça i foi definida como a capacidade máxima de peças processadas por dia nas lavadoras, que é onde se inicia o processo da lavanderia, multiplicada pelo número de horas produtivas disponíveis.

Para o cálculo desta capacidade de produção e limite diário também foi considerada uma demanda diária de cada tipo de peça, a qual demonstra quais peças são mais processadas pela lavanderia. A Tabela 11 apresenta esta demanda diária.

Tabela 11- Demanda média de Produção diária de cada Tipo de Peça

Demanda média de Produção por Tipo de Peça			
Calça	Jaqueta	Saia	Calça Social
80 %	2 %	6 %	1 %

Fonte: Oliveira (2013)

Para a definição do limite mínimo de produção de cada tipo de peça por dia (Min_dia_i) foi considerado, além da demanda de cada peça, a utilização mínima de 50 % da capacidade de produção da lavagem. Nas Tabelas 12 a 14 são apresentados os parâmetros de capacidade máxima e limite mínimo de produção.

Tabela 12- Parâmetros para a Capacidade Máxima e Limite mínimo por Dia- Lavadora

Parâmetro	Capacidade (Kg)	19 Horas (Kg)	Número de Peças (Unid.)				
			Calça	Jaqueta	Saia	Calça Social	Total
Max_dia_i	645	12255	15083	377	2101	272	17833
Min_dia_i	430	8170	10055	251	1401	182	11889

Fonte: Autor, 2017

O tempo de operação das centrífugas são em média de 30 minutos, incluindo o tempo de *setup*, sendo assim, elas podem realizar dois ciclos enquanto os outros processos realizam apenas um. Desta forma, suas capacidades foram multiplicadas por 2, o que transforma sua capacidade compatível com os demais processos.

Tabela 13- Capacidade Máxima e Limite mínimo por Dia- Centrífuga

Parâmetro	Capacidade (Kg)	19 Horas (Kg)	Número de Peças (Unid.)				
			Calça	Jaqueta	Saia	Calça Social	Total
Max_dia_i	672	12768	15714	393	2189	284	18580
Min_dia_i	480	9120	11225	281	1563	203	13271

Fonte: Autor (2017)

Tabela 14- Capacidade Máxima e Limite mínimo por Dia- Secadora

Capacidade (Kg)	19 Horas (Kg)	Número de Peças (Unid.)				
		Calça	Jaqueta	Saia	Calça Social	Total
721	13699	16860	422	2348	304	19935
480	9120	11225	281	1563	203	13271

Fonte: Autor (2017)

A previsão de produção para os dias analisados ($Prev01_{R^*}$) foi definida como a capacidade máxima de produção de peças i para estes dias no setor de lavagem. As previsões para os outros processos ($Prev02_R$, $Prev03_R$) são variáveis definidas conforme a quantidade de peças processadas na etapa inicial, ou seja, a previsão de processamento para a lavagem influencia nas demais quantidades. Desta forma, a previsão de produção para um dia é estimada em 17833 peças e para uma semana de produção com duração de 5 dias úteis é de 89165 peças.

Para a matriz de parâmetros dos custos com mão de obra direta, aquela que está diretamente ligada à produção, foram considerados os custos com o salário dos funcionários e seus encargos, calculando-se assim o custo homem/hora (H/h). A Tabela 15 apresenta esses custos.

Tabela 15- Custos com Mão de Obra direta

Função	Salário	Encargos	Total Ano	Horas Trabalhadas/ Ano	Custo H/h
Auxiliar de Produção	R\$ 1.200,00	68,17 %	R\$ 24.216,48	1785,80	R\$ 13,56
				Custo H/h	R\$ 13,56

Fonte: Autor (2017)

Com o valor do custo homem/hora e o tempo de processamento de cada processo, foi determinado o custo com mão de obra em cada equipamento para processar determinado tipo de peça i .

Para a matriz de parâmetros dos custos com energia elétrica foi considerada a potência de cada equipamento e o custo do kWh. Segundo a Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro (FIRJAN, 2016), o custo médio com energia elétrica industrial no Brasil é de R\$ 0,56 kWh. Na Tabela 16 são apresentadas as potências (kW) de cada equipamento.

Tabela 16- Potência (kW) dos equipamentos

Máquina	Capacidade (Kg)	Potência (kW)
Lavadoras	30	0,75
	50	1,5
	100	3,75
	200	5,52
Centrífugas	30	2,25
	50	3,75
	100	7,5
Secadoras	30	0,37
	50	1,1
	100	2,21

Fonte: Autor, 2017

Para a matriz de parâmetros dos custos fixos foi considerado o custo com aquisição dos equipamentos, o valor de depreciação por ano, o custo com manutenção por ano e o custo com instalação dos equipamentos. Estes valores foram baseados em pesquisas realizadas em sites de vendas desses equipamentos e são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17- Custos Fixos dos Equipamentos

Máquina	Capacidade (Kg)	Valor aquisição (\$)	Idade média das Máquinas (anos)	Valor depreciação (\$/Ano)	Custo de Manutenção 4% (\$/Ano)	Custo com Instalação 20% (R\$)	Custo Equipamento (\$)
Lavadora	30	25.728,00	17	1.513,41	1.029,12	5.145,60	33.416,13
Lavadora	50	26.000,00	17	1.529,41	1.040,00	5.200,00	33.769,41
Lavadora	100	26.000,00	17	1.529,41	1.040,00	5.200,00	33.769,41
Lavadora	200	57.200,00	17	3.364,71	2.288,00	11.440,00	74.292,71
Centrífuga	30	23.000,00	17	1.352,94	920,00	4.600,00	29.872,94
Centrífuga	50	26.000,00	17	1.529,41	1.040,00	5.200,00	33.769,41
Centrífuga	100	45.000,00	17	2.647,06	1.800,00	9.000,00	58.447,06
Secadora	30	22.000,00	17	1.294,12	880,00	4.400,00	28.574,12
Secadora	50	29.000,00	17	1.705,88	1.160,00	5.800,00	37.665,88
Secadora	100	51.000,00	17	3.000,00	2.040,00	10.200,00	66.240,00

Fonte: Autor, 2017

A idade média dos equipamentos foi definida conforme dados da Abramam (2013) sobre a idade média dos equipamentos nas empresas brasileiras. O custo com instalações abrange as estruturas, equipamentos e serviços necessários ao processo, mas que não estão envolvidos diretamente no processo. O gasto com instalações pode ser definido a partir de uma porcentagem do custo total da fábrica instalada e foi retirado de Perry e Chilton (1980).

A matriz de parâmetros dos custos com água utiliza como base para os cálculos a proporção de nível médio de água de 1:3 para os processos de lavagem, ou seja, para cada 1 kg de roupa utiliza-se 3 kg de água. Na Tabela 18 a seguir é apresentado o consumo de água dos equipamentos de lavagem conforme suas capacidades.

Tabela 18- Consumo de água nos equipamentos de lavagem

Equipamento	Capacidade Total (Kg)	Capacidade 75% (Kg)	Consumo de água (m³)
Lavadora 1	30	22,5	0,068
Lavadora 2	30	22,5	0,068
Lavadora 3	50	37,5	0,113
Lavadora 4	50	37,5	0,113
Lavadora 5	100	75	0,225
Lavadora 6	100	75	0,225
Lavadora 7	100	75	0,225
Lavadora 8	100	75	0,225
Lavadora 9	100	75	0,225
Lavadora 10	200	150	0,450

Fonte: Autor (2017)

O modelo foi implementado utilizando o software GAMS 24.7.4 com o solver CPLEX, em um computador com sistema operacional Windows 10, processador Intel® Core i5-4200U 1.6GHz e com 6GB de memória RAM.

Na Tabela 19 são apresentados os resultados de produção calculados para as quatro primeiras horas do dia.

Tabela 19- Distribuição dos lotes de produção ($X1_{ijty}$) para as quatro primeiras horas.

Peça	Equipamento	Período			
		h1	h2	h3	h4
calça	Lavadora 2	-	-	23	-
calça	Lavadora 3	-	-	38	38
calça	Lavadora 4	-	-	-	38
calça	Lavadora 5	92	77	115	115
calça	Lavadora 6	-	-	115	115
calça	Lavadora 7	115	114	115	115
calça	Lavadora 8	-	77	115	109
calça	Lavadora 9	115	77	115	115
calça	Lavadora 10	231	231	231	231
jaqueta	Lavadora 4	-	46	-	-
jaqueta	Lavadora 8	93	-	-	-
saia	Lavadora 1	43	43	-	43
saia	Lavadora 2	43	43	-	43
saia	Lavadora 3	71	71	-	-
saia	Lavadora 4	72	-	-	-
saia	Lavadora 6	214	143	-	-
calça social	Lavadora 1	-	-	33	-
calça social	Lavadora 4	-	-	56	-

Como restrições do problema o modelo não aceita que sejam misturadas peças de roupas diferentes em uma mesma máquina em cada hora, ou seja, um lote de peças em cada período nos equipamentos, o que pode ser observado na tabela anterior. Pode-se perceber também, que os tamanhos dos lotes respeitam as limitações de lote máximo e mínimo. A Tabela 20 apresenta os custos por período e a quantidade de peças processadas calculado pelo modelo.

Tabela 20- Resultado dos custos por período ($Custos_{ty}$) e da quantidade de peças processadas ($QTDE_{total_{ty}}$).

Período (hora)	Custos (R\$)	Peças (Unid.)	Período (hora)	Custos (R\$)	Peças (Unid.)
1	389,83	3267	11	402,90	2886
2	353,64	2766	12	350,31	2340
3	407,58	2868	13	405,64	2784
4	402,90	2886	14	402,90	2886
5	402,90	2886	15	335,10	2217
6	403,12	2829	16	402,90	2886
7	402,90	2886	17	393,31	3036
8	402,90	2886	18	402,90	2886
9	377,05	2676	19	348,82	2742
10	402,90	2886	-	-	-

Analisando a tabela, percebe-se que o maior custo de produção é consumido no período 3, entretanto, não é o período onde são processadas as maiores quantidades de peças. Isso será melhor discutido no Estudo de caso I. Na Tabela 21 são apresentados os custos por processo.

Tabela 21- Custos por processo calculado pelo modelo ($Custos_{procL_j}$, $Custos_{procC_k}$, $Custos_{procS_l}$).

Processo (j, k, l)	Custos (R\$)	Processo (j, k, l)	Custos (R\$)	Processo (j, k, l)	Custos (R\$)
Lavadora 1	190,27	Lavadora 5	320,26	Lavadora 8	307,26
Lavadora 2	190,70	Lavadora 6	332,29	Lavadora 9	325,30
Lavadora 3	200,06	Lavadora 7	328,98	Lavadora 10	423,96
Lavadora 4	202,56	-	-	-	-
Centrífuga 1	206,37	Centrífuga 4	217,86	Centrífuga 6	320,41
Centrífuga 2	218,50	Centrífuga 5	312,64	Centrífuga 7	315,19
Centrífuga 3	216,61	-	-	-	-
Secadora 1	176,78	Secadora 6	180,42	Secadora 10	214,60
Secadora 2	176,85	Secadora 7	245,11	Secadora 11	248,58
Secadora 3	187,02	Secadora 8	255,73	Secadora 12	244,82
Secadora 4	180,17	Secadora 9	237,76	Secadora 13	235,58
Secadora 5	177,84	-	-	-	-

Na Tabela 21 verifica-se que os processos que consumiram os maiores custos foram a Lavadora 10, a Centrífuga 7 e a Secadora 8. O valor encontrado para a função objetivo foi de R\$ 7390,49 e a Tabela 22 apresenta os dados do modelo obtidos com a utilização do otimizador GAMS.

