UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Ramon Faganello Fachini

Métodos quantitativos para o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes na indústria de embalagens de vidro

São Carlos
2015

Ramon Faganello Fachini

Métodos quantitativos para o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes na indústria de embalagens de vidro

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de Concentração: Processos e Gestão de Operações

Orientador: Prof. Dr. Kleber Francisco Esposto

São Carlos
2015

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

F139m Fachini, Ramon Faganello
Métodos quantitativos para o problema de
dimensionamento e sequenciamento de lotes na indústria
de embalagens de vidro / Ramon Faganello Fachini;
orientador Prof Kleber Francisco Espoto. São Carlos,
2015.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Produção e Área de Concentração em
Processos e Gestão de Operações -- Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2015.

1. Programação inteira mista. 2. Dimensionamento e
sequenciamento de lotes. 3. Metaheurística. 4. VNS. 5.
SCOR. 6. Indústria de embalagens de vidro. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **RAMON FAGANELLO FACHINI**.

Título da dissertação: "Métodos quantitativos para o problema de dimensionamento e seqüenciamento de lotes na indústria de embalagens de vidro".

Data da defesa: 16/01/2015

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **Kleber Francisco Espôsto (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Walther Azzolini Júnior**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Victor Cláudio Bento de Camargo**
(Universidade Federal do Triângulo Mineiro/UFTM)

Aprovado

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção:

Profa. Associada **Daisy Aparecida do Nascimento Rebelatto**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, pois foi nela que encontrei a força e o apoio necessários para superar as inúmeras dificuldades enfrentadas e para contornar as diversas mudanças pelas quais passei durante esse período. Gostaria, porém, de destacar três pessoas em especial dessa família: minha companheira, Livia, que me proporcionou toda a compreensão e todo o companheirismo necessários ao longo dessa trajetória, e meus pais, Cecilia e Ozorio, que sempre me foram exemplos de conduta nos mais diversos aspectos possíveis.

AGRADECIMENTOS

Esta seria lista demasiadamente longa, caso constassem todos os nomes que, de fato, contribuíram para que esse trabalho fosse bem sucedido. Logo, tentarei, nesse espaço, mencionar alguns nomes sem os quais esse trabalho não lograria êxito de forma alguma.

Primeiramente, agradeço ao professor Kleber, por todo o valioso processo de orientação e por toda a disponibilidade e flexibilidade desde o início de meu mestrado. Agradeço igualmente ao professor Victor, por todo o conhecimento e direcionamento passado em relação ao estudo do problema de dimensionamento de lotes. Sem dúvida, sem o direcionamento e a experiência desses dois pesquisadores, não seria possível o desenvolvimento desse trabalho.

Agradeço ainda ao professor Alysson, pela disciplina de Programação Inteira que ministrou – fundamental a meu desenvolvimento nesse mestrado, à professora Franklina por iniciar a parceria de trabalho estabelecida junto ao professor Victor e ao professor Walther pelas importantes críticas e sugestões passadas no exame de qualificação.

Por fim, não somente dedico esse trabalho a ela, mas também agradeço à minha família pelo apoio constante e fundamental.

“Não existem métodos fáceis para resolver problemas difíceis.”

René Descartes

RESUMO

FACHINI, R.F. **Métodos quantitativos para o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes na indústria de embalagens de vidro.** 2015. 229f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

O problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes vem sendo extensivamente estudado por pesquisadores da área de Pesquisa Operacional e há uma tendência de que tais trabalhos passem a cada vez mais integrar aspectos reais dos processos produtivos. Entretanto, percebe-se que os estudos conduzidos em alguns setores industriais negligenciam importantes restrições tecnológicos dos processos de produção e isso afasta esses trabalhos de Pesquisa Operacional de uma aplicação efetiva, como é o caso da indústria de embalagens de vidro. Neste contexto, propõe-se um modelo de programação inteira mista e um método de solução para o problema de dimensionamento e sequenciamentos de lotes na indústria de embalagens de vidro, sendo que este trabalho diferencia-se dos demais existentes na literatura por agregar restrições tecnológicas específicas desse processo produtivo. O modelo proposto, denominado CLSD-GCST, foi amplamente validado com base em um conjunto de testes com 40 instâncias de um problema real de uma grande empresa do setor no pacote comercial IBM ILOG CPLEX Optimization Studio Versão 12.5. A validação do modelo incluiu ainda uma análise de ganhos potenciais para o negócio de baseada no modelo SCOR. Já o método de solução proposto consiste em uma metaheurística de Busca em Vizinhança Variável (VNS) e se mostrou promissor para a solução do problema estudado, proporcionando resultados de qualidade em um baixo tempo computacional. Além disso, o VNS superou o *Branch-and-Cut* do CPLEX para grandes instâncias, nas quais o pacote comercial encontrou dificuldades. Por fim, o VNS proposto também foi validado por meio da análise de testes computacionais e suas principais características foram avaliadas sistematicamente, gerando um conjunto de informações que pode direcionar a utilização e, até mesmo, a evolução desse método em pesquisas futuras.

Palavras-Chave: programação inteira mista, dimensionamento e sequenciamento de lotes, metaheurística, VNS, SCOR, indústria de embalagens de vidro.

ABSTRACT

FACHINI, R.F. **Quantitative methods for lot sizing and scheduling in glass containers industry.** 2015. 229f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

Lot sizing and scheduling problem has been extensively studied by Operations Research scientists and there is a tendency of incorporating more production processes real aspects in these researches. However, it can be noticed that studies conducted in some industrial sectors neglect important production process technological constraints and it keeps the Operations Research works away from an effective application, as happens with the glass containers industry. In this context, a mixed integer programming model and a solution method were proposed for glass containers industry lot sizing and scheduling problem, the main difference between this work and the others in literature is the inclusion of process specific technological constraints. The proposed model, named CLSD-GCST, was widely validated by a set of tests performed with 40 instances from a large company real problem using the commercial package IBM ILOG CPLEX Optimization Studio Version 12.5. The model validation also included a potential business earnings analysis based on SCOR framework. About the proposed solution method, it consists of a Variable Neighborhood Search (VNS) metaheuristic and it proved to be promising for the studied problem solution, providing good quality results in low computational time. Moreover, VNS overcame the CPLEX Branch-and-Cut for large instances, in which the commercial package found difficulties. Lastly, the proposed VNS was validated by means of computational tests analysis and its main characteristics were systematically evaluated, generating an information set that may direct this method application and even its evolution in future researches.

Keywords: mixed integer programming, lot sizing and scheduling, metaheuristic, VNS, SCOR, glass containers industry.

LISTA DE ALGORITMOS

Algoritmo 1 – Estrutura Geral de um VNS.....68

Algoritmo 2 – Heurística Construtiva Proposta.....101

Algoritmo 3 – VNS Proposto.....102

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estruturação da validação de competência com base no SCOR	40
Figura 2 – Exemplo de um α -subtour	53
Figura 3 – Processos gerais do SCOR em diferentes níveis da cadeia de suprimentos....	58
Figura 4 – Padrão de nomenclatura dos processos do modelo SCOR.....	60
Figura 5 – Aplicação do SCOR como modelo de referência para a melhoria de processos.....	61
Figura 6 – Padrão de nomenclatura das métricas do modelo SCOR	62
Figura 7 – Princípio da Busca em Vizinhança Variável ilustrada para um problema de minimização	69
Figura 8 – Modelagem quantitativa em Pesquisa Operacional.....	72
Figura 9 – Tetraedro de validação de problemas de Pesquisa Operacional.....	74
Figura 10 – Etapas do trabalho de pesquisa	79
Figura 11 – Visão geral do processo de fabricação de embalagens de vidro	83
Figura 12 – Formação da gota na fabricação de embalagens de vidro	84
Figura 13 – Processos de conformação para fabricação de embalagens de vidro.....	86
Figura 14 – <i>Parison</i> obtido por processo de conformação Prensado-Soprado	87

Figura 15 – Operação de extração em processo de produção Prensado-Soprado	88
Figura 16 – <i>Layout</i> do processo de fabricação de embalagens de vidro.....	89
Figura 17 – Ilustração do modelo conceitual definido para o problema de pesquisa.....	93
Figura 18 – Exemplo da codificação adotada no método de solução	99
Figura 19 – Exemplo da estrutura de vizinhança <i>Transpose</i>	103
Figura 20 – Exemplo da estrutura de vizinhança <i>Modified Transpose</i>	103
Figura 21 – Exemplo da estrutura de vizinhança <i>Hybrid Swap</i>	104
Figura 22 – Exemplo da estrutura de vizinhança <i>Modified Hybrid Swap</i>	105
Figura 23 – Exemplo da estrutura de vizinhança <i>Aleatory Campaign Insert</i>	105
Figura 24 – Exemplo da estrutura de vizinhança <i>Aleatory Campaign Exchange</i>	106
Figura 25 – Exemplo da estrutura de vizinhança <i>Campaign Size Increase</i>	107
Figura 26 – Exemplo da estrutura de vizinhança <i>Campaign Size Decrease</i>	107
Figura 27 – Exemplo da estrutura de vizinhança <i>Campaign Exclusion</i>	108
Figura 28 – Estratégia de validação do modelo proposto.....	118
Figura 29 – Validação de competência baseada no modelo SCOR	122
Figura 30 – Gráficos comparativos dos custos que compõem o valor da função objetivo para as soluções obtidas via CPLEX e pelos programadores da produção da empresa	124

Figura 31 – Comparação entre as soluções obtidas via CPLEX e via VNS	134
Figura 32 – Comparação entre as soluções obtidas via CPLEX e via VNS para as instâncias trimestrais.....	138
Figura 33 – Questionário para validações da legitimidade e conceitual do modelo proposto.....	189
Figura 34 – Questionário para validação operacional do modelo proposto	193
Figura 35 – Representação gráfica de diferentes planos de produção	210
Figura 36 – Representação gráfica de estruturas de produto	215
Figura 37 – Representação esquemática de uma rede ML-D.....	218
Figura 38 – Respostas do questionário para validações da legitimidade e conceitual aplicado ao chefe de produção.....	221
Figura 39 – Respostas do questionário para validações da legitimidade e conceitual aplicado ao programador da produção	224
Figura 40 – Respostas do questionário para validação operacional aplicado ao programador de produção	227

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comparação das funções objetivo para as soluções obtidas via CPLEX e pelos programadores da produção da empresa.....	123
Gráfico 2 – Análise de impacto do uso do CLSD-GCST nos processos do modelo SCOR.....	129
Gráfico 3 – Análise de impacto do uso do CLSD-GCST nos atributos de <i>performance</i> do modelo SCOR.....	131
Gráfico 4 – Comparação das funções objetivo para as soluções obtidas via CPLEX, VNS e pelos programadores da produção da empresa	133
Gráfico 5 – Comportamento em números absolutos das estruturas de vizinhança do VNS na solução das 40 instâncias estudadas.....	142
Gráfico 6 – Taxa de eficiência das estruturas de vizinhança para os diferentes tamanhos de instâncias	145
Gráfico 7 – Distribuição da capacidade de produção da fábrica estudada por tipo de mercado	162
Gráfico 8 – Sazonalidade dos pedidos de embalagens de cerveja para a empresa estudada	162

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Panorama geral da literatura de dimensionamento de lotes e planejamento da produção	42
Quadro 2 – Atributos de <i>performance</i> e métricas do Nível 1 correlatas.....	62
Quadro 3 – Correlação entre facetas do tetraedro e práticas de validação em Pesquisa Operacional	77
Quadro 4 – Solução de instâncias do CLSD-GCST no CPLEX.....	110
Quadro 5 – Solução de instâncias do CLSD-GCST via VNS proposto	111
Quadro 6 – Solução das instâncias estendidas do CLSD-GCST no CPLEX	113
Quadro 7 – Solução das instâncias estendidas do CLSD-GCST via VNS proposto.....	114
Quadro 8 – Valores para os planos reais executados nos períodos correspondentes às instâncias testadas	114
Quadro 9 – Comparação entre a qualidade da solução inicial obtida via heurística construtiva e da solução final obtida pelo VNS	139
Quadro 10 – Análise estatística dos dados do Quadro 9	140
Quadro 11 – Eficiência global das diferentes estruturas de vizinhança.....	143
Quadro 12 – Eficiência das estruturas de vizinhança para os diferentes tamanhos de instâncias	144