Tabela 22- Complexidade do modelo no GAMS.

Parâmetros	Modelo
Número de Variáveis	4.994
Número de Variáveis binárias	2.280
Número de Equações	5.838
Número de Variáveis não negativas	50.073

4.3. Estudo de Caso- I

Para uma melhor análise da consistência do modelo e sua adequação a problemas com dados de tamanho encontrados na realidade, um estudo de caso foi realizado. A descrição do processo, como também, os dados de entrada para o modelo foram obtidos por meio de visita a uma lavanderia industrial, a qual chamaremos de Fábrica M.

4.3.1. O Processo em estudo

As peças podem chegar até à Fábrica M por meio dos seus clientes ou por transporte próprio, entretanto, é mais comum a fábrica buscar as peças. As peças entram na empresa pelo setor de expedição. Assim que as peças entram na empresa elas (os lotes) são etiquetadas com uma numeração que indica o efeito que a peça vai receber, ou seja, a numeração indica os processos por onde ela vai passar.

Portanto, depois de chegar à fábrica as peças seguem caminhos diferentes conforme os processos necessários. Algumas vão para o setor do Diferenciado, onde são realizados os processos a seco, como a resina, o permanganato, o lixado,

o 3D, e alguns outros, ou vão para o setor das “Máquinas”, que segue a sequência de Lavagem, Centrifugação e Secagem. Após esses processos e com a peça seca elas podem ir ou voltar para o setor do Diferenciado para obter mais alguns efeitos, e por fim vão para o setor da Passadoria, onde são passadas a ferro a vapor e depois conferidas e etiquetadas.

A Fábrica M possui aproximadamente 15 tipos de lavagens e 15 tipos de Diferenciado. As peças passam em média por 5 a 6 processos e seu tempo de permanência dentro da empresa é de cerca de sete dias. A demanda por cada tipo de peça depende do período do ano, por exemplo, são processados mais shorts no verão. No entanto, foi observado uma grande quantidade de calças entre os lotes.

As máquinas lavadoras, centrífugas e secadoras ficam em um setor chamado de “Máquinas” pela empresa, as quais são o interesse deste trabalho.

Lavagem

Uma peça passa de 2 a 3 vezes pelas máquinas lavadoras durante seu processamento. Existem máquinas de lavagem com capacidades de 100 Kg, 250 Kg, 350 Kg e 500 Kg, totalizando uma capacidade de 4000 Kg de peças.

Como lote máximo a empresa citou que considera em média 45 % do uso da capacidade da máquina. Como lote mínimo a empresa só aceita pedidos superiores a 30 peças, mas não contabilizam uma porcentagem mínima de utilização das máquinas. Em seus processos não são misturados tipos diferentes de peças e nem peças de clientes diferentes.

O consumo de água na lavagem pode mudar conforme o efeito desejado nas lavagens, mas é considerado um valor aproximado de 42 litros por peça. As lavagens levam de 30 minutos (o processo mais rápido) até 3 horas (o processo mais demorado), mas em sua maioria demoram um tempo de 2 horas. Quanto mais claro o efeito desejado maior é o tempo de lavagem. O tempo de *setup* já é considerado no tempo de processo informado e é de cerca de 15 min.

O pessoal responsável pelo PCP (Planejamento e Controle da Produção) programa a sequência dos lotes que a máquina irá operar, ficando fixado em uma ficha na máquina. A máquina informa em seu visor os lotes que irá processar e os produtos químicos necessários, se for o caso. Assim, o operador precisa colocar os lotes de

peças na máquina e os produtos na quantidade e no tempo necessário. Enquanto um lote de peça está sendo processado o operador já deve procurar o próximo lote e posicionar nos paletes na frente das máquinas. No entanto, ele pode demorar para encontrar as peças do próximo lote, ou ainda, existem peças que precisam ser lavadas do avesso, o que faz com que o tempo de *setup* chegue em alguns casos a 40 min. Entretanto, esses casos não são muito comuns, como foi informado.

A eficiência das máquinas de lavagem é de aproximadamente 62 %, as máquinas de menor capacidade, como de 100 Kg possuem eficiência de 56 %. A meta de eficiência da Fábrica M é chegar a 80 %. A Figura 3 ilustra como seria o processo das lavadoras.



Figura 3- Processo da Lavadora

Fonte- (<https://www.youtube.com/watch?v=yXc3ZQnYWwc&t=485s>)

Centrífuga

A parte da centrifugação é responsável por retirar o excesso de água das peças após a lavagem. No setor das Centrífugas estão presentes cinco máquinas de capacidade de 100 Kg cada, totalizando uma capacidade de processamento de 500 Kg. Nesta etapa não foi informado um lote máximo ou uma utilização mínima do equipamento, o operador coloca o máximo de peças que conseguir nos cestos das máquinas. Entretanto, esta manobra muitas vezes acaba por danificar as peças,

fazendo com que o processo não seja realizado corretamente e as peças cheguem até a rasgar.

O seu tempo de processamento é rápido, em torno de 10 min. Algumas vezes ficam acumulados lotes neste setor depois da lavagem e outras vezes, fica um tempo ocioso, já que saem peças da lavagem a cada duas horas e se forem em poucas quantidades são logo centrifugadas.

Depois das peças centrifugadas elas vão para a etapa das Secadoras. Como a etapa da centrifugação acaba sendo rápida, o gargalo se torna as secadoras. A Figura 4 ilustra o processo das centrífugas.



Figura 4- Processo da Centrifuga

Fonte- (<http://artmodepassion.blogspot.com.br/2012/10/lavinorte-maior-lavanderia-da-america.html>)

Secadoras

No processo da secagem as roupas são secas por completo. Neste setor estão presentes nove máquinas secadoras de 150 Kg cada, totalizando uma capacidade de 1350 Kg.

Não foi informado um valor de lote máximo ou lote mínimo admitido no equipamento, apenas que o operador carrega as máquinas até atingir aproximadamente metade do cesto. Entretanto, o operador não sabe exatamente o tempo necessário para a secagem da quantidade de peças que carregou nas máquinas, dado que, quando as máquinas estão muito carregadas as peças que estão próximas da parede dos cestos secam antes das peças que estão no meio. Assim, o operador precisa frequentemente abrir as máquinas para conferir a secagem, uma vez que, se elas ficarem um tempo excessivo além do necessário isso pode danificar as peças, elas podem encolher ou haver migração da cor. Isso acaba afetando o tempo do processo.

Em geral, a secagem demora aproximadamente uma hora e vinte minutos, com um tempo de *setup* de 10 min, na temperatura de 70° C. Porém, a Fábrica M acredita que esse tempo não seja necessário para a secagem, mas ainda não sabe o tempo mais adequado. A Figura 5 ilustra a etapa das secadoras.



Figura 5- Processo da Secadora

Fonte- (<https://clariceveras.wordpress.com/2008/09/30/a-necessidade-e-a-mae-da-invencao/>).

A Fábrica M lava por dia uma média de 15 mil peças. Seus processos operam por 18 horas durante o dia, já o setor da caldeira trabalha por 24 horas e as secadoras

chegam a operar por 24 horas quando necessário para processar todas as peças já lavadas, já que elas não podem ficar de um dia para o outro molhadas.

Como foi observado em visita à Fábrica M, a etapa gargalo do processo é a etapa de Secagem, que tem a necessidade de trabalhar 24 horas para processar as peças que foram lavadas. Portanto, para as próximas análises apresentadas neste trabalho foram criados três cenários de produção a partir do Cenário base que é o caso de estudo, onde foram feitas modificações nos cenários para observar quais os parâmetros mais adequados para que a indústria consiga processar todas suas peças lavadas dentro de 18 horas de produção.

Os parâmetros e dados utilizados serão apresentados para o Cenário base estudado, nas Tabelas 23 a 28, e posteriormente apresentadas as modificações feitas para os Cenários produtivos na comparação dos resultados.

Tabela 23- Lote máximo de Peças –Lavadoras: Cenário base

Máquinas	Capacidade		Tipo de Peças (Unid.)			
	Capacidade Total (Kg)	45 % da Capacidade (Kg)	Calça 0,650 (Kg)	Jaqueta 0,650 (Kg)	Saia 0,350 (Kg)	Calça Social 0,450 (Kg)
Lavadora 1	100	45	69	69	129	100
Lavadora 2	100	45	69	69	129	100
Lavadora 3	100	45	69	69	129	100
Lavadora 4	100	45	69	69	129	100
Lavadora 5	100	45	69	69	129	100
Lavadora 6	100	45	69	69	129	100
Lavadora 7	250	113	173	173	321	250
Lavadora 8	250	113	173	173	321	250
Lavadora 9	250	113	173	173	321	250
Lavadora 10	250	113	173	173	321	250
Lavadora 11	350	158	242	242	450	350
Lavadora 12	350	158	242	242	450	350
Lavadora 13	350	158	242	242	450	350
Lavadora 14	350	158	242	242	450	350
Lavadora 15	500	225	346	346	643	500
Lavadora 16	500	225	346	346	643	500
Total	4000	1800				

Tabela 24- Lote Mínimo de Peças- Lavadoras: Cenário base

Máquinas	Capacidade		Tipo de Peças (Unid.)			
	Capacidade Total (Kg)	30 % da Capacidade (Kg)	Calça 0,650 (Kg)	Jaqueta 0,650 (Kg)	Saia 0,350 (Kg)	Calça Social 0,450 (Kg)
Lavadora 1	100	30	46	46	86	67
Lavadora 2	100	30	46	46	86	67
Lavadora 3	100	30	46	46	86	67
Lavadora 4	100	30	46	46	86	67
Lavadora 5	100	30	46	46	86	67
Lavadora 6	100	30	46	46	86	67
Lavadora 7	250	75	115	115	214	167
Lavadora 8	250	75	115	115	214	167
Lavadora 9	250	75	115	115	214	167
Lavadora 10	250	75	115	115	214	167
Lavadora 11	350	105	162	162	300	233
Lavadora 12	350	105	162	162	300	233
Lavadora 13	350	105	162	162	300	233
Lavadora 14	350	105	162	162	300	233
Lavadora 15	500	150	231	231	429	333
Lavadora 16	500	150	231	231	429	333
Total	4000	1200				

Para o cálculo das capacidades das lavadoras considerou-se o tempo de processamento de duas horas, que é o tempo médio de lavagem informado pela Fábrica M. Para o cálculo das capacidades dos demais processos foi considerado, além da porcentagem de utilização dos equipamentos, a capacidade proporcional para este mesmo tempo de processamento. Isto foi feito pois na implementação no *software* foram considerados períodos inteiros de 2 horas para a distribuição dos lotes de produção.

Tabela 25- Lote máximo de Peças- Centrífugas: Cenário base

Máquinas	Capacidade		Tipo de Peças (Unid.)			
	Capacidade Total (Kg)	45 % da Capacidade	Calças 0,650 (Kg)	Jaquetas 0,650 (Kg)	Saias 0,350 (Kg)	Calça Social 0,450 (Kg)
Centrífuga 1	100	360	554	554	1029	800
Centrífuga 2	100	360	554	554	1029	800
Centrífuga 3	100	360	554	554	1029	800
Centrífuga 4	100	360	554	554	1029	800
Centrífuga 5	100	360	554	554	1029	800
Total	500	1800				

Tabela 26- Lote Mínimo de Peças- Centrífugas: Cenário base

Máquinas	Capacidade		Tipo de Peças (Unid.)			
	Capacidade Total (Kg)	30 % da Capacidade	Calças 0,650 (Kg)	Jaquetas 0,650 (Kg)	Saias 0,350 (Kg)	Calça Social 0,450 (Kg)
Centrífuga 1	100	240	369	369	686	533
Centrífuga 2	100	240	369	369	686	533
Centrífuga 3	100	240	369	369	686	533
Centrífuga 4	100	240	369	369	686	533
Centrífuga 5	100	240	369	369	686	533
Total	500	1200				

Tabela 27- Lote Máximo de Peças- Secadora: Cenário base

Máquinas	Capacidade		Tipo de Peças (Unid.)			
	Capacidade Total (Kg)	45 % da Capacidade (Kg)	Calça 0,650 (Kg)	Jaqueta 0,650 (Kg)	Saia 0,350 (Kg)	Calça Social 0,450 (Kg)
Secadora 1	150	88	135	135	251	195
Secadora 2	150	88	135	135	251	195
Secadora 3	150	88	135	135	251	195
Secadora 4	150	88	135	135	251	195
Secadora 5	150	88	135	135	251	195
Secadora 6	150	88	135	135	251	195
Secadora 7	150	88	135	135	251	195
Secadora 8	150	88	135	135	251	195
Secadora 9	150	88	135	135	251	195
Total	1350	790				

Tabela 28- Lote Mínimo de Peças- Secadora: Cenário base

Máquinas	Capacidade		Tipo de Peças (Unid.)			
	Capacidade Total (Kg)	30 % da Capacidade (Kg)	Calça 0,650 (Kg)	Jaqueta 0,650 (Kg)	Saia 0,350 (Kg)	Calça Social 0,450 (Kg)
Secadora 1	150	59	90	90	167	130
Secadora 2	150	59	90	90	167	130
Secadora 3	150	59	90	90	167	130
Secadora 4	150	59	90	90	167	130
Secadora 5	150	59	90	90	167	130
Secadora 6	150	59	90	90	167	130
Secadora 7	150	59	90	90	167	130
Secadora 8	150	59	90	90	167	130
Secadora 9	150	59	90	90	167	130
Total	1350	527				

4.3.2. Comparação dos resultados do Cenário base e dos Cenários I, II e III

Os testes computacionais para o cenário base utilizaram os parâmetros mostrados anteriormente para a implementação do modelo no *software*, para os demais cenários foram feitas modificações a partir destes valores. O modelo também foi implementado utilizando o *software* GAMS 24.7.4 com o solver CPLEX, em um computador com sistema operacional Windows 10, processador Intel® Core i5-4200U 1.6GHz e com 6GB de memória RAM.

Cenário base

Como comentado no texto da descrição do processo na Fábrica M, o processo mais demorado é o das secadoras, o que o transforma no gargalo de todo o processo das máquinas. Assim, os limites máximo e mínimo (Max_{dia_i}, Min_{dia_i}) de produção por dia de cada tipo de peça foram baseados conforme as capacidades das secadoras por dia, como também a capacidade máxima de produção no dia (10346 peças).

Com isso, as restrições de lote mínimo das etapas de lavagem e centrifugação não foram atingidas, resultando em lotes com valores inferiores à porcentagem de

utilização estabelecida para seus equipamentos. Isto aconteceu porque o limite mínimo de produção dessas etapas é superior ao limite máximo de produção da etapa da secagem. Portanto, os resultados apresentados a seguir são para as secadoras.

A Tabela 29 apresenta a distribuição dos lotes de produção ($X3_{ilty}$) para as secadoras nos primeiros quatro períodos de produção no Cenário base, o que representa as primeiras oito horas.

Tabela 29- Distribuição dos lotes de produção para os primeiros quatro períodos- Secadoras- Cenário base

Peça	Equipamento	Período			
		h1	h2	h3	h4
calça	Secadora 1	135	135	135	135
calça	Secadora 2	135	-	124	135
calça	Secadora 3	96	124	90	-
calça	Secadora 4	135	135	135	90
calça	Secadora 5	135	135	90	104
calça	Secadora 6	135	135	90	-
calça	Secadora 7	135	135	90	-
calça	Secadora 8	135	135	90	-
calça	Secadora 9	135	-	90	90
jaqueta	Secadora 2	-	129	-	-
jaqueta	Secadora 9	-	90	-	-
saia	Secadora 3	-	-	-	167
saia	Secadora 6	-	-	-	217
saia	Secadora 8	-	-	-	167
calça social	Secadora 7	-	-	-	158

Observando a Tabela 29 percebe-se que o modelo respeita a quantidade de lote máximo e lote mínimo e distribui os lotes de produção de forma a utilizar a capacidade máxima das máquinas na maioria dos equipamentos.

A Figura 6 apresenta a quantidade de peças produzidas por período e os custos de produção em cada período.

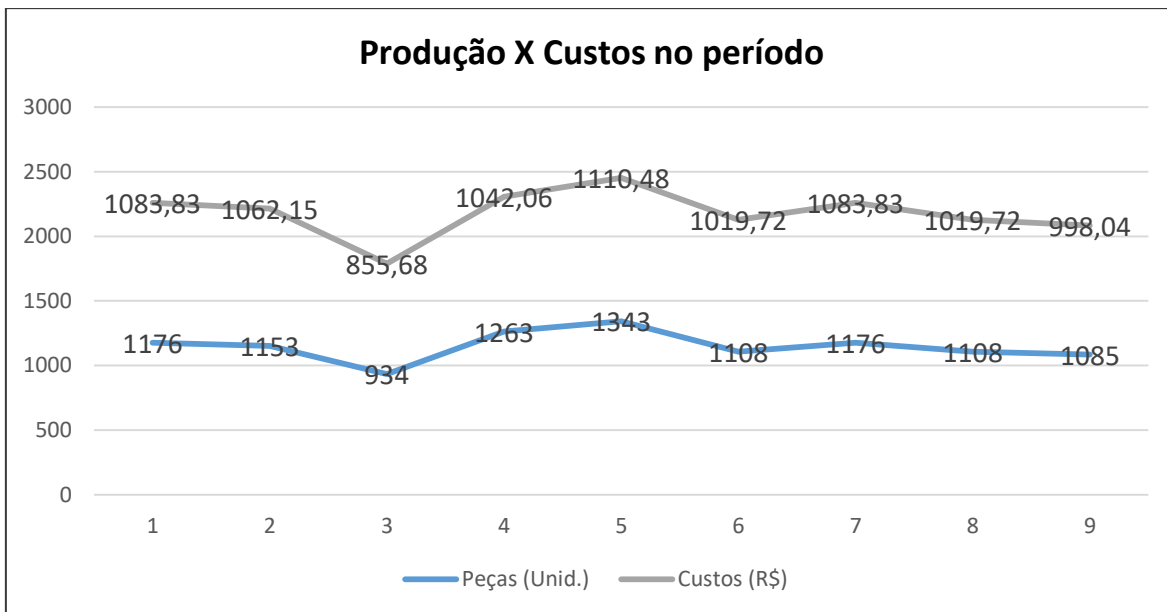


Figura 6- Peças produzidas e custos por período- Cenário base

Podemos perceber que o período que apresenta o maior custo é o período 5 (R\$ 1110,484) e é onde são processadas as maiores quantidades de peças (1343 peças). Entretanto, os períodos 1 e 7 apresentam os maiores custos na sequência, apesar de a segunda maior quantidade de peças (1263 peças) ser processada no período 4, o que indica que não necessariamente um maior volume de produção no período gera os maiores custos. Para identificar qual tipo de peça está sendo processada em cada período e se isso está relacionado com o custo, o gráfico da Figura 7 foi gerado.

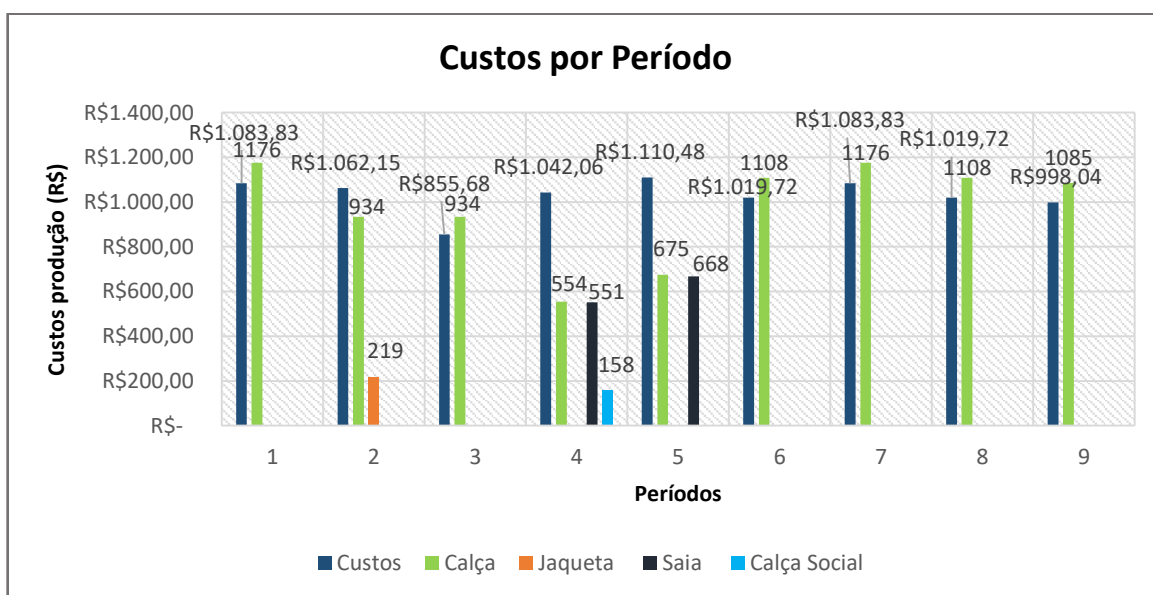


Figura 7- Custos de Produção dos períodos no Cenário base

Analisando a Figura 7 percebe-se que no período de maior custo de produção (período 5) foram processadas calças e saias. No entanto, nos períodos 1 e 7 que apresentam também os maiores custos foram processadas somente calças, o que pode indicar que o mix de produção do período não está demonstrando grande influência nos custos. Para identificar a influência da utilização dos equipamentos nos custos, foi gerada a Figura 8.