Quadro 13 – Convergência do vns para os diferentes tamanhos de instâncias.....	145
Quadro 14 – Dados básicos do problema.....	164
Quadro 15 – Taxas de extração e produção das máquinas para os diferentes artigos.....	165
Quadro 16 – Tempos de troca mecânica (T1) para a máquina 1	166
Quadro 17 – Tempos de troca mecânica (T1) para a máquina 2	167
Quadro 18 – Tempos de troca mecânica (T1) para a máquina 3	168
Quadro 19 – Tempos de <i>ramp-up</i> (T2) para a máquina 1	169
Quadro 20 – Tempos de <i>ramp-up</i> (T2) para a máquina 2	170
Quadro 21 – Tempos de <i>ramp-up</i> (T2) para a máquina 3	171
Quadro 22 – Configuração inicial das máquinas de janeiro a dezembro	172
Quadro 23 – Níveis de estoque iniciais da fábrica de janeiro a dezembro	173
Quadro 24 – Demanda de janeiro a dezembro do ano selecionado.....	177
Quadro 25 – Classificação dos problemas de <i>Lot Sizing</i> de acordo com Pochet e Wolsey (2006).....	197

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AG** – atributo de *performance* de Agilidade da Cadeia de Suprimentos ou *Agility* no modelo SCOR;
- AG.1.1** – métrica de *Upside Supply Chain Flexibility* no modelo SCOR;
- AG.1.2** – métrica de *Upside Supply Chain Adaptability* no modelo SCOR;
- AG.1.3** – métrica de *Downside Supply Chain Adaptability* no modelo SCOR;
- AM** – atributo de *performance* de Gestão de Ativos da Cadeia de Suprimentos ou *Asset Management* no modelo SCOR;
- AM.1.1** – métrica de *Cash-to-Cash Cycle Time* no modelo SCOR;
- AM.1.2** – métrica de *Return on Supply Chain Fixed Assets* no modelo SCOR;
- AM.1.3** – métrica de *Return on Working Capital* no modelo SCOR;
- AM.3.9** – métrica de *Capacity Utilization* no modelo SCOR;
- B** – indica que o problema de dimensionamento inclui *backlogging*;
- BB** – processo de fabricação de embalagens de vidro Soprado-Soprado, do inglês *Blow-Blow*;
- BOM** – *Bill of Materials*;
- BPM** – *Business Process Management*;
- C** – indica que o problema de dimensionamento inclui restrições de capacidade produtiva;
- CAP** – indica um dos campos do esquema geral de classificação dos problemas de dimensionamento de lotes e representa a classificação do problema quanto suas restrições de capacidade;
- CC** – indica que o problema de dimensionamento inclui restrições de capacidade produtiva constante;
- CLSD** – *Capacitated Lot Sizing Problem with Sequence Dependent Setups*;
- CLSD-GCST** – *Capacitated Lot Sizing and Scheduling Problem for Glass Containers Short Term Planning*;
- CLSD-PM** – *Capacitated Lot Sizing Problem with Sequence Dependent Setups for Parallel Machines*;
- CLSP** – *Capacitated Lot Sizing Problem*;
- CO** – atributo de *performance* de Custos da Cadeia de Suprimentos ou *Cost* no modelo SCOR;
- CO.1.1** – métrica de *Supply Chain Management Cost* do modelo SCOR;
- CO.1.2** – métrica de *Cost of Goods Sold* no modelo SCOR;
- CO.3.108** – métrica de *Cost to Plan Supply Chain* no modelo SCOR;

CO.3.120 – métrica de *Reserve Cost to Reserve Resources and Determine Delivery Date* no modelo SCOR;

CO.3.127 – métrica de *Cost to Schedule Production Activities* no modelo SCOR;

CO.3.147 – métrica de *Environmental Compliance Cost* no modelo SCOR;

CO.3.167 – métrica de *Peak Time Energy Use* no modelo SCOR;

CSLP – *Continuous Setup Lot Sizing Problem*;

DLS – *Discrete Lot Sizing Problem*;

DLSI – *Discrete Lot Sizing with Variable Initial Stock Problem*;

DLSP – *Discrete Lot Sizing and Scheduling Problem*;

DR1 – categoria de processos de Retorno da entrega de produtos defeituosos no modelo SCOR;

DR2 – categoria de processos de Retorno da entrega de produtos para manutenção, reparo ou inspeção no modelo SCOR;

DR3 – categoria de processos de Retorno da entrega de produtos excedentes no modelo SCOR;

D1 – categoria de processos de Entrega de produtos *Make-to-Stock* no modelo SCOR;

D1.6 – processo de Definição de Rotas de Entrega de produtos *Make-to-Stock* no modelo SCOR;

D2 – categoria de processos de Entrega de produtos *Make-to-Order* no modelo SCOR;

D2.3 – processo de Reserva de Inventário e de Determinação das Datas de Entrega no modelo SCOR;

D2.6 – processo de Definição de Rotas de Entrega de produtos *Make-to-Order* no modelo SCOR;

D3 – categoria de processos de Entrega de produtos *Engineer-to-Order* no modelo SCOR;

D3.6 – processo de Definição de Rotas de Entrega de produtos *Engineer-to-Order* no modelo SCOR;

D4 – categoria de processos de Entrega de produtos em varejo no modelo SCOR;

ED – categoria de processos de *Enable Deliver* no modelo SCOR;

ELSP – *Economic Lot Scheduling Problem*;

EM – categoria de processos de *Enable Make* no modelo SCOR;

EP – categoria de processos de *Enable Plan* no modelo SCOR;

ER – categoria de processos de *Enable Return* no modelo SCOR;

ERP – *Enterprise Resource Planning*;

ES – categoria de processos de *Enable Source* no modelo SCOR;

FAM – indica que o problema de dimensionamento de lotes multi-item considera *setups* entre diferentes famílias de produtos;

GLSP – *General Lot Sizing and Scheduling Problem*;

IS – *Individual Section*, termo utilizado para denominação das máquinas de conformação de embalagens de vidro;

LB – indica que o problema de dimensionamento possui um limitante inferior para o nível de produção;

LS – *Lot Sizing Problem*;

M_k – indica problema de dimensionamento multi-item com uma limitação de *k setups* por período;

ML-A – problema de dimensionamento de lotes multiestágio com estrutura de montagem;

ML-D – problema de dimensionamento de lotes multiestágio de distribuição;

ML-G – problema de dimensionamento de lotes multiestágio geral;

ML-S – problema de dimensionamento de lotes multiestágio em série;

MPCS – *Manufacturing Planning and Control Systems*

MPS – *Master Production Schedule*;

MRP – *Material Requirements Planning*;

M₁ – indica problema de dimensionamento multi-item com uma limitação de um *setup* por período;

M1 – categoria de processos de Produção *Make-to-Stock* no modelo SCOR;

M1.1 – processo de Planejamento das Atividades da Produção *Make-to-Stock* no modelo SCOR;

M2 – categoria de processos de Produção *Make-to-Order* no modelo SCOR;

M2.1 – processo de Planejamento das Atividades da Produção *Make-to-Order* no modelo SCOR;

M3 – categoria de processos de Produção *Engineer-to-Order* no modelo SCOR;

M3.2 – processo de Planejamento das Atividades da Produção *Engineer-to-Order* no modelo SCOR;

NIS – termo utilizado para denominação das máquinas de conformação de embalagens de vidro servo-eletrônicas;

OW – termo utilizado para embalagens de vidro não retornáveis, do inglês *One Way*;

PB – processo de fabricação de embalagens de vidro Prensado-Soprado, do inglês *Press-Blow*;

PC – problema de dimensionamento de lotes multi-item com restrições de capacidade;

PCP – Planejamento e Controle da Produção;

PC-U - problema de dimensionamento de lotes multi-item sem restrições de capacidade;

PM – indica um dos campos do esquema geral de classificação dos problemas de dimensionamento de lotes multi-item e representa a classificação do problema quanto ao seu modo de produção;

PO – Pesquisa Operacional;

PQ – indica um dos campos do esquema geral de classificação dos problemas de dimensionamento de lotes multi-item e representa a classificação do problema quanto à quantidade de produção considerada;

PROB – indica um dos campos do esquema geral de classificação dos problemas de dimensionamento de lotes e representa a classificação do problema quanto à versão do seu modelo;

PLSP – *Proportional Lot Sizing and Scheduling Problem*;

P1 – categoria de processos de Planejamento da Cadeia de Suprimentos no modelo SCOR;

P2 – categoria de processos de Planejamento do abastecimento (P2) no modelo SCOR;

P3 – categoria de processo de Planejamento da produção no modelo SCOR;

P4 – categoria de processos de Planejamento da entrega no modelo SCOR;

P5 – categoria de processos de Planejamento do retorno dos produtos no modelo SCOR;

RL – atributo de *performance* de Confiabilidade da Cadeia de Suprimentos ou *Reliability* no modelo SCOR;

RL.1.1 – métrica de *Perfect Order Fulfillment* no modelo SCOR;

RL.2.1 – métrica de *Percentage of Orders Delivered in Full* no modelo SCOR;

RL.2.2 – métrica de *Delivery performance to Costumer Commit Date* no modelo SCOR;

RL.3.123 – métrica de *Schedule Production Activities Cycle Time* no modelo SCOR;

RL.3.49 – métrica de *Schedule Achievement* no modelo SCOR;

RS – atributo de *performance* de Tempo de Resposta da Cadeia de Suprimentos ou *Responsiveness* no modelo SCOR;

RS.1.1 – métrica de *Order Fulfillment Cycle Time* no modelo SCOR;

RS.3.116 – métrica de *Reserve Resources and Determine Delivery Date Cycle Time* no modelo SCOR;

RS.3.94 – métrica de *Order Fulfillment Dwell Time* no modelo SCOR;

RS.3.98 – métrica de *Plan Cycle Time* no modelo SCOR;

SAD – Sistema de Apoio à Decisão;

SC – indica que o problema de dimensionamento considera custos de *start-up*;

SCM – *Supply Chain Management*;

S&OP – *Sales and Operations Planning*;

SL – indica que o problema de dimensionamento contempla a possibilidade de perda de vendas;

SMD – Sistema de Medição de Desempenho;

SQ – indica que o problema de dimensionamento multi-item considera perdas de *setup* dependentes do sequenciamento de produção;

SS – indica que o problema de dimensionamento contempla estoques de segurança;

SCOR – *Supply Chain Operations Reference Model*;

ST – indica que o problema de dimensionamento considera custos e perda de capacidade produtiva por *start-up*;

SU – indica que o problema de dimensionamento considera custos e perda de capacidade produtiva por *setup*;

S1 – categoria de processos de Abastecimento de produtos *Engineer-to-Order* no modelo SCOR;

S2 – categoria de processos de Abastecimento de produtos *Make-to-Order* no modelo SCOR;

S3 – categoria de processos de Abastecimento de produtos *Make-to-Stock* no modelo SCOR;

SR1 – categoria de processos de Retorno do abastecimento de produtos defeituosos no modelo SCOR;

SR2 – categoria de processos de Retorno do abastecimento de produtos excedentes no modelo SCOR;

SR2 – categoria de processos de Retorno do abastecimento de produtos para manutenção, reparo ou inspeção no modelo SCOR;

TIC – Tecnologia da Informação e Comunicação;

T1 – tempo de troca mecânica de um *setup* na indústria de embalagens de vidro;

T2 – tempo de *ramp-up* da linha de produção após um *setup* na indústria de embalagens de vidro;

U – indica que o problema de dimensionamento de lotes não possui restrições de capacidade produtiva;

VNS – *Variable Neighborhood Search* ou Busca em Vizinhança Variável;

WIP – *Work in Process*;

WW – *Wagner-Whitin Problem*.

SUMÁRIO

1	<u>INTRODUÇÃO</u>	35
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	36
1.2	PROBLEMA E OBJETIVOS DE PESQUISA	37
1.3	JUSTIFICATIVA	38
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	40
2	<u>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u>	41
2.1	O PROBLEMA DE DIMENSIONAMENTO DE LOTES	41
2.2	O MODELO SCOR	58
2.3	HEURÍSTICAS PARA A SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE DIMENSIONAMENTO DE LOTES	66
3	<u>MÉTODO DE PESQUISA</u>	71
3.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	71
3.2	ETAPAS DA PESQUISA	72
3.2.1	ETAPAS GERAIS DA MODELAGEM QUANTITATIVA	72
3.2.1.1	Definição do problema	73
3.2.1.2	Construção do modelo	73
3.2.1.3	Solução do modelo	73
3.2.1.4	Validação do modelo	74
3.2.1.5	Implementação da solução	78
3.2.2	ETAPAS ESPECÍFICAS DA PESQUISA	78
4	<u>A INDÚSTRIA DE EMBALAGENS DE VIDRO</u>	83

5	<u>O MODELO PROPOSTO</u>	91
5.1	DEFINIÇÃO DO MODELO CONCEITUAL	91
5.2	O MODELO DE DIMENSIONAMENTO DE LOTES PROPOSTO: CLSD-GCST (CAPACITATED LOT SIZING AND SCHEDULING PROBLEM FOR GLASS CONTAINERS SHORT TERM PLANNING)	93
6	<u>O MÉTODO DE SOLUÇÃO</u>	99
7	<u>TESTES COMPUTACIONAIS</u>	109
8	<u>VALIDAÇÃO</u>	117
8.1	VALIDAÇÃO DO MODELO CLSD-GCST	117
8.1.1	VALIDAÇÃO DA FORMULAÇÃO	119
8.1.2	VALIDAÇÃO DA LEGITIMIDADE	119
8.1.3	VALIDAÇÃO CONCEITUAL	121
8.1.4	VALIDAÇÃO DA COMPETÊNCIA (BASEADA NO MODELO SCOR)	121
8.1.5	VALIDAÇÃO OPERACIONAL	131
8.1.6	VALIDAÇÃO DE DADOS	132
8.2	VALIDAÇÃO DO VNS	133
9	<u>CONCLUSÕES</u>	147
	REFERÊNCIAS	149
	<u>APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DA INDÚSTRIA ESTUDADA E INSTÂNCIAS</u>	161

<u>APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO APLICADO AO CHEFE DE PRODUÇÃO E AO PROGRAMADOR DA PRODUÇÃO PARA AS VALIDAÇÕES DA LEGITIMIDADE E CONCEITUAL DO MODELO PROPOSTO</u>	189
---	-----

<u>APÊNDICE C – QUESTIONÁRIO APLICADO AO PROGRAMADOR DA PRODUÇÃO PARA A VALIDAÇÃO OPERACIONAL DO MODELO PROPOSTO</u>	193
---	-----

<u>ANEXO A – CLASSIFICAÇÃO DE POCHET E WOLSEY (2006) PARA OS PROBLEMAS DE DIMENSIONAMENTO DE LOTES</u>	197
---	-----

A.1 PROBLEMAS DE DIMENSIONAMENTO DE LOTES PARA ÚNICO ITEM (<i>SINGLE-ITEM PROBLEMS</i>)	198
A.1.1 MODELO LS-C	201
A.1.2 MODELO WW-C.....	202
A.1.3 MODELO DLSI-C	202
A.1.4 MODELO DLS-C.....	203
A.1.5 MODELOS PROB-CAP-B	204
A.1.6 MODELOS PROB-CAP-SC	205
A.1.7 MODELOS PROB-CAP-ST	206
A.1.8 MODELOS PROB-CAP-LB	207
A.1.9 MODELOS PROB-CAP-SL	207
A.1.10 MODELOS PROB-CAP-SS.....	208
A.2 PROBLEMAS DE DIMENSIONAMENTO DE LOTES PARA VÁRIOS ITENS (<i>MULTI-ITEM SINGLE-LEVEL PROBLEMS</i>)	208
A.2.1 MODELO LS-C-B/M ₁	211
A.2.2 MODELO LS-C-B/M ₁ -SC	212
A.2.3 MODELO LS-C-B/M ₁ -SQ	213
A.2.4 MODELO LS-C-B/M _k	213
A.2.5 MODELO LS-C, PC-FAM.....	214
A.3 PROBLEMAS DE DIMENSIONAMENTO DE LOTES MULTISTÁGIO (<i>MULTI-LEVEL PROBLEMS</i>)	214
A.3.1 MODELO ML-S/LS-C	216

A.3.2 MODELO ML-A/LS-C.....	217
A.3.3 MODELO ML-G/LS-C.....	217
A.3.4 MODELO ML-D/LS-C.....	218

<u>ANEXO B – RESPOSTAS DO QUESTIONÁRIO APLICADO AO CHEFE DE PRODUÇÃO E AO PROGRAMADOR DA PRODUÇÃO PARA AS VALIDAÇÕES DA LEGITIMIDADE E CONCEITUAL DO MODELO PROPOSTO.....</u>	221
--	------------

<u>ANEXO C – RESPOSTAS DO QUESTIONÁRIO APLICADO AO PROGRAMADOR DA PRODUÇÃO PARA A VALIDAÇÃO OPERACIONAL DO MODELO PROPOSTO.....</u>	227
--	------------

1 INTRODUÇÃO

Em um mercado global crescentemente competitivo, o Planejamento e Controle da Produção (PCP) passa a ser de suma importância na obtenção de bons resultados pela atividade industrial. Trata-se de um processo que visa ao planejamento do uso dos recursos no atendimento das metas de produção em um determinado período de tempo, denominado horizonte de planejamento (KARIMI; GHOMI; WILSON, 2003).

Tipicamente, tal processo envolve três níveis de decisão: as definições de longo, médio e curto prazo. A primeira tem seu foco em antecipar necessidades do planejamento agregado, abrangendo definições estratégicas tais como escolha do portfólio de produtos, dos equipamentos, dos processos produtivos e da localização de facilidades. Já o planejamento de médio prazo envolve decisões relacionadas ao Planejamento dos Recursos da Manufatura (MRP – *Manufacturing Resource Planning*) e ao dimensionamento de lotes. Por fim, o curto prazo do PCP está mais intrinsecamente relacionado ao plano e sequenciamento diário das atividades produtivas no chão de fábrica, bem como a seu controle (KARIMI; GHOMI; WILSON, 2003).

Usualmente, a gestão do PCP é suportada pelo uso de sistemas computacionais também conhecidos como *Manufacturing Planning and Control Systems* (MPCS) que englobam o planejamento e controle da manufatura sob um aspecto bastante amplo, envolvendo materiais, máquinas, pessoas e fornecedores. Vollmann, Berry e Whybark (1997) listam as atividades de gestão do PCP suportadas por tais sistemas:

- a) planejamento dos requisitos de capacidade e da disponibilidade para o atendimento das necessidades de mercado;
- b) planejamento de materiais, para que esses sejam recebidos em um prazo satisfatório e nas quantidades necessárias para o processo produtivo;
- c) utilização apropriada dos ativos da empresa;
- d) manutenção de níveis apropriados de estoques de matérias-primas, materiais semi-acabados (*Work in Process* – WIP) e produtos finais;
- e) agendamento e sequenciamento da produção;
- f) alocação de materiais, pessoas, pedidos de clientes, equipamentos e, eventualmente, outros recursos da fábrica;
- g) comunicação com fornecedores e consumidores, possibilitando, inclusive, o estabelecimento de relações comerciais de longo prazo;

- h) identificação dos requisitos dos clientes;
- i) resposta rápida a eventuais erros no planejamento ou a problemas inesperados;
- j) disponibilização de informações sobre implicações técnicas e financeiras das atividades de manufatura.

Vollmann, Berry e Whybark (1997) mencionam a tendência de que os MPCs evoluam com uma crescente aplicação de métodos quantitativos e algoritmos de programação matemática, tornando-se cada vez mais capazes de fornecerem soluções assertivas aos tomadores de decisão. Entre tais ferramentas, os autores atribuem a técnicas baseadas em programação inteira um considerável destaque.

Aproximadamente uma década após o trabalho de Vollmann, Berry e Whybark (1997), os autores Corrêa, Giansi e Caon (2008) confirmam essa tendência prevista citando sistemas MPCs matemáticos otimizantes e heurísticos como alguns dos mais difundidos no mercado.

Nesse contexto, a programação inteira e, conseqüentemente, a Pesquisa Operacional (PO) ganham bastante importância no cenário da gestão do PCP e tal cenário subsidia a contextualização deste trabalho.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Ao se analisar a interface da gestão do PCP com a PO, evidencia-se que o problema de dimensionamento de lotes (*Lot Sizing Problem*) é um dos problemas clássicos mais estudados e explorados por pesquisadores da área. Esse problema consiste na definição de ordens de produção, ou lotes, que satisfaçam a demanda dos clientes com determinado objetivo, por exemplo, custo mínimo. Trata-se da base das decisões da esfera de médio prazo do PCP, abordando questões do planejamento tático (ALMADA-LOBO, 2007).

No desenvolvimento desses estudos, a comunidade científica tem incorporado crescentemente as decisões de sequenciamento das atividades de produção nos modelos de dimensionamento de lotes, o que faz com que tais modelos passem a abranger também as decisões de curto prazo do planejamento da produção, de caráter mais operacional. Esse fato tem tornado o planejamento da produção um trabalho mais sofisticado e mais apto a melhorar a flexibilidade da área produtiva (CAMARGO; TOLEDO; ALMADA-LOBO, 2012). Além disso, vale ressaltar que, na maioria das vezes, resolver o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes via programação matemática, implica em se trabalhar com

programação inteira mista, como evidenciam Karimi-Nasab e Seyedhoseini (2013) ao analisarem um amplo levantamento bibliográfico realizado sobre o tema.

Clark, Almada-Lobo e Almeder (2011) analisam o panorama de pesquisa relativo ao dimensionamento de lotes, reforçando a ideia anteriormente apresentada de que há uma tendência no estudo de integrá-lo a diferentes problemas e, além disso, afirmam que os pesquisadores e profissionais da área têm, cada vez mais, buscado incorporar aspectos reais dos processos produtivos em seus modelos. Entretanto, no mesmo editorial, os pesquisadores apontam a carência de estudos que utilizem instâncias reais para testes computacionais, o que, de modo geral, empobrece os trabalhos de PO aplicados ao PCP e, de certa forma, mitiga a possibilidade de que pesquisadores se aprofundem nas especificidades dos processos produtivos, propondo novas restrições tecnológicas aos modelos existentes.

A indústria de embalagens de vidro é um setor em que algumas restrições tecnológicas têm sido negligenciadas na modelagem de seu processo produtivo, mesmo sendo definida por pesquisadores da área como uma operação extremamente exigente que requer tecnologia e *know how* para precisão no ajuste de uma grande gama de parâmetros para que se obtenha um produto competitivo no mercado (KOVACEC; PILIPOVIC; STEFANIC, 2010).

Frente a tal contextualização, são apresentados a seguir o problema e objetivos da pesquisa.