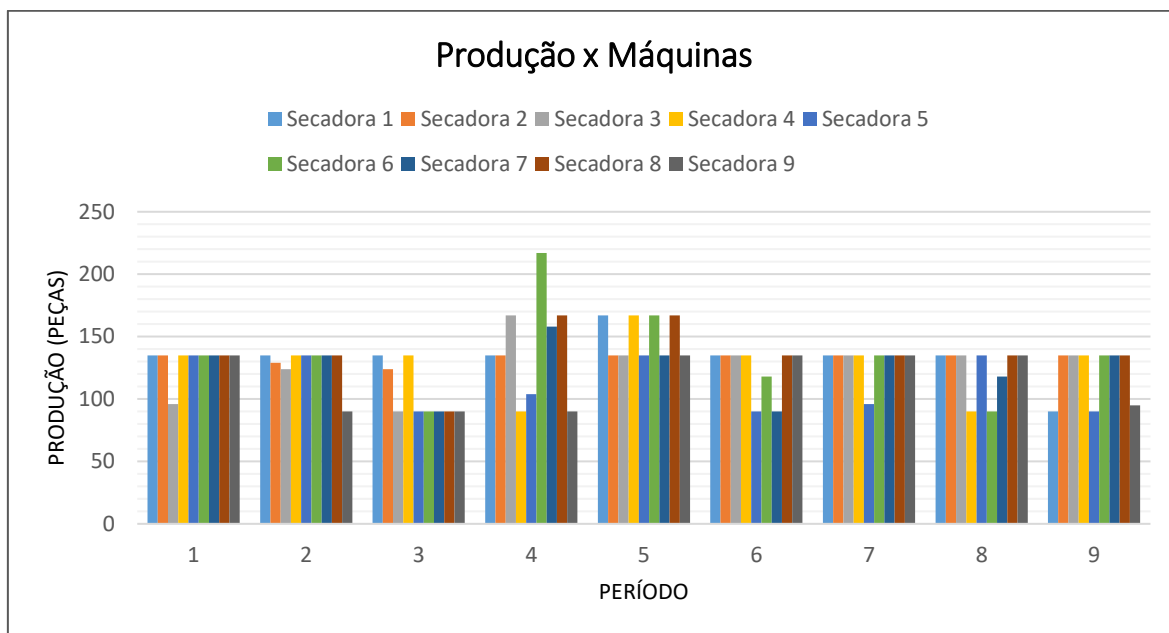


Figura 8- Utilização dos equipamentos por período- Cenário base

Como foi observado na Figura 6, os maiores custos de produção são consumidos no período 5 e por meio da Figura 8 percebe-se que as máquinas mais utilizadas neste período são as secadoras 1, 4, 6 e 8. Nota-se que nos demais períodos (1, 7, 2 e 4) estes equipamentos também estão presentes entre os mais utilizados. Dessa forma, as considerações feitas a partir da figura podem apontar que a quantidade de utilização de determinadas máquinas em cada período tem maior influência nos custos de produção do que as quantidades ou tipo de peças processadas.

Cenário I

No Cenário base a capacidade de produção das secadoras para as 18 horas de produção é inferior às da lavagem e centrifugação. Portanto, foi ampliado o número

de máquinas secadoras de 9 para 21 neste setor para tentar se aproximar da capacidade dos demais processos, o que gerou o Cenário I.

Nas Tabelas 30 e 31 são apresentadas a distribuição dos lotes de produção para os primeiros quatro períodos de produção nas lavadoras e secadoras.

Tabela 30- Distribuição dos lotes de produção para os primeiros quatro períodos nas Lavadoras- Cenário I

Peça	Equipamento	Período			
		h1	h2	h3	h4
calça	Lavadora 1	-	46	46	46
calça	Lavadora 2	-	46	46	46
calça	Lavadora 3	-	46	46	46
calça	Lavadora 4	-	46	46	46
calça	Lavadora 5	-	46	46	46
calça	Lavadora 6	-	46	46	46
calça	Lavadora 7	115	173	173	115
calça	Lavadora 8	115	173	173	115
calça	Lavadora 9	173	173	173	115
calça	Lavadora 10	153	173	173	115
calça	Lavadora 11	242	242	242	162
calça	Lavadora 12	242	242	242	162
calça	Lavadora 13	242	242	242	242
calça	Lavadora 14	242	242	242	222
calça	Lavadora 15	346	346	346	346
calça	Lavadora 16	346	346	346	346
saia	Lavadora 1	129	-	-	-
saia	Lavadora 2	97	-	-	-
saia	Lavadora 3	86	-	-	-
saia	Lavadora 4	86	-	-	-
saia	Lavadora 5	86	-	-	-
saia	Lavadora 6	86	-	-	-

Tabela 31- Distribuição dos lotes de produção para os primeiros quatro períodos nas Secadoras- Cenário I

Peça	Equipamento	Período			
		h1	h2	h3	h4
calça	Secadora 1	-	135	135	90
calça	Secadora 2	135	135	135	135
calça	Secadora 3	135	135	135	135
calça	Secadora 4	90	135	135	90
calça	Secadora 5	135	135	135	135
calça	Secadora 6	135	135	135	90
calça	Secadora 7	90	135	135	90
calça	Secadora 8	135	135	135	135
calça	Secadora 9	135	135	135	90
calça	Secadora 10	135	108	135	135
calça	Secadora 11	101	135	135	90
calça	Secadora 12	135	90	90	135
calça	Secadora 13	-	135	90	90
calça	Secadora 14	135	90	108	90
calça	Secadora 15	-	90	90	90
calça	Secadora 16	90	135	135	90
calça	Secadora 17	135	135	90	90
calça	Secadora 18	135	135	135	90
calça	Secadora 19	135	135	135	135
calça	Secadora 20	90	90	135	101
calça	Secadora 21	135	135	135	90
saia	Secadora 1	236	-	-	-
saia	Secadora 13	167	-	-	-
saia	Secadora 15	167	-	-	-

Por meio destas tabelas de distribuição de lotes percebe-se que as restrições de lote máximo e mínimo foram respeitadas nas máquinas lavadoras e secadoras, assim como, somente um tipo de peça está sendo processada em cada máquina por período. Na Tabela 32 são apresentados os resultados ($X_{2_{ikty}}$) para as centrífugas.

Tabela 32- Distribuição dos lotes de produção para os primeiros oito períodos nas Centrífugas- Cenário I

Peça	Equipamento	Período			
		h1	h2	h3	h4
calça	Centrífuga 1	554	554	554	554
calça	Centrífuga 2	554	554	554	554
calça	Centrífuga 3	554	412	412	-
calça	Centrífuga 4	554	554	554	554
calça	Centrífuga 5	-	554	554	554
saia	Centrífuga 5	570	-	-	-
		h5	h6	h7	h8
calça	Centrífuga 1	554	554	554	504
calça	Centrífuga 2	554	554	554	554
calça	Centrífuga 3	-	550	-	-
calça	Centrífuga 4	512	-	554	554
calça	Centrífuga 5	-	-	554	554
jaqueta	Centrífuga 3	498	-	-	-
saia	Centrífuga 4	-	1029	-	-
saia	Centrífuga 5	835	343	-	-
calça social	Centrífuga 3	-	-	-	360

Observando os resultados para as centrífugas é constatado que o modelo atribuiu um lote de 343 peças de saias na centrífuga 5 no período 6 e 360 calças sociais na centrífuga 3 no período 8, o que infringe a restrição de lote mínimo nas centrífugas. Assim, entende-se que isso pode indicar que devem existir opções de equipamento com capacidades variadas na centrifugação, já que todos os equipamentos possuem a mesma capacidade de 100 Kg. Portanto, esta modificação deu origem ao Cenário II.

Cenário II

No Cenário II as Centrífugas foram trocadas por máquinas de capacidades diferentes. As Tabelas 33 e 34 apresentam as capacidades das novas máquinas.

Tabela 33- Lote máximo de Peças- Centrífugas: Cenário II

Máquinas	Capacidade		Tipo de Peças (Unid.)			
	Capacidade Total (Kg)	45 % da Capacidade	Calças 0,650 (Kg)	Jaquetas 0,650 (Kg)	Saias 0,350 (Kg)	Calça Social 0,450 (Kg)
Centrífuga 1	30	108	166	166	309	240
Centrífuga 2	30	108	166	166	309	240
Centrífuga 3	50	180	277	277	514	400
Centrífuga 4	50	180	277	277	514	400
Centrífuga 5	50	180	277	277	514	400
Centrífuga 6	100	360	554	554	1029	800
Centrífuga 7	100	360	554	554	1029	800
Centrífuga 8	100	360	554	554	1029	800
Total	510	1836				

Tabela 34- Lote Mínimo de Peças- Centrífugas: Cenário II

Máquinas	Capacidade		Tipo de Peças (Unid.)			
	Capacidade Total (Kg)	30 % da Capacidade	Calças 0,650 (Kg)	Jaquetas 0,650 (Kg)	Saias 0,350 (Kg)	Calça Social 0,450 (Kg)
Centrífuga 1	30	72	111	111	206	160
Centrífuga 2	30	72	111	111	206	160
Centrífuga 3	50	120	185	185	343	267
Centrífuga 4	50	120	185	185	343	267
Centrífuga 5	50	120	185	185	343	267
Centrífuga 6	100	240	369	369	686	533
Centrífuga 7	100	240	369	369	686	533
Centrífuga 8	100	240	369	369	686	533
Total	510	1224				

Os demais processos permaneceram como no Cenário I. Desta forma, com essa nova modificação, todas as restrições do modelo foram respeitadas na implementação no *software*. Nas Tabelas 35, 36 e 37 são apresentados os resultados para $X1_{ijty}$, $X2_{ikty}$ e $X3_{ilty}$ para o Cenário II.