1.2 PROBLEMA E OBJETIVOS DE PESQUISA

Com base na contextualização apresentada, levanta-se o seguinte problema de pesquisa: “Como resolver o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes no planejamento operacional de uma indústria de embalagens de vidro, levando-se em conta especificidades e aspectos técnicos desse processo produtivo? ”

Nesse sentido, o objetivo principal desta pesquisa é apresentar um modelo matemático determinístico de programação inteira mista como proposta à solução do problema de dimensionamento de lotes na indústria de embalagens de vidro. Esse objetivo principal se apoia no alcance dos seguintes objetivos específicos:

- a) propor um modelo matemático que represente com eficácia os aspectos técnicos da produção de embalagens de vidro;

- b) testar o modelo em um *solver* de programação inteira com instâncias reais de uma empresa do setor que reúna as características necessárias para embasar um processo de validação;
- c) validar o modelo proposto junto à área de gestão industrial da empresa estudada;
- d) realizar uma validação específica de competência do modelo sob a perspectiva de ganhos para o negócio com base no modelo SCOR (*Supply Chain Operations Reference Model*);
- e) propor um método de solução heurístico para o problema;
- f) validar o método de solução heurístico proposto.

O alcance dos objetivos traçados para este trabalho resultará em ganhos interessantes a diferentes aspectos, apresentados a seguir na justificativa da pesquisa.

1.3 JUSTIFICATIVA

Poucos são os trabalhos que estudam o dimensionamento e sequenciamento de lotes na indústria vidreira, com destaque para:

- a) Almada-Lobo (2007) e Almada-Lobo, Oliveira e Carravilla (2008) abordam o planejamento das campanhas de diferentes fornos (cores de vidro que os fornos irão produzir ao longo de diferentes meses do ano) de modo muito preciso na proposição de um modelo de planejamento de longo prazo e de um método de resolução para o problema;
- b) Almada-Lobo (2007) e Toledo *et al.* (2013) entram em detalhes de uma análise de planejamento de curto prazo para um determinado forno, porém não consideram algumas especificidades do processo inerentes ao *setup* dependente da sequência que podem fazer com que o sequenciamento da produção impacte diretamente na eficiência industrial;
- c) Richard e Proust (2000) analisam esse problema de planejamento sob um prisma mais financeiro, considerando, inclusive, uma margem de retorno por produto;
- d) T'kindt, Billaut e Proust (2001) abordam o planejamento da ocupação da capacidade do forno em termos financeiros, inclusive penalizando soluções obtidas que permitem a ociosidade das linhas.

De forma geral, percebe-se que alguns desses trabalhos abordam o problema de planejamento da produção em indústrias de embalagens de vidro no médio prazo, ou âmbito tático, modelando decisões como distribuição de cores de vidro e da carga de trabalho por fábrica, e alguns focam estritamente o planejamento de curto prazo, ou operacional, contemplando o sequenciamento da produção em diferentes linhas.

Contudo, mesmo estes trabalhos que têm seu foco sobre o âmbito operacional da produção de embalagens de vidro abordam o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes sob um foco financeiro, desconsiderando aspectos técnicos muito particulares desse tipo de indústria. Percebe-se, então, uma lacuna no que tange ao desenvolvimento de um modelo matemático focado no planejamento operacional que contemple tais especificidades da indústria de embalagens de vidro, com um considerável potencial para o desenvolvimento de estudos correlatos.

Este trabalho visa a preencher essa lacuna com a proposição de um modelo matemático baseado em programação inteira mista e uma metaheurística para resolução do mesmo que dispense pacotes comerciais de otimização. Além disso, como se evidencia nos objetivos específicos, há uma preocupação em se validar o modelo proposto tanto para confirmação do valor das novas restrições tecnológicas propostas quanto para uma análise de impacto para o negócio (em caso de aplicação do modelo aliado a um método de solução) norteada por métricas e processos destacados no modelo SCOR.

A escolha do SCOR para embasar essa análise de caráter mais gerencial, ocorreu pelo fato do mesmo consistir em um modelo de referência bastante completo para a gestão da cadeia de suprimentos (SCM – *Supply Chain Management*), com uma abrangência bastante ampla dos processos de negócios, métricas e boas práticas envolvidas.

Com o SCOR, foi possível identificar as boas práticas de SCM relacionadas ao uso de ferramentas suportadas por modelagem quantitativa para otimizar os resultados no dimensionamento e sequenciamento de lotes. A partir de tais boas práticas, tornou-se possível mapear em quais processos de negócio há possibilidade de ganhos com uso de tais ferramentas e, conseqüentemente, com a aplicação da abordagem proposta neste trabalho. Logo, é possível estudar um problema real de aplicação do modelo proposto e avaliar o impacto da solução obtida em cada um dos processos de negócio mapeados por meio das métricas que o SCOR associa aos mesmos. Além disso, essas métricas encontram-se agrupadas segundo alguns atributos de *performance*, o que possibilita um eixo adicional de análise. A Figura 1 ilustra essa estrutura lógica que se construiu com base no SCOR para a validação de competência do modelo proposto, em termos de impacto das soluções nos resultados do negócio.

Figura 1 – Estruturação da validação de competência com base no SCOR
Fonte: Autoria própria

A seguir, é descrita a estrutura geral do trabalho.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Neste capítulo, foi apresentado o contexto geral que envolve este trabalho, bem como o problema de pesquisa que o origina, seus objetivos e a justificativa que lhe dá subsídio. Na sequência, como forma de embasar o trabalho, o Capítulo 2 contém uma revisão bibliográfica que dividida nas seguintes seções secundárias: 2.1 O problema de dimensionamento de lotes, 2.2 O modelo SCOR e 2.3 Heurísticas para solução do problema de dimensionamento de lotes. No Capítulo 3, encontra-se o método de pesquisa. O Capítulo 4 contém um breve descritivo da indústria de embalagens de vidro. No Capítulo 5, é apresentado o modelo matemático proposto. O Capítulo 6 contempla o método de solução proposto. O Capítulo 7 contém os resultados dos testes computacionais realizados. No Capítulo 8, encontram-se a validação do modelo e do método de solução propostos. Por fim, o Capítulo 9 contempla as conclusões do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O PROBLEMA DE DIMENSIONAMENTO DE LOTES

O problema de dimensionamento de lotes (*Lot Sizing Problem*) visa à otimização do PCP permeando no âmbito do planejamento de médio prazo desse processo, além de apresentar interface com o planejamento de curto prazo quando combinado ao problema de sequenciamento da produção.

Conforme se mencionou na Seção 1.1, o problema de dimensionamento de lotes é um problema amplamente estudado com diversas abordagens já propostas. Karimi-Nasab e Seyedhoseini (2013) realizam um levantamento bibliográfico completo e atual sobre essas proposições de formulação para o problema de dimensionamento de lotes, classificando os diferentes modelos disponíveis na literatura segundo alguns critérios: número de produtos, número de estágios, preparação de máquina ou *setup*, horizonte de planejamento e definição de períodos (contínuos ou discretos), tipo de função objetivo e método de resolução. O Quadro 1 traz uma adaptação dessa compilação realizada por esses autores.

Trabalho	Número de produtos		Número de estágios		Setup		Horizonte		Tempo		Objetivo		Método de Solução
	Um	Múltiplos	Um	Múltiplos	Dependente da Sequência	Independente da Sequência	Finito	Infinito	Contínuo	Discreto	Redução de custo	Outras	
De Bodt <i>et al.</i> (1984)	✓		✓		✓		✓		✓		✓		---
Afentakis (1985)													
Ghosh e Gagnon (1989)													
Magnanti e Vachani (1990)	✓		✓		✓		✓		✓		✓		Branch and Cut
Potts e Van Wassenhove (1992)													
Uzsoy <i>et al.</i> (1992)													
Kim e Kim (1996)	✓		✓		✓		✓		✓		✓		Simulated Annealing + Genetic Algorithm
Franck <i>et al.</i> (1997)	✓		✓		✓		✓		✓		✓		---
Lam e Xing (1997)													
Lee <i>et al.</i> (1997)													
Ierapetritou e Floudas (1998)	✓		✓		✓		✓		✓		✓	✓	GAMS
Khouja <i>et al.</i> (1998)	✓		✓		✓		✓		✓		✓		Genetic Algorithm
Ozdamar e Birbil (1998)	✓		✓		✓		✓		✓		✓		Simulated Annealing + Tabu Search + Genetic Algorithm
Alidaee e Womer (1999)													
Cheng <i>et al.</i> (1999)													
Ierapetritou <i>et al.</i> (1999)	✓		✓		✓		✓		✓		✓	✓	GAMS
Jain e Meeran (1999)													
Bruggemann e Jahnke (2000)	✓		✓		✓		✓		✓		✓		Simulated Annealing
El-Hafsi (2000)	✓		✓		✓		✓		✓		✓		Heurística
Meyr (2000)	✓		✓		✓		✓		✓		✓		Tabu Search + Simulated Annealing
Schwindt e Trautmann (2000)	✓		✓		✓		✓		✓		✓	✓	Heurística
Oueniche e Bertre (2001)	✓		✓		✓		✓		✓		✓		Heurística
Oueniche e Boctor (2001)	✓		✓		✓		✓		✓		✓		Heurística
Sung e Min (2001)	✓		✓		✓		✓		✓		✓	✓	Heurística
Harjunkoski e Grossmann (2002)	✓		✓		✓		✓		✓		✓		ILOG

Quadro 1 – Panorama geral da literatura de dimensionamento de lotes e planejamento da produção (continua)

Trabalho	Número de produtos		Número de estágios		Setup		Horizonte		Tempo		Objetivo		Método de Solução
	Um	Múltiplos	Um	Múltiplos	Dependente da Sequência	Independente da Sequência	Finito	Infinito	Contínuo	Discreto	Redução de custo	Outros	
Nozick <i>et al.</i> (2002)	✓		✓			✓	✓	✓		✓	✓		Heurística
Karimi <i>et al.</i> (2003)							Revisão da literatura						
Floudas e Lin (2004)							Revisão da literatura						
Rocha <i>et al.</i> (2004)		✓	✓			✓		✓		✓		✓	Branch and Bound + Greedy Randomized Adaptive Search Procedure
Alvarez-Valdes <i>et al.</i> (2005)	✓			✓		✓	✓	✓		✓	✓	✓	Heurística
Stadtler (2005)	✓			✓		✓	✓	✓		✓	✓	✓	---
Stevenson <i>et al.</i> (2005)							Revisão da literatura						
Jodlbauer (2006)	✓		✓			✓	✓	✓		✓	✓	✓	Teoremas
Tavakkoli-Moghaddam <i>et al.</i> (2006)	✓		✓			✓	✓	✓		✓		✓	Branch and Bound
Torabi <i>et al.</i> (2006)	✓		✓			✓	✓	✓		✓	✓	✓	Genetic Algorithm
Zhu e Wilhelm (2006)							Revisão da literatura						
Chen e Ji (2007)	✓			✓		✓		✓		✓	✓	✓	CPLEX
Jans e Degraeve (2007)							Revisão da literatura						
Shabtay e Steiner (2007)							Revisão da literatura						
Tang e Liu (2007)	✓		✓			✓	✓	✓		✓		✓	Decomposição + Relaxação Langrangiana
Tasgetiren <i>et al.</i> (2007)	✓		✓			✓						✓	Particle Swarm Optimization + Variable Neighborhood Search
Xuan e Tang (2007)			✓			✓	✓	✓		✓		✓	Dynamic Programming
Chan <i>et al.</i> (2008)	✓		✓		✓			✓		✓		✓	Genetic Algorithm
Defersha e Chen (2008)	✓		✓		✓		✓	✓		✓		✓	Genetic Algorithm + Programação Linear

Quadro 1 – Panorama geral da literatura de dimensionamento de lotes e planejamento da produção (continuação)

Trabalho	Número de produtos			Número de estágios		Setup		Horizonte		Tempo		Objetivo		Método de Solução
	Um	Múltiplos	Um	Múltiplos		Dependente da Sequência	Independente da Sequência	Finito	Infinito	Contínuo	Discreto	Redução de custo	Outros	
Huang e Yao (2008)	✓	✓	✓	✓			✓		✓		✓	✓		Genetic Algorithm
Monkman et al. (2008)		✓		✓		✓		✓			✓	✓		Greedy Randomized Adaptive Search Procedure
Raza e Akgunduz (2008)	✓	✓	✓	✓			✓		✓		✓	✓		Simulated Annealing
Salvietti e Smith (2008)	✓	✓	✓	✓			✓		✓		✓	✓		Heurísticas
Buscher e Shen (2009)	✓	✓	✓	✓			✓		✓		✓	✓	✓	Tabu Search
Luo et al. (2009)	✓	✓	✓	✓		✓		✓		✓		✓	✓	Genetic Algorithm
Maravelias e Sung (2009)								Revisão da literatura						
Pan e Yang (2009)	✓	✓	✓	✓		✓		✓			✓	✓	✓	Heurísticas
Quadt e Kuhn (2009)	✓	✓	✓	✓			✓	✓		✓		✓		Heurísticas
Weidenhiller e Jodlbauer (2009)	✓	✓	✓	✓			✓		✓		✓	✓		---
Wong et al. (2009)	✓	✓	✓	✓		✓		✓		✓		✓		Genetic Algorithm
Buschkuhl et al. (2010)								Revisão da literatura						
Kim et al. (2010)	✓	✓	✓	✓			✓	✓			✓	✓		Heurísticas
Ozturk e Orneck (2010)	✓	✓	✓	✓			✓	✓		✓		✓		CPLEX
Parthanadee e Buddhakulsomsiri (2010)	✓	✓	✓	✓		✓		✓			✓	✓	✓	Simulação
Ruiz e Vazquez-Rodriguez (2010)								Revisão da literatura						
Abi et al. (2011)	✓		✓	✓			✓	✓		✓		✓		Dynamic Programming
Akbalik e Penz (2011)	✓		✓	✓			✓	✓		✓		✓		Dynamic Programming
Galss e Possani (2011)	✓	✓	✓	✓			✓	✓			✓		✓	Teoremas
Gicquel et al. (2011)	✓	✓	✓	✓			✓	✓		✓		✓		Branch and Cut
Gonçalves e Sousa (2011)	✓	✓	✓	✓			✓	✓			✓	✓		Genetic Algorithm + Programação Linear
Hans e van de Velde (2011)	✓	✓	✓	✓			✓	✓		✓			✓	Heurísticas
Kaczmarczyk (2011)	✓	✓	✓	✓		✓		✓		✓		✓		CPLEX

Quadro 1 – Panorama geral da literatura de dimensionamento de lotes e planejamento da produção (continuação)

Trabalho	Número de produtos		Número de estágios		Setup		Horizonte		Tempo		Objetivo		Método de Solução
	Um	Múltiplos	Um	Múltiplos	Dependente da Sequência	Independente da Sequência	Finito	Infinito	Contínuo	Discreto	Redução de custo	Outros	
Karimi-Nasab e Aryanezhad (2011)	✓		✓			✓	✓	✓	✓	✓		✓	Genetic Algorithm
Karimi-Nasab e Ghodoosi (2011)	✓			✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓	Branch and Bound
Tang et al. (2011)	✓		✓			✓	✓	✓	✓	✓		✓	Relaxação Lagrangiana
Stadtler (2011)	✓			✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓	Xpress-MP
Wu et al. (2011)	✓			✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓	Heurística
Georgiadis e Michaloudis (2012)	✓		✓			✓	✓	✓	✓	✓		✓	Heurística
Karimi-Nasab e Fatemi Ghomi (2012)	✓		✓			✓	✓	✓	✓	✓		✓	Heurística
Karimi-Nasab e Konstantaras (2012)	✓		✓			✓	✓	✓	✓	✓		✓	Heurística
Karimi-Nasab et al. (2012)	✓		✓			✓	✓	✓	✓	✓		✓	Simulated Annealing
Shen e Buscher (2012)	✓		✓			✓		✓	✓	✓		✓	Tabu Search
Weng e Fujimura (2012)	✓		✓			✓	✓	✓	✓	✓		✓	Heurística
Diaby et al. (2013)	✓		✓			✓	✓	✓	✓	✓		✓	Geometric Programming
Stadtler e Sahling (2013)	✓			✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓	Heurística
Toledo et al. (2013)	✓		✓			✓		✓		✓		✓	Simulated Annealing + Genetic Algorithm
Velez e Maravelias (2013)	✓		✓			✓		✓		✓		✓	Heurística + CPLEX
Yan et al. (2013)	✓		✓			✓		✓		✓		✓	Genetic Algorithm
Zhao et al. (2013)	✓		✓			✓		✓		✓		✓	CPLEX
Karimi-Nasab e Sevedhoseini (2013)	✓			✓		✓		✓		✓		✓	Branch and Cut

Quadro 1 – Panorama geral da literatura de dimensionamento de lotes e planejamento da produção (conclusão)

Fonte: Adaptado de Karimi-Nasab e Seyedhoseini (2013)

Ao se analisar o conteúdo do Quadro 1, fica evidente que Karimi-Nasab e Seyedhoseini (2013) conseguem classificar uma grande quantidade de trabalhos com os poucos critérios adotados. Isso ocorre, pois a complexidade de um problema de dimensionamento de lotes varia de acordo com alguns fatores chave bastante conhecidos pelos pesquisadores da área, logo, os autores somente tiveram que selecionar alguns desses fatores e, conseqüentemente, os mesmos são aplicáveis a grande maioria dos modelos existentes. A seguir são descritos os principais fatores que influem na modelagem de um problema de dimensionamento de lotes:

- a) número de estágios: um sistema de produção pode ser classificado segundo o seu número de estágios: monoestágio ou multiestágio. Sistemas monoestágio compreendem produtos simples, ou seja, produtos finais que são fabricados diretamente de sua matéria-prima, sem processos de montagem ou submontagem intermediária, logo as demandas dos produtos são obtidas diretamente dos pedidos dos consumidores ou de previsões de mercado – demanda independente. Já nos sistemas multiestágio, há itens intermediários que compõem o produto final, portanto há uma estrutura de produto definida e isto implica em demandas correlatas para tais itens e na necessidade de uma abordagem mais complexa para estimar a demanda em cada um dos itens intermediários – demanda dependente (DE BODT; GELDERS; VAN WASSENHOVE, 1984; KARIMI; GHOMI; WILSON, 2003; KUIK; SALOMON; VAN WASSENHOVE, 1994);
- b) demanda: consiste em um dado de entrada do problema de dimensionamento de lotes. Uma demanda estática não se altera no horizonte de planejamento, já uma demanda dinâmica apresenta alterações no decorrer do tempo. A demanda ainda pode ser classificada em determinística, se seu valor é conhecido, ou probabilística, no caso em que sua estimativa é baseada em probabilidades. Por fim, ainda existe a divisão entre demanda dependente e demanda independente, variando de acordo com o número de estágios do sistema de produção estudado. De forma geral, ambientes produtivos com demandas dinâmicas, dependentes e probabilísticas aumentam consideravelmente a complexidade de um problema (DE BODT; GELDERS; VAN WASSENHOVE, 1984; FLOUDAS; LIN, 2004; JANS; DEGRAEVE, 2008; KARIMI; GHOMI; WILSON, 2003; KUIK; SALOMON; VAN WASSENHOVE, 1994);
- c) horizonte de planejamento: é o intervalo de tempo futuro sobre o qual o Plano Mestre de Produção (MPS – *Master Production Schedule*) é projetado, podendo ser finito ou não. Quando se aborda um horizonte finito, trabalha-se com uma demanda

dinâmica, e, no caso de um horizonte de planejamento ilimitado, considera-se uma demanda estacionária. Outra variante do horizonte é o chamado horizonte rolante, utilizado quando se têm incertezas no planejamento (DE BODT; GELDERS; VAN WASSENHOVE, 1984; KARIMI; GHOMI; WILSON, 2003; SALOMON; VAN WASSENHOVE, 1994);

- d) consideração sobre o tempo: o tempo pode ser considerado de forma contínua ou pode ser analisado por meio de pontos discretos, o que também permite diferentes classificações para o problema de dimensionamento de lotes. Em termos de terminologia, os problemas se dividem em: *Big Bucket problems* – casos nos quais o período de tempo é grande o bastante para que se produzam diferentes tipos de produtos ou itens; *Small Bucket problems*, nos quais o período de tempo considerado é tão pequeno que somente um tipo de produto ou item é produzido (FLOUDAS; LIN, 2004; KARIMI; GHOMI; WILSON, 2003; SALOMON; VAN WASSENHOVE, 1994);
- e) número de produtos: considerado no modelo matemático é um fator primordial na classificação do mesmo e influi diretamente na complexidade do problema estudado: quanto mais produtos ou itens, maior a complexidade envolvida (KARIMI; GHOMI; WILSON, 2003; POCHET; WOLSEY, 2006);
- f) capacidade ou restrições de recurso: os recursos disponíveis também são um importante fator – recursos humanos, equipamentos industriais, orçamento, espaço físico e outros fatores impactam diretamente nas decisões tomadas. Se não há restrição de recursos, classifica-se o problema como não-capacitado (do inglês, *Uncapacitated*), caso contrário utiliza-se o termo capacitado (do inglês, *Capacitated*), que se aplica para a grande maioria dos problemas reais (FLOUDAS; LIN, 2004; KARIMI; GHOMI; WILSON, 2003; POCHET; WOLSEY, 2006; SALOMON; VAN WASSENHOVE, 1994);
- g) deterioração de produtos: quando é possível, o modelo tem de considerar restrições de armazenamento e vida útil, tornando o problema mais complexo (BRAHIMI, *et al.*, 2006; KARIMI; GHOMI; WILSON, 2003);
- h) setup ou preparação de máquina: trata-se de outra característica industrial que afeta diretamente a complexidade de um problema. Custos de *setup* e tempos de *setup* são normalmente tratados com a introdução de variáveis binárias no modelo matemático, aumentando a dificuldade de resolução dos mesmos. Quando o tempo e o custo de *setup* em um período independem do sequenciamento da produção e das decisões

tomadas nos períodos anteriores, tem-se uma estrutura de *setup* simples, caso contrário considera-se uma estrutura complexa. As estruturas complexas de *setup* são comumente subdivididas em quatro casos: a primeira possibilidade contempla os casos em que se pode continuar a produção do período anterior no período corrente sem a necessidade da troca de produto em linha (*setup carry-over*); na segunda possibilidade, é possível iniciar a preparação da produção de um item em uma determinada linha em um período e finalizá-la somente no período posterior (*setup crossover*); uma terceira possibilidade é quando o tempo e o custo de *setup* dependem das famílias dos produtos; por fim, há os casos mais complexos, para os quais o tempo e o custo de *setup* depende da sequência de produção dos itens, o que gera um problema combinatório (FLOUDAS; LIN, 2004; JANS; DEGRAEVE, 2008; KARIMI; GHOMI; WILSON, 2003);

- i) balanço entre demanda e inventário: o balanço entre demanda e inventário pode ser considerado como um último fator que interfere consideravelmente na complexidade da modelagem e da resolução de um problema de dimensionamento de lotes. Se o ambiente industrial possibilita não atender a demanda no período requerido, fazendo-o em períodos futuros com uma penalização pelo atraso, está se adicionando ao problema uma variável de atraso (em inglês, *backlogging*). Alguns problemas consideram também a possibilidade de não atendimento de algumas demandas ao término do horizonte de planejamento (também conhecida por *lost sales*). A consideração de tais possibilidades mediante uma penalização torna a solução dos problemas de dimensionamento mais complexos, todavia podem viabilizar alguns problemas que, sem a consideração do atraso, não teriam solução viável (JANS; DEGRAEVE, 2008; KARIMI; GHOMI; WILSON, 2003);
- j) janelas de tempo: nos últimos anos, algumas publicações têm envolvido um novo fator denominado janelas de tempo ou *time windows*. Os autores definem tais janelas como intervalos de tempo nos quais a produção ou a entrega de produtos podem ocorrer sem penalizações ou custos adicionais. Em termos práticos, esse fator é uma extensão do balanço entre demanda e inventário anteriormente apresentado. As perdas possíveis, caso não se atenda uma demanda dentro da janela de tempo, são: custo de armazenagem e custo de produção antecipada (*early production cost*), além dos custos de atraso e perda de vendas já apresentados anteriormente (ABSI; KEDAD-SIDHOUM; DAUZÈRE-PÉRÈS, 2011; BRAHIMI *et al.*, 2006; DAUZÈRE-PÉRÈS *et al.*, 2002).