Tabela 35- Distribuição dos lotes de produção para os primeiros quatro períodos nas Lavadoras- Cenário II

Peça	Equipamento	Período			
		h1	h2	h3	h4
calça	Lavadora 1	46	46	46	46
calça	Lavadora 2	-	46	46	46
calça	Lavadora 3	46	46	46	46
calça	Lavadora 4	46	46	46	46
calça	Lavadora 5	46	-	46	46
calça	Lavadora 6	46	-	46	46
calça	Lavadora 7	115	115	158	173
calça	Lavadora 8	115	115	115	173
calça	Lavadora 9	115	173	115	173
calça	Lavadora 10	115	115	115	173
calça	Lavadora 11	242	-	242	242
calça	Lavadora 12	242	242	242	242
calça	Lavadora 13	242	242	242	-
calça	Lavadora 14	242	242	242	-
calça	Lavadora 15	346	346	346	-
calça	Lavadora 16	-	-	346	346
jaqueta	Lavadora 5	-	65	-	-
jaqueta	Lavadora 6	-	46	-	-
jaqueta	Lavadora 13	-	-	-	225
jaqueta	Lavadora 14	-	-	-	162
saia	Lavadora 2	86	-	-	-
saia	Lavadora 11	-	300	-	-
saia	Lavadora 16	643	453	-	-
calça social	Lavadora 15	-	-	-	360

Tabela 36- Distribuição dos lotes de produção para os primeiros quatro períodos nas Centrífugas- Cenário II

Peça	Equipamento	Período			
		h1	h2	h3	h4
calça	Centrífuga 1	111	-	111	111
calça	Centrífuga 2	111	111	111	111
calça	Centrífuga 3	185	185	185	277
calça	Centrífuga 4	277	185	185	-
calça	Centrífuga 5	212	185	185	191
calça	Centrífuga 6	554	554	554	-
calça	Centrífuga 7	-	-	554	554
calça	Centrífuga 8	554	554	554	554
jaqueta	Centrífuga 1	-	111	-	-
jaqueta	Centrífuga 6	-	-	-	387
saia	Centrífuga 7	729	753	-	-
calça social	Centrífuga 4	-	-	-	360

Tabela 37- Distribuição dos lotes de produção para os primeiros quatro períodos nas Secadoras- Cenário II

Peça	Equipamento	Período			
		h1	h2	h3	h4
calça	Secadora 1	135	90	90	135
calça	Secadora 2	135	135	135	90
calça	Secadora 3	90	90	135	90
calça	Secadora 4	90	90	135	90
calça	Secadora 5	135	90	135	133
calça	Secadora 6	90	135	135	-
calça	Secadora 7	135	90	135	90
calça	Secadora 8	-	-	135	135
calça	Secadora 9	90	90	90	-
calça	Secadora 10	135	90	135	90
calça	Secadora 11	90	90	90	135
calça	Secadora 12	90	-	135	135
calça	Secadora 13	90	-	90	-
calça	Secadora 14	135	135	135	135
calça	Secadora 15	90	90	135	-
calça	Secadora 16	-	135	135	135
calça	Secadora 17	135	-	99	-
calça	Secadora 18	90	90	90	90
calça	Secadora 19	135	90	90	90
calça	Secadora 20	114	135	90	135
calça	Secadora 21	-	109	90	90
jaqueta	Secadora 9	-	-	-	135
jaqueta	Secadora 13	-	-	-	117
jaqueta	Secadora 15	-	-	-	135
jaqueta	Secadora 17	-	111	-	-
saia	Secadora 8	251	251	-	-
saia	Secadora 12	-	251	-	-
saia	Secadora 13	-	251	-	-
saia	Secadora 16	227	-	-	-
saia	Secadora 21	251	-	-	-
calça social	Secadora 6	-	-	-	195
calça social	Secadora 17	-	-	-	165

Por meio da análise das tabelas anteriores podemos perceber que as restrições de lote máximo e lote mínimo dos equipamentos foram respeitadas, assim como, são alocados um lote de cada tipo de peça por período nos equipamentos. Percebemos também que as quantidades de peças processadas nas lavadoras são as mesmas processadas nas centrifugas e secadoras. Como exemplo, 360 calças sociais foram lavadas no dia, mostrando que as peças são processadas em mesma quantidade em todos os processos.

A Figura 9 ilustra a produção acumulada por período em cada processo do Cenário II. Observando a figura percebe-se que todas as peças que são lavadas são centrifugadas e secas na mesma quantidade e ao final de todo o período analisado todas as peças que estavam disponíveis no início foram processadas. A quantidade de peças disponíveis no início dos períodos é de 23.570 peças, o que representa a capacidade de produção do cenário de produção, e devem ser processadas até o final do dia, o que é comprovado na Figura 9.



Figura 9- Produção acumulada em cada processo. (a) Produção nas Lavadoras; (b) Produção nas Centrífugas; (c) Produção nas Secadoras.

A Figura 10 ilustra os custos por período e a quantidade de peças processadas. Assim como no Cenário base, percebe-se que os maiores custos de produção no

período não estão necessariamente relacionados a maior produção de peças, o que pode ser observado comparando os períodos 6, 7, 5 e 1.

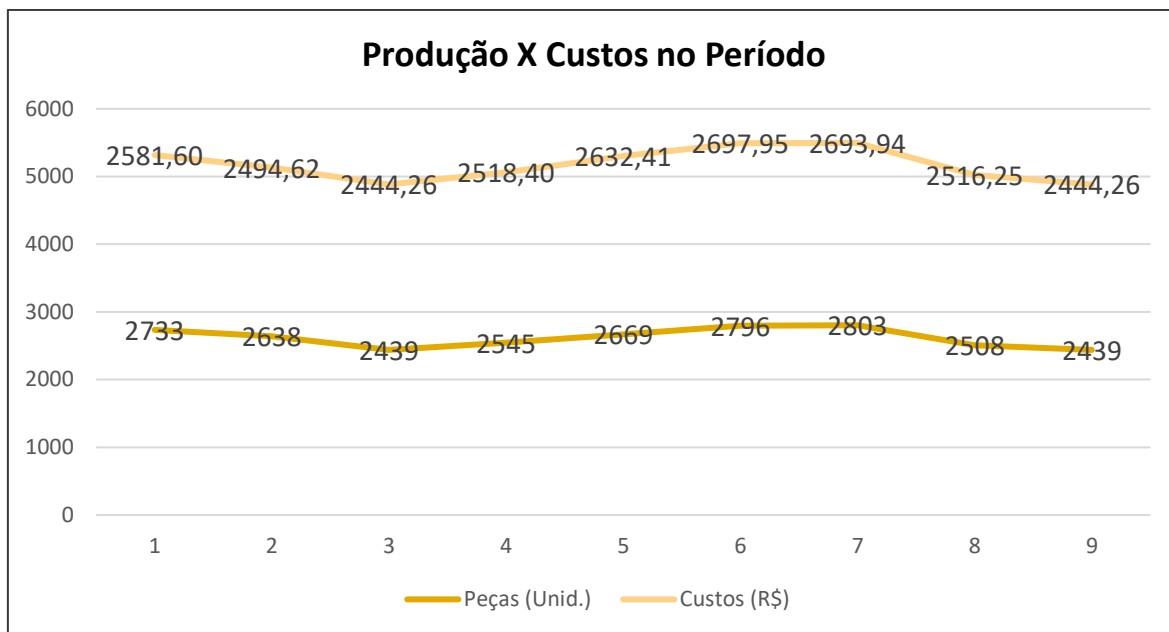


Figura 10- Peças produzidas e custos por período- Cenário II

Na Figura 11 são apresentados os custos por período e o tipo de peças processadas. Observando os períodos 4 e 8 percebemos que apesar de apresentarem custos próximos, são processados tipos e quantidade de peças diferentes em cada um dos períodos.

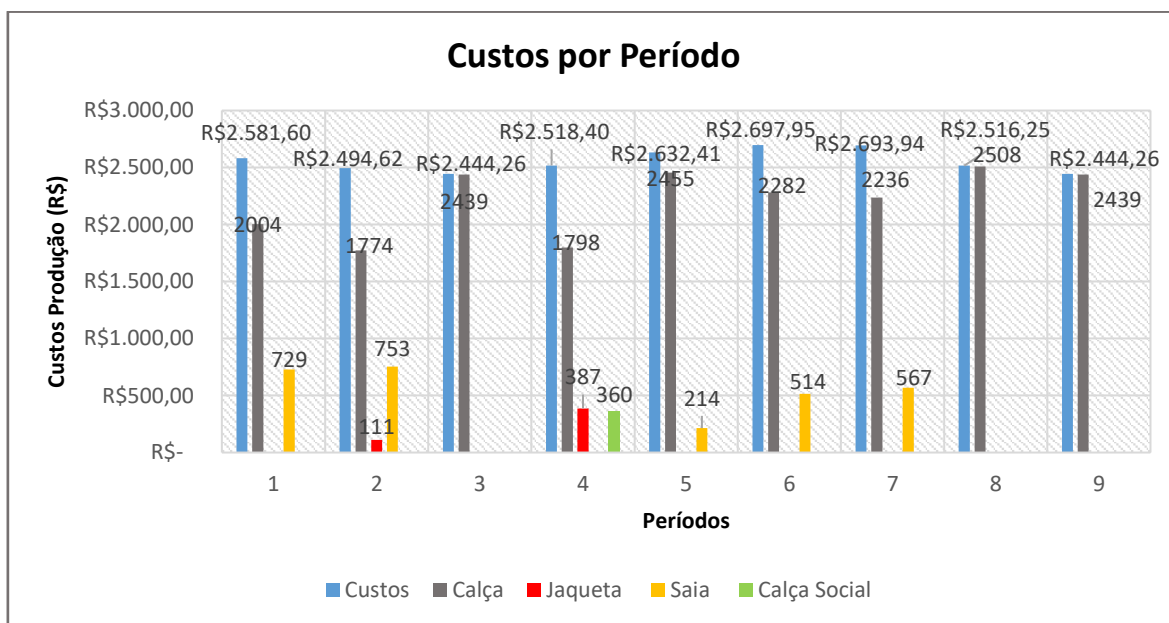


Figura 11- Custos de Produção dos períodos no Cenário II

A Figura 12 ilustra a utilização das máquinas por período. Observando a figura percebe-se que as máquinas mais utilizadas no período 6, período de maior custo, são as secadoras 20, 9 e 14, sendo que elas também estão entre as mais utilizadas nos demais períodos.

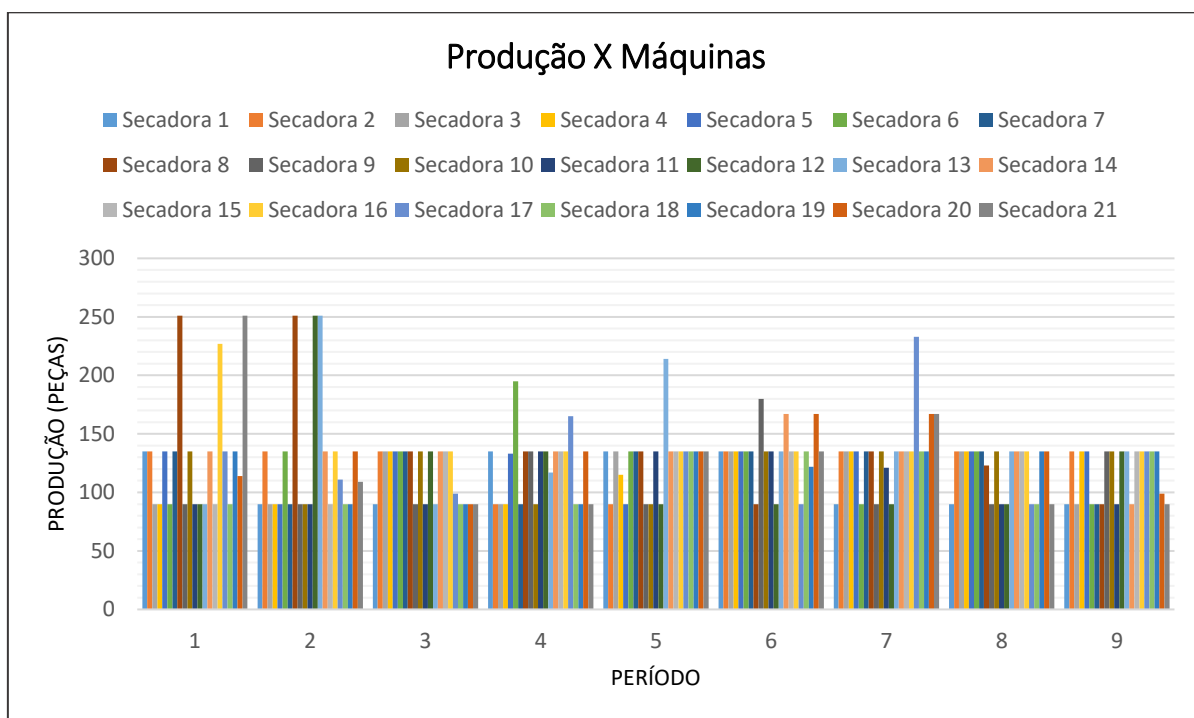


Figura 12- Utilização dos equipamentos por período- Cenário II

A Tabela 38 apresenta algumas estatísticas e informações do modelo no *software* e a solução obtida para os custos de produção.