Com base nesses fatores de influência, diversos estudos têm sido realizados para classificar os diferentes modelos de dimensionamento de lotes existentes. Dentre tais trabalhos destacam-se: Brahimi *et al.* (2006); De Bodt, Gelders e Van Wassenhove (1984); Guimarães, Klabjan e Almada-Lobo (2014); Jans e Degraeve (2006); Karimi, Ghomi e Wilson (2003); Pochet e Wolsey (2006); Zhu e Wilhelm (2005). A seguir, são apresentadas visões gerais dos trabalhos desses autores:

- a) Brahimi *et al.* (2006) apresentam diferentes formulações e métodos de solução para o problema de dimensionamento de lotes para um único item;
- b) De Bodt, Gelders e Van Wassenhove (1984) apresentam um levantamento de diferentes modelos que consideram demandas dinâmicas;
- c) Guimarães, Klabjan e Almada-Lobo (2014) abordam o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes com *setups* dependentes da sequência, propondo um *framework* bidimensional que abrange os diferentes modelos propostos com essa finalidade;
- d) Jans e Degraeve (2006) apresentam uma revisão de maior amplitude: primeiramente, definem os problemas de dimensionamento de lotes de único item sem restrições de capacidade e multi-item com restrições de capacidade e, em um segundo momento, listam as diferentes variações que a formulação de cada um desses problemas podem apresentar em função dos fatores de influência anteriormente descritos nesta revisão;
- e) Karimi, Ghomi e Wilson (2003) realizam uma revisão focada no problema de dimensionamento de lotes capacitado (CLSP – *Capacitated Lot Sizing Problem*). A essência dessa revisão é apresentar os diferentes modelos e métodos de solução exatos e heurísticos desenvolvidos para o CLSP, incluindo uma breve análise dos *solvers* usualmente utilizados para solução desse problema. Além disso, os autores chegam a definir, de forma mais geral, outras variações desse problema que consideram relevantes:
 - ELSP (*Economic Lot Scheduling Problem*): trata-se do problema de definição do lote econômico de produção que pode ser classificado como monoestágio, multi-item e com demanda estacionária;
 - DLSP (*Discrete Lot Sizing and Scheduling Problem*): consiste no problema discreto de dimensionamento e sequenciamento de lotes. Em termos práticos trata-se de uma versão do CLSP para o qual há somente duas possibilidades em termos de produção:

produção com capacidade total da máquina ou ociosidade (produção “tudo ou nada”);

- CSLP (*Continuous Setup Lot Sizing Problem*): extensão do CLSP aplicado a indústrias de produção contínua, ou seja, pelo menos um item tem de ser produzido por período;
 - PLSP (*Proportional Lot Sizing and Scheduling Problem*): é o problema proporcional de dimensionamento e sequenciamento de lotes. Trata-se de uma extensão do CLSP na qual é possível utilizar a capacidade ociosa de um período para programar a produção de um segundo item nesse mesmo período, com um limite superior de uma preparação por período em uma mesma máquina.
 - GLSP (*General Lot Sizing and Scheduling Problem*): trata-se do problema generalizado de dimensionamento e sequenciamento de lotes. É uma versão bastante ampla do problema podendo envolver diversos fatores de influência para solução do dimensionamento e sequenciamento de lotes de vários produtos em uma máquina que somente pode produzir um artigo por vez.
- f) Pochet e Wolsey (2006) apresentam sistematicamente uma grande variedade de versões do problema dimensionamento e sequenciamento de lotes, abrangendo a maioria das versões já estudadas na literatura. Além disso, os autores listam e conceituam métodos de solução diversos para tais problemas e fornecem exemplos de aplicação. Com base na análise de todo o material levantado nesta revisão bibliográfica, pode-se avaliar que Pochet e Wolsey (2006) apresentam a proposta de classificação mais ampla entre os autores destacados, logo, essa proposta encontra-se resumida no Anexo A desse trabalho, a fim de conceituar o problema de dimensionamento de lotes de forma mais geral;
- g) Zhu e Wilhelm (2005) sintetizam o conteúdo disponível na literatura sobre o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes com *setup* dependente da sequência (CLSD, do inglês *Capacitated Lot Sizing Problem with Sequence Dependent Setups*), apresentando modelos e diferentes métodos de solução, incluindo um panorama completo dos métodos heurísticos desenvolvidos pelos pesquisadores da área.

No contexto dos modelos de dimensionamento de lotes para a indústria de vidro, observa-se que a maioria dos modelos publicados consistem em derivados do CLSD, inclusive

os trabalhos de Almada-Lobo (2007) e Toledo *et al.* (2013), os que mais se assemelham ao modelo proposto nesse trabalho.

Originalmente definido por Haase (1996), o CLSD aborda os problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes nos quais a sequência dos artigos planejados nas linhas de produção tem interferência direta no custo de planejamento. São problemas bastante abordados na literatura, pois refletem a realidade de diferentes setores produtivos. Conforme mencionado anteriormente, Zhu e Wilhelm (2005) realizam um amplo levantamento de publicações que estudam esse problema e, mais recentemente, Guimarães, Klabjan e Almada-Lobo (2014) propõem um *framework* com trabalhos envolvendo esse tema.

Guimarães, Klabjan e Almada-Lobo (2014) definem a forma básica desse modelo:

Índices

- $i = 1, \dots, N$: tipos de artigos produzidos;
- $j = 1, \dots, N$: tipos de artigos produzidos;
- $t = 1, \dots, T$: períodos de produção, neste modelo considera-se o dia como unidade de tempo;

Dados do Problema

- d_{it} : demanda do artigo i no período t (unidades);
- h_{it} : custo de se armazenar uma unidade de estoque do artigo i no período t (custo/unidade);
- cap_t : capacidade da máquina no período t (tempo);
- p_{it} : tempo de processamento do artigo i no período t (tempo/ unidade);
- b_{it} : quantidade máxima que pode ser produzida do artigo i no período t (unidades);
- sc_{ij} : custo de uma preparação de máquina ou *setup* do artigo i para o artigo j (custo);
- st_{ij} : tempo de uma preparação de máquina ou *setup* do artigo i para o artigo j (tempo);
- m_i : lote mínimo do produto i ;
- q_{it} : limitante superior do número de preparações de máquina para o artigo i no período t .

Variáveis do Problema

- X_{it} : quantidade do artigo i produzida no período t ;
- I_{it} : estoque do artigo i no final do período t ;
- T_{ijt} : número de preparações de máquina do artigo i para o artigo j durante o período t ;

- Z_{it} : $Z_{it} = 1$, se a máquina está preparada para o artigo i no início do período t , caso contrário, $Z_{it} = 0$.

Modelo Matemático

Minimizar:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T h_{it} \cdot I_{it} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^T sc_{ij} \cdot T_{ijt} \quad (2.1)$$

Sujeito à:

$$I_{i(t-1)} + X_{it} = d_{it} + I_{it} \quad i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (2.2)$$

$$\sum_{i=1}^N p_{it} \cdot X_{it} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N st_{ij} \cdot T_{ijt} \leq cap_t \quad t = 1, \dots, T \quad (2.3)$$

$$X_{it} \leq b_{it} \cdot \left(\sum_{j=1}^N T_{jit} + Z_{it} \right) \quad i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (2.4)$$

$$\sum_{i=1}^N Z_{it} = 1 \quad t = 1, \dots, T \quad (2.5)$$

$$Z_{it} + \sum_{j=1}^N T_{jit} = \sum_{j=1}^N T_{ijt} + Z_{i,t+1} \quad i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (2.6)$$

$$(X_{it}, I_{it}, Q_t) \in R_+, Z_{it} \in Z_+, T_{ijt} \in \{0, \dots, q_{ij}\} \quad (2.7)$$

$$\{(i, j): T_{ijt} > 0\} \text{ não inclui subtours desconexos} \quad t = 1, \dots, T \quad (2.8)$$

A função objetivo (2.1) visa a minimizar os custos de estoque e preparação. As restrições (2.2) expressam o balanço de estoque e as restrições (2.3) asseguram o respeito à capacidade produtiva. As restrições (2.4) relacionam a produção com o estado de preparação da máquina: a produção somente pode acontecer em um determinado período se o estado de preparação é carregado do período anterior (*setup carry-over*) ou se ocorre, pelo menos, uma preparação durante o período. As restrições (2.5) asseguram que a máquina está preparada exatamente para um artigo no início de cada período. O balanço de preparação de máquina é assegurado pelas restrições (2.6). Em (2.7), define-se o domínio das variáveis de decisão. Por fim, as restrições (2.8) asseguram que as soluções factíveis geradas não contenham sub-rotas ou *subtours*, ou seja, sequências de preparação de máquina que se iniciam e terminam no mesmo artigo.

As diferentes formas matemáticas de se expressarem as restrições (2.8) geram diversas variações do CLSD (ALMADA-LOBO *et al.*, 2007; HAASE, 1996; BELVAUX; WOLSEY,

2001; MENEZES; CLARK; ALMADA-LOBO, 2011). A fim de exemplificar tais variações, a seguir, são apresentadas as restrições (2.9) e (2.10) que substituem as restrições (2.8) nos modelos de Hasse (1996) e Almada-Lobo *et al.* (2007), respectivamente. Para compreensão de tais restrições, é importante definir uma variável de decisão auxiliar:

- V_{it} : designa o artigo i ao período t , sendo utilizada para definir a precedência dos lotes em um determinado período.

Haase (1996) propõe o uso das variáveis auxiliares V_{it} para capturar a ordem os lotes de produção e formula as restrições (2.9) de forma a evitar quaisquer tipos de sub-rotas.

$$V_{jt} \leq V_{it} + 1 - N \cdot (1 - T_{ijt}) \quad i = 1, \dots, N; i \neq j; t = 1, \dots, T \quad (2.9)$$

Almada-Lobo *et al.* (2007) modificam as restrições (2.9), gerando as restrições (2.10) que são análogas, porém permitem um tipo específico de sub-rotas denominadas α -subtours.

$$V_{jt} \leq V_{it} + 1 - N \cdot (1 - T_{ijt}) - N \cdot Z_{it} \quad i = 1, \dots, N; i \neq j; t = 1, \dots, T \quad (2.10)$$

Esse tipo de sub-rota ocorre quando há um número estritamente positivo de preparações em um determinado período t e o estado inicial de preparação de máquina nesse período é igual ao estado final. Esse tipo de rota encontra-se definido no trabalho de Menezes, Clark e Almada-Lobo (2011) é ilustrado na Figura 2, abaixo.

Figura 2 – Exemplo de um α -subtour
Fonte: Adaptado de Menezes, Clark e Almada-Lobo (2011)

Além das diversas possibilidades para as restrições (2.8), outros modelos também são derivados da formulação básica do CLSD – (2.1) a (2.8) – ao se generalizar o modelo para cenários industriais mais amplos (como, por exemplo, um ambiente com diversas máquinas de produção) e ao se especializar o modelo para um tipo específico de indústria com as necessárias adaptações e com a adição de restrições tecnológicas.

Um bom exemplo dessas possibilidades de especialização do CLSD, é o modelo proposto por Almada-Lobo (2007) e Toledo *et al.* (2013) para o dimensionamento e sequenciamento de lotes de curto prazo da indústria de embalagens de vidro, que não só

especializa-se para uma atividade industrial, mas também generaliza o problema para diversas máquinas paralelas. Esse modelo é apresentado a seguir:

Índices

- $i = 1, \dots, N$: tipos de artigos produzidos;
- $j = 1, \dots, N$: tipos de artigos produzidos;
- $k = 1, \dots, K$: números de máquinas de conformação da fábrica;
- $t = 1, \dots, T$: períodos de produção.

Dados do Problema

- d_{it} : demanda (em toneladas) do artigo i no período t ;
- $\bar{\eta}_{ik}$: número máximo de cavidades da máquina IS k utilizadas na produção do artigo i ;
- $\underline{\eta}_{ik}$: número mínimo de cavidades da máquina IS k utilizadas na produção do artigo i ;
- p_{ik} : quantidade (em toneladas) do artigo i produzida em um dia por cavidade da máquina k ;
- s_{ijk} : tempo (mensurado em toneladas de vidro perdidas) de preparação do artigo i para o artigo j na máquina k ;
- c_{ijk} : custo de preparação do artigo i para o artigo j na máquina k ;
- h_i : custo de se armazenar uma tonelada do artigo i de um período para outro;
- C : capacidade de fusão do forno (em toneladas);
- $\bar{\omega}$: custo por tonelada do forno sem utilização.

Variáveis do Problema

- Y_{itk} : $Y_{itk} = 1$, se o artigo i é designado para a máquina k durante o período t , caso contrário, $Y_{itk} = 0$;
- Q_t : $Q_t = 1$, se o forno está ativo no período t , caso contrário, $Q_t = 0$;
- Z_{ijtk} : $Z_{ijtk} = 1$, se há uma troca de fabricação do artigo i no período $t - 1$ para o artigo j no período t na máquina k , caso contrário, $Z_{ijtk} = 0$;
- N_{itk} : número de cavidades ativas na máquina IS k para produção do artigo i no período t ;
- I_{it} : estoque do artigo i no final do período t (em toneladas de vidro);
- $\bar{I}d_t$: capacidade ociosa do forno período t (em toneladas de vidro).

Modelo Matemático**Minimizar:**

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K c_{ijk} \cdot Z_{ijtk} + \bar{\omega} \cdot \sum_{t=1}^T \bar{d}_t + \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T h_i \cdot I_{it} \quad (2.11)$$

Sujeito à:

$$I_{it} - I_{i(t-1)} + d_{it} = \sum_{k=1}^K p_{ik} \cdot N_{itk} + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N s_{jik} \cdot Z_{jtk} \quad i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (2.12)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K p_{ik} \cdot N_{itk} + \bar{d}_t = C \cdot Q_t \quad t = 1, \dots, T \quad (2.13)$$

$$N_{itk} \leq \bar{\eta}_{ik} \cdot Y_{itk} \quad i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T; k = 1, \dots, K \quad (2.14)$$

$$N_{itk} \geq \underline{\eta}_{ik} \cdot Y_{itk} \quad i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T; k = 1, \dots, K \quad (2.15)$$

$$\sum_{i=1}^N Y_{itk} \leq 1 \quad t = 1, \dots, T; k = 1, \dots, K \quad (2.16)$$

$$\sum_{i=1}^N Y_{itk} \geq \sum_{i=1}^N Y_{i(t+1)k} \quad t = 1, \dots, T-1; k = 1, \dots, K \quad (2.17)$$

$$Q_t = \sum_{i=1}^N Y_{itk} \quad t = 1, \dots, T; k = 1, \dots, K \quad (2.18)$$

$$Y_{jtk} + Y_{i(t-1)k} \leq Z_{ijtk} + 1 \quad i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T; k = 1, \dots, K \quad (2.19)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N Z_{ijtk} \leq Q_t \quad t = 1, \dots, T; k = 1, \dots, K \quad (2.20)$$

$$(I_{it}, \bar{d}_t, Q_t) \in R_+, N_{itk} \in Z_+, (Y_{itk}, Z_{ijtk}) \in \{0,1\} \quad (2.21)$$

A função objetivo (2.11) minimiza o tempo de *setup* e os custos de estoque, além de penalizar a capacidade ociosa do forno. As restrições (2.12) definem o balanço de estoque. As restrições (2.13) limitam a capacidade de fusão do forno e definem a sua ociosidade $\bar{d}_t$. As restrições tecnológicas (2.14) e (2.15) impõem os números máximos e mínimos de cavidades ativas na produção de um determinado artigo em uma determinada máquina para um período. As restrições (2.16) definem que cada máquina somente pode estar preparada para a produção de um único artigo por vez, ou seja, não é possível que uma máquina produza dois diferentes artigos ao mesmo tempo. As restrições (2.17) evitam a ocorrência de ociosidade intermitente,

forçando a concentração de períodos ou sequências de períodos ociosos das linhas no final do horizonte de planejamento. As restrições (2.18) garantem que se o forno está parado, não há produção em nenhuma de suas linhas. Em (2.19), assegura-se o fluxo de *setup* das máquinas entre os diferentes períodos. Em (2.20), é estabelecida a coerência entre as variáveis Z_{ijtk} e Q_t . Por fim, em (2.21), é definido o domínio das variáveis do problema.

Dessa forma, esse trabalho poderia partir do modelo acima descrito – (2.11) a (2.21) – para a proposição de um modelo que preencha as lacunas existentes na literatura em termos de restrições tecnológicas da indústria de embalagens de vidro. Porém, Almada-Lobo (2007) e Toledo *et al.* (2013) acabam utilizando alguns pressupostos que distanciam esse modelo da proposição desse trabalho, como a distinção de cavidades da máquina IS e a possibilidade de ociosidade. Logo, a inspiração para o modelo proposto nessa pesquisa será somente a generalização do CLSD para um ambiente industrial com diversas máquinas paralelas: o CLSD-PM (*Capacitated Lot Sizing Problem with Sequence Dependent Setups for Parallel Machines*).

James e Almada-Lobo (2011) definem o CLSD-PM:

Índices

- $i = 1, \dots, N$: tipos de artigos produzidos;
- $j = 1, \dots, N$: tipos de artigos produzidos;
- $m = 1, \dots, M$: tipos de artigos produzidos;
- $t = 1, \dots, T$: períodos de produção.

Dados do Problema

- d_{it} : demanda do artigo i no período t ;
- h_i : custo de se armazenar uma unidade do artigo i de um período para outro;
- C_{mt} : capacidade disponível da máquina m no período t ;
- p_{mi} : tempo de processamento de uma unidade do artigo i na máquina m ;
- G_{mit} : limitante superior da quantidade produzida do artigo i na máquina m durante o período t ;
- c_{mij} : custo de uma preparação de máquina ou *setup* do artigo i para o artigo j na máquina m ;
- s_{mij} : tempo de uma preparação de máquina ou *setup* do artigo i para o artigo j na máquina m ;
- A_{mi} : indica quais máquinas estão aptas a produzir quais artigos, $A_{mi} = 1$ se a máquina m está apta a produzir o artigo i e $A_{mi} = 0$, caso contrário.

Variáveis do Problema

- X_{mit} : quantidade do artigo i produzida na máquina m durante o período t ;
- I_{it} : estoque do artigo i no final do período t ;
- V_{mit} : variável auxiliar que designa o produto i na máquina m durante o período t . Quanto maior o valor de V_{mit} , mais tarde o artigo i é programado durante o período t na máquina m e, assim, garante-se que cada máquina está preparada somente para um artigo em um determinado instante;
- T_{mijt} : $T_{mijt} = 1$, se ocorre uma preparação na máquina m do artigo i para o artigo j no período t , caso contrário, $T_{mijt} = 0$;
- Y_{mit} : $Y_{mit} = 1$, se a máquina m está preparada para o artigo i no início do período t , caso contrário, $Y_{mit} = 0$.

Modelo Matemático

Minimizar:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T h_i \cdot I_{it} + \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T c_{mij} \cdot T_{mijt} \quad (2.22)$$

Sujeito à:

$$I_{i(t-1)} + \sum_{m=1}^M X_{mit} = d_{it} + I_{it} \quad i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (2.23)$$

$$\sum_{i=1}^N p_{mi} \cdot X_{mit} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N s_{mij} \cdot T_{mijt} \leq C_{mt} \quad m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T \quad (2.24)$$

$$X_{mit} \leq G_{mit} \cdot \left(\sum_{j=1}^N T_{mjit} + Y_{mit} \right) \quad m = 1, \dots, M; i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (2.25)$$

$$Y_{mi(t+1)} + \sum_{j=1}^N T_{mijt} = Y_{mit} + \sum_{j=1}^N T_{mjit} \quad m = 1, \dots, M; i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (2.26)$$

$$\sum_{i=1}^N Y_{mit} = 1 \quad t = 1, \dots, T \quad (2.27)$$

$$V_{mit} + N \cdot T_{mijt} - (N - 1) - N \cdot Y_{mjit} \leq V_{mjit} \quad m = 1, \dots, M; i = 1, \dots, N; i \neq j; t = 1, \dots, T \quad (2.28)$$

$$\sum_{i=1}^T X_{mit} \leq \sum_{i=1}^T G_{mit} \cdot A_{mi} \quad m = 1, \dots, M; i = 1, \dots, N \quad (2.29)$$

$$V_{mit} \in R, I_{it} \in R_+, X_{mit} \in Z_+, (T_{mijt}, Y_{mit}) \in \{0, \dots, q_{ij}\} \quad (2.30)$$

A função objetivo (2.22) minimiza os custos de estoque e preparação. As restrições (2.23) representam o balanço de estoque e as restrições (2.24) o respeito à capacidade produtiva de cada máquina. As restrições (2.25) relacionam a produção com o estado de preparação das máquinas, implicando nos *setups* quando necessário. O balanço de preparação de máquinas é representado em (2.26). As restrições (2.27) asseguram que cada máquina está preparada exatamente para um artigo no início de cada período. Em (2.28), restringem-se as sub-rotas, permitindo somente a ocorrência α -*subtours*. As restrições (2.29) garantem que a produção dos artigos somente ocorra em máquinas aptas a produzi-los e, em (2.30), define-se o domínio das variáveis de decisão.

2.2 O MODELO SCOR

O SCOR (*Supply Chain Operations Reference Model*) é um modelo de referência elaborado pelo *Supply-Chain Council*, uma organização sem fins lucrativos que visa ao desenvolvimento de metodologias, ferramentas de diagnóstico e de *benchmarking* para suportar a gestão da cadeia de suprimentos. O modelo SCOR é um *framework* que engloba e inter-relaciona os processos de negócio correlatos ao gerenciamento da cadeia de suprimentos, as métricas, as melhores práticas e as tecnologias desenvolvidas para gestão dos suprimentos de uma corporação.