Tabela 38- Resultados computacionais do Cenário II

Parâmetros	Modelo
Número de variáveis	3.489
Número de variáveis binárias	1.620
Número de equações	4.038
Número de variáveis não negativas	35.432
Tempo computacional (s)	0,125
Quantidade de peças	23.570
Solução obtida (R\$)	23.023,69

Como no Cenário II novas máquinas foram incluídas, o que poderia interferir nos custos finais de produção, foi gerado o Cenário III com modificações no tempo de processo para evitar a necessidade de novos equipamentos.

Cenário III

O processo da secagem na Fábrica M demora em média um tempo de 1 hora e 20 minutos. Entretanto, a empresa acredita que não seria necessário todo esse tempo de processo se fossem evitados os tempos perdidos para abrir os equipamentos e verificar se as peças estão completamente secas. Acredita-se que um tempo apropriado seria de aproximadamente 40 minutos.

Portanto, para que as secadoras apresentassem a mesma capacidade de produção dos outros processos dentro de 18 horas de produção, no Cenário III foram mantidas as 9 secadoras do Cenário base, mas com o tempo de produção de 40 min. Isto aumentou a capacidade de processamento dos equipamentos dentro das duas horas de cada período e fez com que sua capacidade equivalesse aos demais processos.

As Tabelas 39, 40 e 41 apresentam os resultados de $X1_{ijty}$, $X2_{iktty}$ e $X3_{iltty}$ para o Cenário III. Elas abordam o tipo de roupa que deve ser processada, em qual equipamento e quantidade e em qual período, fazendo assim, a correta distribuição dos lotes de produção.

Tabela 39- Distribuição dos lotes de produção para os primeiros quatro períodos nas Lavadoras- Cenário III

Peça	Equipamento	Período			
		h1	h2	h3	h4
calça	Lavadora 1	46	46	46	46
calça	Lavadora 2	46	46	46	46
calça	Lavadora 3	46	46	46	46
calça	Lavadora 4	46	46	46	46
calça	Lavadora 5	46	46	46	46
calça	Lavadora 6	46	46	46	46
calça	Lavadora 7	173	115	115	173
calça	Lavadora 8	173	161	115	173
calça	Lavadora 9	173	173	158	173
calça	Lavadora 10	165	115	115	165
calça	Lavadora 11	242	242	242	242
calça	Lavadora 12	242	242	242	242
calça	Lavadora 13	-	242	242	-
calça	Lavadora 14	242	242	242	242
calça	Lavadora 15	346	-	346	-
calça	Lavadora 16	-	346	346	346
jaqueta	Lavadora 13	221	-	-	-
saia	Lavadora 13	-	-	-	300
saia	Lavadora 15	-	549	-	525
calça social	Lavadora 16	360	-	-	-

Tabela 40- Distribuição dos lotes de produção para os primeiros quatro períodos nas Centrífugas- Cenário III

Peça	Equipamento	Período			
		h1	h2	h3	h4
calça	Centrífuga 1	-	-	111	-
calça	Centrífuga 2	-	111	111	-
calça	Centrífuga 3	-	196	185	185
calça	Centrífuga 4	185	-	185	-
calça	Centrífuga 5	185	185	185	185
calça	Centrífuga 6	554	554	554	554
calça	Centrífuga 7	554	554	554	554
calça	Centrífuga 8	554	554	554	554
jaqueta	Centrífuga 3	221	-	-	-
saia	Centrífuga 1	-	206	-	206
saia	Centrífuga 2	-	-	-	206
saia	Centrífuga 4	-	343	-	413
calça social	Centrífuga 1	160	-	-	-
calça social	Centrífuga 2	200	-	-	-

Tabela 41- Distribuição dos lotes de produção para os primeiros quatro períodos nas Secadoras- Cenário III

Peça	Equipamento	Período			
		h1	h2	h3	h4
calça	Secadora 1	-	312	208	312
calça	Secadora 2	208	208	312	208
calça	Secadora 3	312	-	312	-
calça	Secadora 4	-	208	312	312
calça	Secadora 5	312	312	208	264
calça	Secadora 6	312	208	208	312
calça	Secadora 7	264	312	255	-
calça	Secadora 8	312	312	312	312
calça	Secadora 9	312	282	312	312
jaqueta	Secadora 4	221	-	-	-
saia	Secadora 3	-	549	-	439
saia	Secadora 7	-	-	-	386
calça social	Secadora 1	360	-	-	-

Por meio destas tabelas percebemos que o modelo também respeitou as limitações impostas na modelagem no Cenário III e realizou a distribuição dos lotes de forma a processar todas as peças, fazendo uso de todos os equipamentos dentro da sua faixa de utilização.

Com a implementação do modelo no *software* GAMS é possível obter, além da solução para o problema estudado, dados estatísticos sobre o modelo, como por

exemplo, o número de equações geradas, a quantidade total de variáveis inteiras e binárias, o número de variáveis não negativas, bem como o tempo necessário para gerar a solução. Na Tabela 42 são apresentadas as estatísticas encontradas para o Cenário base e os cenários I, II e III estudados.

Tabela 42- Resultados obtidos com o *software* GAMS.

Parâmetros	Cenário base	Cenário I	Cenário II	Cenário III
Tipo de peças processadas (<i>i</i>)	4	4	4	4
Processo das Lavadoras (<i>j</i>)	16	16	16	16
Processo das Centrifugas (<i>k</i>)	5	5	8	8
Processo das Secadoras (<i>l</i>)	9	21	21	9
Períodos- com duração de duas horas (<i>t</i>)	9	9	9	9
Dias	1	1	1	1
Número de variáveis	2.394	3.270	3.489	2.613
Número de variáveis binárias	1.080	1.512	1.620	1.188
Número de equações	2.040	3.612	4.038	3.054
Número de variáveis não negativas	22.025	32.909	35.432	26.780
Tempo computacional (s)	1,500	0,141	0,125	0,094
Quantidade de peças	10.346	23.570	23.570	23.570
Solução obtida (R\$)	9.275,51	22.500,21	23.023,69	20.975,12
Custos (R\$/peça)	R\$ 0,90	R\$ 0,95	R\$ 0,98	R\$ 0,89

Com a observação da tabela anterior percebe-se que o menor custo de produção é apresentado pelo Cenário base. Entretanto, se considerado o custo por peça unitário ele não é o menor. Assim como, em virtude deste cenário apresentar como limitação as capacidades das secadoras dentro de 18 horas de produção, ele não permite que sejam respeitadas as quantidades de lote mínimo nas lavadoras e centrifugas, o que resulta, por exemplo, em um lote de 101 saias na Lavadora 11 que possui como lote mínimo de saias 300 peças. Desta forma, para atender as capacidades das secadoras, os demais processos ficam com uma capacidade em excesso ociosa. Assim, por ele não respeitar todas as considerações impostas a

todos os processos entende-se que ele não é o cenário de produção mais adequado.

Considerando o fato de que no Cenário base e no Cenário I a Fábrica M opera somente com centrifugas de mesma capacidade (100 Kg) e que com essa configuração não foi possível obter uma solução que atendesse todas as restrições estabelecidas no problema, isto mostrou a necessidade de que centrífugas de capacidades variadas fossem incluídas, levando aos cenários II e III.

O Cenário III apresenta um menor custo de produção em relação ao Cenário II para a mesma quantidade de peças processadas, além de que nessa configuração não são necessários a inclusão de novas secadoras para atingir a capacidade de produção no tempo esperado. Este cenário demonstra que com a redução do tempo de processo das secadoras de uma hora e vinte minutos para 40 minutos, o que era esperado pela Fábrica M, isso pode aumentar a capacidade deste setor e permitir que todas as peças lavadas sejam secadas no mesmo tempo de operação dos demais processos.

Portanto, percebe-se que o cenário de produção III é a melhor opção para o problema da Fábrica M, comprovando o que já era esperado, pois, com a redução dos tempos perdidos na etapa de secagem isso pode aumentar a capacidade deste setor utilizando os recursos já existentes.

A aplicação do modelo no exemplo ilustrativo e no estudo de caso I teve como objetivo verificar se a lógica matemática do modelo funciona corretamente e se ele é capaz de encontrar uma solução factível para um problema de dimensões reais, o que foi comprovado por meio das análises anteriores. Como não foram obtidos valores monetários da Fábrica M, as análises restringiram-se a considerações sobre o funcionamento do modelo frente as limitações do problema estudado.

4.4. Estudo de Caso- II

Para comparar os resultados do modelo com valores monetários de um problema real, foi utilizado um segundo estudo de caso retirado de Oliveira (2013). Neste trabalho o autor avaliou o setor de secagem de uma lavanderia têxtil industrial, com

o objetivo de minimizar os custos de produção com energia elétrica e mão-de-obra no setor e aumentar sua margem de contribuição por meio de um modelo de otimização multiobjectivo.

Para o teste do modelo foram utilizados os dados de entrada retirados do estudo, como são apresentados no Quadro 5 e nas Tabelas 43 e 44.

Quadro 5- Índices gerais aplicados ao modelo- Estudo de Caso II

Índice	Descrição/ Valor
Peças de roupa (R)	Roupa
Tipos de produto (N)	6 (= Calça, Jaqueta, Saia, Calça Social, Bermuda, Camisa)
Número de máquinas- Secadoras (L)	10 (= Secadora1,..., Secadora10)
Número de períodos (T)	21 (= h1,...,h21)
Número de dias (Y)	26 (= dia1,..., dia26)

Fonte: Oliveira, 2013

O problema estudado considera a produção de seis tipos de peças distintas em 10 máquinas secadoras com utilização máxima de 75 % do equipamento e limite mínimo de uso do equipamento de 50 %. Para o teste neste trabalho foi considerado a produção para um mês de 26 dias úteis com uma jornada de trabalho diária de 21 horas. As tabelas abaixo apresentam a quantidade de lote máximo e lote mínimo permitido em cada máquina.

Tabela 43- Lote máximo de Peças: Secadora- Estudo de Caso II

Máquinas	Capacidade Total (Kg)	75 % da Capacidade Total					
		Calça	Jaqueta	Saia	Calça Social	Bermuda	Camisa
		0,650 (Kg)	0,650 (Kg)	0,350 (Kg)	0,450 (Kg)	0,300 (Kg)	0,200 (Kg)
Secadora 1	100	115	115	214	167	250	375
Secadora 2	100	115	115	214	167	250	375
Secadora 3	100	115	115	214	167	250	375
Secadora 4	100	115	115	214	167	250	375
Secadora 5	150	173	173	321	250	375	563
Secadora 6	150	173	173	321	250	375	563
Secadora 7	150	173	173	321	250	375	563
Secadora 8	150	173	173	321	250	375	563
Secadora 9	200	231	231	429	333	500	750
Secadora 10	30	35	35	64	50	75	113
Total	1230						

Tabela 44- Lote Mínimo de Peças: Secadora- Estudo de Caso II

Máquinas	Capacidade Total (Kg)	50 % da Capacidade Total					
		Calça	Jaqueta	Saia	Calça Social	Bermuda	Camisa
		0,650 (Kg)	0,650 (Kg)	0,350 (Kg)	0,450 (Kg)	0,300 (Kg)	0,200 (Kg)
Secadora 1	100	77	77	143	111	167	250
Secadora 2	100	77	77	143	111	167	250
Secadora 3	100	77	77	143	111	167	250
Secadora 4	100	77	77	143	111	167	250
Secadora 5	150	115	115	214	167	250	375
Secadora 6	150	115	115	214	167	250	375
Secadora 7	150	115	115	214	167	250	375
Secadora 8	150	115	115	214	167	250	375
Secadora 9	200	154	154	286	222	333	500
Secadora 10	30	23	23	43	33	50	75
Total	1230						

Os resultados do modelo para a produção são apresentados na Tabela 45 e comparados com dados obtidos do estudo de caso II. O modelo foi implementado apenas com as equações e restrições referentes ao setor de secagem. A coluna da esquerda representa a quantidade de peças produzidas por mês na empresa estudada, sendo que, sua capacidade máxima de peças por mês é de 684.703 calças, 17.118 jaquetas, 51.351 saias, 8.551 calças sociais, 68.468 bermudas e 25.675 camisas.

Tabela 45- Comparação dos resultados do modelo e da produção do Caso II estudado.

Tipo de peças	Produção- Estudo de Caso II	Produção- Modelo (Setor da Secagem)
Calça	312.000	684.131
Jaqueta	7.800	17.070
Saia	23.400	51.351
Calça social	3.900	8.551
Bermuda	31.200	68.468
Camisa	11.700	25.674
Custo de Produção (energia elétrica e mão-de-obra)	R\$ 16.718,00	R\$ 16.691,00

Por meio da observação da tabela percebe-se que o modelo apresenta como produção valores próximos a capacidade máxima de produção por mês, ao contrário do que ocorre na empresa em estudo, e com custos de produção inferior ao praticado. Dessa forma, com este estudo de caso os resultados dos testes indicam que o modelo pode realizar a distribuição dos lotes de produção de forma que otimiza o uso dos equipamentos disponíveis e também é capaz de reduzir os custos com produção.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Como apresentado no capítulo 1, a pesquisa apresentada neste trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um modelo matemático para a minimização de custos de produção em lavanderias de beneficiamento têxtil otimizando o processo de tomada de decisão na programação da produção, utilizando técnicas de pesquisa operacional. Para atingir este objetivo, criou-se mais alguns objetivos específicos: Elaborar um modelo matemático de otimização para o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção a partir de modelos já existentes na literatura; aprimorar o processo de tomada de decisão e melhorar a utilização dos equipamentos e recursos produtivos com a modelagem matemática e; obter uma solução para o modelo desenvolvido por meio de *software* de otimização, como o GAMS (*General Algebraic Modeling System*).

No capítulo 2, apresentamos uma revisão teórica sobre o setor da indústria têxtil brasileira e no mundo, assim como, uma breve revisão sobre os modelos clássicos de problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção. Dentre os modelos contemplados no referencial teórico, podemos destacar os modelos que combinam dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção com máquinas em paralelo como maior contribuição para esta pesquisa.

O capítulo 3 demonstra a metodologia utilizada no trabalho e o desenvolvimento do modelo de otimização proposto neste estudo. O problema estudado envolveu a minimização dos custos de produção, sendo eles, os custos com energia elétrica, água, mão-de-obra e custos fixos. Como características de produção incluíam o atendimento a uma certa demanda, seleção de processos e máquinas com capacidades distintas em paralelo nos três setores, lavagem, centrifugação e secagem. Para representar o problema e obter uma solução utilizou-se de programação linear mista inteira e o *solver* CPLEX do *software* GAMS.

No capítulo 4, apresentamos os resultados da aplicação da modelagem em um exemplo ilustrativo e em dois estudos de caso. Com base nos resultados obtidos, conclui-se que o modelo tem potencial para realizar de forma adequada a

programação da produção em empresas desse setor e apoiar as decisões do nível tático e operacional. Pois, o modelo desenvolvido abrange as principais etapas e custos da lavanderia têxtil.

Os resultados da aplicação do modelo no exemplo e nos estudos de caso indicam que ele é capaz de dimensionar os lotes de produção de modo a utilizar da melhor forma os recursos e capacidades disponíveis dos equipamentos. Isto pode ser verificado no Estudo de Caso I, onde o modelo conseguiu determinar o melhor cenário de produção conforme as limitações impostas. Assim como, por meio do Estudo de Caso II, pode-se verificar que ele é capaz de atingir um volume maior de produção com custos reduzidos com a adequada programação de lotes de produção.

Ao final do desenvolvimento desta pesquisa, pode-se dizer, portanto, que o objetivo do trabalho foi alcançado. A modelagem desenvolvida tem capacidade para a minimização dos custos de produção em empresas desse setor e para auxiliar a área do planejamento e controle da produção com decisões sobre o dimensionamento e sequenciamento dos lotes. Assim como, é possível obter uma solução viável para o problema por meio de otimizadores, como o GAMS, apesar de sua forte natureza combinatória.

CAPÍTULO VI

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados do estudo foram satisfatórios e encorajam pesquisas futuras sobre o mesmo tema no sentido de melhorar o modelo proposto e dar continuidade ao trabalho. A seguir, apresentamos algumas perspectivas de pesquisas interessantes:

- Sugere-se como um futuro estudo, de cunho mais prático, a aplicação da modelagem apresentada com dados reais de produção e monetários em empresas do mesmo setor;
- Ampliar a modelagem proposta incluindo os custos com *setup* dos processos;
- Realizar estudos que avaliem, além da redução dos custos de produção, a redução dos impactos ambientais com a otimização da produção. Dessa forma, por exemplo, poderiam ser avaliados os impactos na redução do consumo de energia elétrica e água.

REFERÊNCIAS

- ABIT. Indústria Têxtil e de Confecção Brasileira. Cenários, desafios, perspectivas e demandas. **Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção**, p. 44, 2013.
- ABIT. Agenda de Prioridades Têxtil e Confecção 2015 a 2018. **Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção**, p. 19, 2014.
- ABIT. O Poder da Moda. Cenários, Desafios, Perspectivas. Agenda de Competitividade da Indústria Têxtil e de Confecção Brasileira 2015 a 2018. **Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção**, p. 52, 2015.
- ABRAMAM. Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos. A situação da Manutenção no Brasil, Salvador, 2013. Disponível em :<<http://www.abraman.org.br/Arquivos/403/403.pdf>>. Acesso em: 20 Jun. 2017.
- AGGARWAL, A.; PARK, J. K. Improved Algorithms for Economic Lot Size Problems. **Operations Research**, v. 41, n. 3, p. 549–571, jun. 1993.
- ALAY, E.; DURAN, K.; KORLU, A. A sample work on green manufacturing in textile industry. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 3, p. 39–46, 2016.
- ALLAHVERDI, A.; GUPTA, J. N. D.; ALDOWAISAN, T. A review of scheduling research involving setup considerations. **Omega**, v. 27, n. 2, p. 219–239, abr. 1999.
- ANGELIS-DIMAKIS, A.; ALEXANDRATOU, A.; BALZARINI, A. Value chain upgrading in a textile dyeing industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 138, p. 237–247, 2016.
- ARAÚJO, S. A. DE; ARENALES, M. N. Problema de dimensionamento de lotes monoestágio com restrição de capacidade: modelagem, método de resolução e resultados computacionais. **Pesquisa Operacional**, v. 20, n. 2, p. 287–306, 2000.
- ARENALES, M.N.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. **Pesquisa Operacional**- Rio de Janeiro: Elsevier, 2008.
- BAHL, H. C.; RITZMAN, L. P.; GUPTA, J. N. D. OR Practice—Determining Lot Sizes and Resource Requirements: A Review. **Operations Research**, v. 35, n. 3, p. 329–345, 1987.

BAO, W. *et al.* Optimizing a laundering program for textiles in a front-loading washing machine and saving energy. **Journal of Cleaner Production**, v. 148, p. 415–421, 2017.

BARROS, A. D.; MOCCELLIN, J. V. Análise Da Flutuação Do Gargalo Em Flow Shop Permutacional Com Tempos De Setup Assimétricos E Dependentes Da Seqüência. **GESTÃO & PRODUÇÃO**, v.11, n.1, p.101-108, jan.-abr. 2004.

BASTIAN, E. Y. O.; ROCCO, J. L. S. Guia técnico ambiental da indústria têxtil. **Sinditêxtil**, p. 99, 2009.

BINDER, T. *et al.* Introduction to Model Based Optimization of Chemical Processes on Moving Horizons. **Online Optimization of Large Scale Systems: State of the Art**, p. 295–340, 2001.

BITRAN, G. R.; MATSUO, H. Approximation Formulations for the Single-Product Capacitated Lot Size Problem. **Operations Research**, v. 34, n. 1, p. 63–74, fev. 1986.

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

BROOKE, A.; KENDRICK, D. & MEERAUS, A. GAMS: Sistema geral de modelagem algébrica. São Paulo: Edgard Blücher, 1997.

CHEN, L. *et al.* A process-level water conservation and pollution control performance evaluation tool of cleaner production technology in textile industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 1137–1143, 2017.

CNI/ABIT. Têxtil e Confecção: Inovar, Desenvolver e Sustentar. **Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável I**, p. 74, 2012.

COPIE, K. *et al.* Simultaneous lotsizing and scheduling problems: a classification and review of models. **OR Spectrum**, v. 39, n. 1, 2017.

COSTA, A. C. R. D.; ROCHA, Ê. R. P. DA. Panorama da cadeia produtiva têxtil e de confecções e a questão da inovação. **BNDES Setorial**, v. 29, p. 159–202, 2009.

DAUZÈRE-PÈRES, S., LASSERRE, J.B., Integration of lotsizing and scheduling decisions in a job-shop. **European Journal of Operational Research**. v. 75, p.

413-426, 1994a.

DAUZÈRE-PÈRES, S., LASSERRE, J.B., **An Integrated Approach in Production Planning and Scheduling, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems**, vol. 411, Springer, Berlin, 1994b.

DE BODT, M. A.; GELDERS, L. F.; VAN WASSENHOVE, L. N. Lot sizing under dynamic demand conditions: A review. **Engineering Costs and Production Economics**, v. 8, n. 3, p. 165–187, 1984.

DOBSON, G. The Economic Lot-Scheduling Problem: Achieving Feasibility Using Time-Varying Lot Sizes. **Operations Research**, v. 35, n. 5, p. 764–771, 1987.

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

DREXL, A., HAASE, K. Sequential-analysis based randomizedregret-methods for lot-sizing and scheduling. **Journal of the Operational Research Society**, v. 47, p. 251-265, 1996.

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

ELMAGHRABY, S. E. The economic lot scheduling problem (ELSP): review and extensions. **Management Science**, v. 24, n. 6, p. 587–598, 1978.

FEDERGRUEN, A.; TZUR, M. A SIMPLE FORWARD ALGORITHM TO SOLVE GENERAL DYNAMIC LOT SIZING MODELS WITH n PERIODS IN $O(n \log n)$ OR $O(n)$ TIME. **Management Science**, v. 37, n. 8, p. 909–925, 1991.

FERNANDES, F.; MORABITO, R. Linguagens de modelagem GAMS e LINGO: Aplicação a um problema de balanceamento de linha de montagem. **Cadernos de Engenharia de Produção DEP/UFSCar**, São Carlos, n.20, p.8-29, 1993.

FIRJAN. Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro. Publicações Sistema Firjan- Ambientes de Negócios, Quanto custa a energia elétrica para a pequena e média indústria no Brasil? Rio de Janeiro, 2016.

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 lotsizing and scheduling problem. **OR Spektrum**, v. 19, n. 1, p. 11–21, 1997.

FLYNN, B. B. The effects of setup time on output capacity in cellular manufacturing. **International Journal of Production Research**. v. 25, n. 12, p. 1761-1772, 1987.

FUJITA, R. M. L.; JORENTE, M. J. A Indústria Têxtil no Brasil: uma perspectiva histórica e cultural. **Moda palavra e-periódico**, v. 8, n. 15, p. 153–174, 2015.

GALLEGO, G.; JONEJA, D. Economic Lot Scheduling Problem With Raw Material Considerations. **Operations Research**, v. 42, n. 1, 1994.

GARCIA, R. Circuito ABIT/TEXTBRASIL O Consumo de Energia e a Competitividade da Indústria Têxtil. Brusque. 2015.

GHOSH DASTIDAR, S.; NAGI, R. Scheduling injection molding operations with multiple resource constraints and sequence dependent setup times and costs. **Computers and Operations Research**, v. 32, n. 11, p. 2987–3005, 2005.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P.L. **Otimização combinatória e Programação Linear- Modelos e algoritmos**. Editora campus, 6º Tiragem. Rio de Janeiro, 2000.

GOMES, G. *et al.* Indústria têxtil de santa catarina e sua capacidade inovadora: estudo sob a perspectiva da eficiência, eficácia, custos e melhoria de processos. **RAI – Revista de Administração e Inovação**, v. 11, p. 273–294, 2014.

GORINI, A. P. F. Panorama do setor têxtil no Brasil e no mundo: reestruturação e perspectivas. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 12, p. 17-50, set. 2000.

GUO, Z. X. *et al.* Mathematical model and genetic optimization for the job shop scheduling problem in a mixed- and multi-product assembly environment: A case study based on the apparel industry. **Computers & Industrial Engineering**, v. 50, n. 3, p. 202–219, 2006.

HASANBEIGI, A.; PRICE, L. A review of energy use and energy efficiency technologies for the textile industry. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 3648–3665, 2012.

HASANBEIGI, A.; PRICE, L. A technical review of emerging technologies for energy and water efficiency and pollution reduction in the textile industry *Journal of Cleaner*

- Production, **Journal of Cleaner Production**, v. 95, p. 30-44, 2015.
- HIMMELBLAU, D.M. Optimization of Chemical Processes. Editora McGraw- Hill Book Company. Singapura, 2006.
- HSU, W.-L. On the General Feasibility Test of Scheduling Lot Sizes for Several Products on One Machine. **Management Science**, v. 29, n. 1, p. 93–105, 1983.
- HUANG, B. *et al.* Energy-related GHG emissions of the textile industry in China. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 119, p. 69–77, 2017.
- JANS, R.; DEGRAEVE, Z. Modeling industrial lot sizing problems: a review. **International Journal of Production Research**, v. 46, n. 6, p. 1619–1643, 2008.
- JIANG, W. *et al.* Conserving water by optimizing production schedules in the dyeing industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, p. 1696–1702, 2010.
- KARIMI, B.; FATEMI GHOMI, S. M. T.; WILSON, J. M. The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms. **Omega**, v. 31, p. 365–378, 2003.
- KARMARKAR, U. S.; SCHRAGE, L. The Deterministic Dynamic Product Cycling Problem. **Operations Research**, v. 33, n. 2, p. 326–345, abr. 1985.
- KARMARKAR, U.S., KEKRE, S., KEKRE, S., The deterministic lotsizing problem with startup and reservation costs. **Operations Research**, v. 35, p. 389-398, 1987.
- KIMMS, A. Multi-level, single-machine lot sizing and scheduling (with initial inventory). **European Journal of Operational Research**, v. 89, n. 1, p. 86–99, 1996.
- KIMMS, A. Multi-level Lot Sizing and Scheduling - Methods for Capacitated, Dynamic, and Deterministic Models, Physica, Heidelberg, 1997.
- KO, C.-H.; WANG, S.-F. Precast production scheduling using multi-objective genetic algorithms. **Expert Systems With Applications**, v. 38, p. 8293–8302, 2011.
- LASSERRE, J. B. An Integrated Model for Job-Shop Planning and Scheduling. **Management Science**, v. 38, n. 8, p. 1201–1211, ago. 1992.
- LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation modeling and analysis**. 2. ed. New York: McGraw- Hill, 1991.

LEE, Y. H.; PINEDO, M. Scheduling jobs on parallel machines with sequence-dependent setup times. **European Journal of Operational Research**, v. 100, n. 3, p. 464–474, 1997.

LOPES, P.; SABOIA, D. E. J. Problema integrado de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção em uma fábrica de produtos de higiene pessoal. 2010. 147 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenheiro de Produção). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2010.

LOVELAND, J. L.; MONKMAN, S. K.; MORRICE, D. J. Dell uses a new production-scheduling algorithm to accommodate increased product variety. **Interfaces**, v. 37, n. 3, p. 209–219, 2007.

MORABITO, R.; PUREZA, V. Modelagem e simulação. In: MIGUEL, Paulo A.C (org.). *Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações*. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2012, p. 169-196.

MORABITO, R. Pesquisa operacional. In: BATALHA, Mauro O. (org.). *Introdução à engenharia de produção*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2008, p.157-181.

MEREDITH, J. R. *et al.* Alternative research paradigms in operations management. **Journal of Operations Management**, v. 8, p. 297-326, 1989.

MEYR, H. Simultaneous lotsizing and scheduling by combining local search with dual reoptimization. **European Journal of Operational Research**, v. 120, n. 2, p. 311–326, 2000.

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

NBS, National Bureau of Statistics. China Energy Statistical Yearbook, 2011. China Statistics Press, Beijing, China.

OLIVEIRA, E. A. de. **Otimização de Processos em Indústria Têxtil**. 2013. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)- Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2013.

PAGLIARUSSI, M. Contribuições para a otimização da programação da produção de bebidas a base de frutas. 2013. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de

Produção)- Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

PAIVA, R. P. O. de. Um modelo baseado em seleção de processos e dimensionamento de lotes para o planejamento agregado da produção em usinas de açúcar e álcool. 2005. 202 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. SP. 2005.

PEDROSO, M. C.; CORRÊA, H. L. Produção com capacidade finita: uma decisão estratégica? **RAE- Revista de Administração de Empresas**, São Paulo, v. 36, n. 4, p. 60–73, 1996.

PENG, L. *et al.* Energy efficiency and influencing factor analysis in the overall Chinese textile industry. **Energy**, v. 93, p. 1222–1229, 2015.

PERRY, R. H., CHILTON, C. H. **Manual de Engenharia Química**. Editora Guanabara Dois, 5ª Edição. Rio de Janeiro. 1980.

PIMENTEL, F. **Setor Têxtil e de Confecção Momento Atual e Agenda de Trabalho**. Circuito Abit/ Texbrasil. Belém, 2016.

POLDI, K. C. O problema de corte de estoque multiperíodo. 2007. 109 f. Tese (Doutorado em Ciências de Computação e Matemática Computacional). Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação- ICMS- USP, São Carlos, 2007.

RANGEL, A. S.; DA SILVA, M. M.; COSTA, B. K. Competitividade da Indústria Têxtil Brasileira. **Revista de Administração e Inovação - RAI**, v. 7, n. 1, p. 151–174, 2010.

RECH, S. R. Cadeia produtiva da moda: um modelo conceitual de análise da competitividade no elo confecção. 2006. 282 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. SC. 2006

ROGERS, J. D. A Computational Approach to the Economic Lot Scheduling Problem. **Management Science**, v. 4, n. 3, p. 264–291, 1958.

RUSSOMANO, V. H. **PCP: Planejamento e Controle da Produção**. 6 ed. São Paulo: Pioneira, 2000.

SEEANNER, F.; MEYR, H. Multi-stage simultaneous lot-sizing and scheduling for

flow line production. **OR Spectrum**, v. 35, n. 1, p. 33–73, 2013.

SLACK, N., CHAMBERS, S., JHONSTON, R. *Administração da Produção*. 2a Edição. São Paulo: Editora Atlas, 2002.

SILVA, A. F. da S. *Modelagem do Planejamento agregado da produção de uma usina sucroalcooleira*. 2009. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Itajubá. Itajubá. MG. 2009.

TUBINO, D. F. **Manual de Planejamento e Controle da Produção**. 2 ed. São Paulo: Atlas, 2006.

U.S. DOE. U.S. Department of Energy. 2010. Manufacturing Energy Consumption Survey (MECS)-2006. Disponível em: <<http://www.eia.doe.gov/emeu/mecs/mecs2006/2006tables.html>>.

U.S. DOE. U.S. Department of Energy, Advanced Manufacturing Office (AMO), 2012. Industries and Technologies. Disponível em:< http://www1.eere.energy.gov/industry/industries_technologies/index.html>.

VAJNHANDL, S.; VALH, J. V. The status of water reuse in European textile sector. **Journal of Environmental Management**, v. 141, p. 29-35, 2014.

WAGELMANS, A.; VAN HOESEL, S.; KOLEN, A. Economic Lot Sizing: An $O(n \log n)$ Algorithm That Runs in Linear Time in the Wagner-Whitin Case. **Operations Research**, v. 40, n. 1, p. 144–156, fev. 1992.

WAGNER, H.M., WHITIN, T.M., Dynamic version of the economic lot size model. **Management Science**, 5, p. 89-96, 1958.

WEI, W. *et al.* Tactical production and distribution planning with dependency issues on the production process. **Omega**, v. 67, p. 99-114, 2017.

WILL M. BERTRAND, J.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 241–264, 2002.

WU, C. C.; CHANG, N. B. Global strategy for optimizing textile dyeing manufacturing process via GA-based grey nonlinear integer programming. **Computers and Chemical Engineering**, v. 27, n. 6, p. 833–854, 2003.

ZHOU, L. *et al.* Study on optimizing production scheduling for water-saving in textile dyeing industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 141, p. 721–727, 2017.

ZIPKIN, P. H. Computing optimal lot sizes in the economic lot scheduling problem. **Operations Research**, v. 39, p. 56-63, 1991.