Figura 3 – Processos gerais do SCOR em diferentes níveis da cadeia de suprimentos

Fonte: Adaptado de *Supply-Chain Council* (2008)

De acordo com o *Supply-Chain Council* (2008), o modelo foi desenvolvido com considerável abrangência contemplando a maior parte dos processos de negócio envolvidos para que se atenda a demanda de um cliente, exceto o Processo de *Marketing* e Vendas e o Processo de Desenvolvimento de Produtos. Além disso, o SCOR é bastante flexível em sua aplicação, pois é composto por cinco grandes grupos de processos de gestão que representam grandes blocos construtivos, podendo ser combinados de maneiras diversas e viabilizando a modelagem de empresas com diferentes níveis de maturidade na gestão da cadeia de suprimentos. Os grupos de processos que compõem o SCOR encontram-se na Figura 3 e são descritos a seguir:

- a) Planejamento (*Plan*): agrupa os processos associados com a definição de necessidades e ações corretivas para que se atinjam os objetivos de *Supply Chain*. Esse grupo engloba seis categorias de processos, sendo que cada uma dessas categorias abrange processos diversos. São tais categorias:
 - Planejamento da cadeia de suprimentos (P1);
 - Planejamento do abastecimento (P2);
 - Planejamento da produção (P3);
 - Planejamento da entrega (P4)
 - Planejamento do retorno dos produtos (P5);
 - *Enable Plan* (EP), que consiste no conjunto de atividades que dão subsídio à execução dos demais processos de planejamento.
- b) Abastecimento (*Source*): engloba os processos associados com os pedidos, a entrega, o recebimento e a transferência de matéria-prima, submontagens e até mesmo a contratação de serviços necessários à produção. Subdivide-se nas categorias:
 - Abastecimento de produtos *Make-to-Stock* (S1);
 - Abastecimento de produtos *Make-to-Order* (S2);
 - Abastecimento de produtos *Engineer-to-Order* (S3);
 - *Enable Source* (ES).
- c) Produção (*Make*): grupo que contém os processos de fabricação, que agregam valor ao produto. Tais processos subdividem-se nas categorias:
 - Produção *Make-to-Stock* (M1);
 - Produção *Make-to-Order* (M2);
 - Produção *Engineer-to-Order* (M3);
 - *Enable Make* (EM).

- d) Entrega (*Deliver*): versa sobre os processos correlatos à gestão e à operacionalização do atendimento dos pedidos dos clientes. Nesse grupo, estão inclusas as categorias:
- Entrega de produtos *Make-to-Stock* (D1);
 - Entrega de produtos *Make-to-Order* (D2);
 - Entrega de produtos *Engineer-to-Order* (D3);
 - Entrega de produtos em varejo (D4);
 - Enable Deliver (ED).
- e) Retorno (*Return*): grupo que contempla processos associados com movimentação de retorno do material do cliente para o fabricante a fim de que se corrijam falhas no produto, na entrega do pedido ou para realização de manutenções, subdivide-se em:
- Retorno do abastecimento de produtos defeituosos (SR1);
 - Retorno da entrega de produtos defeituosos (DR1);
 - Retorno do abastecimento de produtos para manutenção, reparo ou inspeção (SR2);
 - Retorno da entrega de produtos para manutenção, reparo ou inspeção (DR2);
 - Retorno do abastecimento de produtos excedentes (DR3);
 - Retorno da entrega de produtos excedentes (SR3);
 - *Enable Return* (ER).

Logo, os processos que compõem o modelo SCOR estão organizados nessa estrutura de cinco grandes grupos e suas respectivas categorias. A Figura 4 resume o padrão de nomenclatura para os processos que compõem o modelo de referência.

Figura 4 – Padrão de nomenclatura dos processos do modelo SCOR
Fonte: Adaptado de *Supply-Chain Council* (2008)

A proposta fundamental do SCOR é viabilizar melhorias nas organizações em termos de gestão da cadeia de suprimentos por meio de uma gama de processos, métricas e boas práticas tornando possível aplicar uma abordagem de *Business Process Management* (BPM). A Figura 5 ilustra a abordagem de BPM proposta pelo SCOR.

Figura 5 – Aplicação do SCOR como modelo de referência para a melhoria de processos
Fonte: Adaptado de Supply-Chain Council (2008)

Com base nesse contexto, as métricas aplicáveis a cada processo tornam-se também bastante relevantes para que se possa quantificar a *performance* da empresa estudada e para que seja possível compará-la com as empresas de referência ou *best-in-class* em um processo de *benchmarking* que alavanque a obtenção do estado futuro *To-Be* e uma consequente melhoria do processo de negócio. O *Supply-Chain Council* (2008) propõe um conjunto estruturado de métricas aplicáveis à gestão da cadeia de suprimentos que podem ser utilizadas para construção de um Sistema de Medição de Desempenho (SMD) em *Supply Chain*.

Tais métricas são divididas de acordo com o atributo de *performance* ao qual se referem. Há um total de cinco atributos possíveis: três são relacionados diretamente ao cliente – Confiabilidade da Cadeia de Suprimentos ou *Reliability* (RL), Tempo de Resposta da Cadeia de Suprimentos ou *Responsiveness* (RS) e Agilidade da Cadeia de Suprimentos ou *Agility* (AG) – e dois estão ligados aos processos internos da empresa – Custos da Cadeia de Suprimentos ou *Cost* (CO) e Gestão de Ativos da Cadeia de Suprimentos ou *Asset Management* (AM).

Ainda, as métricas que quantificam cada atributo de *performance* também possuem uma organização particular, subdividindo-se em níveis 1, 2 e 3. As métricas do Nível 1 são estratégicas e caracterizam o atingimento do atributo de *performance* pela empresa que está estudando seu processo, porém consistem em indicadores complexos que precisam de outras medições para sua obtenção. Logo tais métricas se desdobram nas de Nível 2 que, de forma

análoga, se desdobram nas de Nível 3. A Figura 6 ilustra o sistema de nomenclatura das métricas do SCOR e, de acordo com essa classificação existente para os indicadores de desempenho, o Quadro 2 relaciona os atributos de *performance* com métricas do Nível 1.

XX.y.z	
XX = Atributos de <i>Performance</i>	
Possíveis Valores:	
RL	Confiabilidade
RS	Responsividade
AG	Agilidade
CO	Custo
AM	Gestão de Ativos
y	Nível da métrica
z	Número da métrica

Figura 6 – Padrão de nomenclatura das métricas do modelo SCOR
 Fonte: Adaptado de *Supply-Chain Council* (2008)

Perspectiva	Atributo de <i>Performance</i>		Nível 1 Indicador Estratégico
Cliente	Confiabilidade da Cadeia de Suprimentos (RL)	<i>Performance</i> de entrega da cadeia de suprimentos: o produto correto, no local correto, no tempo correto, na condição e na embalagem correta, na quantidade correta, com a documentação correta e ao cliente correto.	<i>Perfect Order Fulfillment</i> (RL.1.1)
	Tempo de Resposta da Cadeia de Suprimentos (RS)	A velocidade na qual a cadeia de suprimentos entrega produtos aos clientes.	<i>Order Fulfillment Cycle Time</i> (RS.1.1)
	Agilidade da Cadeia de Suprimentos (AG)	A agilidade da cadeia de suprimentos em se adaptar a mudanças de mercado a fim de manter a vantagem competitiva.	<i>Upside Supply Chain Flexibility</i> (AG.1.1)
			<i>Upside Supply Chain Adaptability</i> (AG.1.2)
Interna	Custos da Cadeia de Suprimentos (CO)		<i>Downside Supply Chain Adaptability</i> (AG.1.3)
	Gestão de Ativos da Cadeia de Suprimentos (AM)	Custos associados com as operações da cadeia de suprimentos.	<i>Supply Chain Management Cost</i> (CO.1.1)
			<i>Cost of Goods Sold</i> (CO.1.2)
			<i>Cash-to-Cash Cycle Time</i> (AM.1.1)
			<i>Return on Supply Chain Fixed Assets</i> (AM.1.2)
			<i>Return on Working Capital</i> (AM.1.3)

Quadro 2 – Atributos de *performance* e métricas do Nível 1 correlatas
 Fonte: Adaptado de *Supply-Chain Council* (2008)

De modo menos estruturado (sem um sistema de nomenclatura, por exemplo) o SCOR também lista diversas boas práticas aplicáveis à gestão da cadeia suprimentos e realiza a correlação entre processos, métricas e boas práticas, de modo a proporcionar um modelo de referência completo, robusto e coerente.

No âmbito do uso de ferramentas suportadas por modelagem quantitativa para otimizar a *performance* da cadeia de suprimentos, ao se realizar uma busca na Versão 9.0 do modelo SCOR, encontram-se algumas propostas nesse sentido descritas como boas práticas:

- a) categoria de processos P1: o modelo de referência afirma que uma boa prática para suportar a tomada de decisão no Planejamento da Cadeia de Suprimentos é uso de sistemas computadorizados de otimização do planejamento que permitam a solução mais assertiva na definição do compromisso ou *trade-off* entre níveis de serviço e níveis de inventário;
- b) processo de Planejamento das Atividades da Produção *Make-to-Stock* (M1.1): de acordo com o SCOR, uma boa prática para esse processo é o uso de ferramentas de otimização para a obtenção do plano de produção que maximize a produtividade mediante as restrições de recursos existentes;
- c) processo de Planejamento das Atividades da Produção *Make-to-Order* (M2.1): de maneira análoga ao que foi exposto no item anterior o uso de métodos quantitativos de otimização é citado como boa prática nesse caso;
- d) processo de Planejamento das Atividades da Produção *Engineer-to-Order* (M3.2): a otimização é aplicável também ao planejamento da manufatura em indústrias *Engineer-to-Order*;
- e) processo de Reserva de Inventário e de Determinação da Datas de Entrega (D2.3): para esse processo o SCOR sugere a utilização de técnicas de planejamento e agendamento otimizado;
- f) processo de Definição de Rotas de Entrega de produtos *Make-to-Stock* (D1.6): a otimização de rotas de entrega por meio de ferramentas analíticas é defendida como boa prática e sabe-se que grande parte dos estudos desenvolvidos em PO versam sobre problemas de roteirização, logo, métodos quantitativos de otimização tornam-se uma forte possibilidade para tal fim;
- g) processo de Definição de Rotas de Entrega de produtos *Make-to-Order* (D2.6): assim como a proposição para definição de rotas na expedição de produtos *Make-to-Stock*, a produção *Make-to-Order* também pode ter suas entregas otimizadas;

- h) processo de Definição de Rotas de Entrega de produtos *Engineer-to-Order* (D3.6): de maneira similar aos dois itens anteriores as técnicas de Pesquisa Operacional (PO) podem ser aplicadas à entrega de produtos *Engineer-to-Order*.

Como essa pesquisa aborda especificamente o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes, os processos D1.6, D2.6 e D3.6 não serão contemplados pelo modelo formulado, pois são compostos por operações puramente logísticas, mais bem tratadas por um modelo matemático que verse sobre fluxo em redes. Além disso, por sua característica, a indústria de embalagens de vidro trabalha basicamente com sistemas de produção *Make-to-Stock* e *Make-to-Order*, apesar da existência de algumas iniciativas de produtos diferenciados em linhas *premium* concebidos junto ao cliente, o volume e a complexidade envolvidos não justificam a classificação de uma família de produtos *Engineer-to-Order* na indústria vidreira. Desse modo, com o modelo proposto por esse estudo, será possível aplicar boas práticas do SCOR na categoria de processos P1 e nos processos M1.1, M2.1 e D2.3 da indústria de embalagens de vidro, elevando a sua *performance* nesses itens.

Com base no contexto apresentado, torna-se interessante que, como último item desta revisão sobre o modelo SCOR, seja dada uma visão geral dos processos destacados passíveis de melhoria na indústria vidreira com a utilização do modelo de otimização proposto do planejamento da produção, bem como de suas métricas. Com base em tais informações, torna-se possível mensurar quanto o resultado desta pesquisa pode impactar positivamente na gestão dos suprimentos de uma indústria de embalagens de vidro. Segue uma breve descrição dos processos e de suas métricas segundo o *Supply-Chain Council* (2008):

- a) categoria de processos P1: envolve os processos que tratam o desenvolvimento e estabelecimento de linhas de ação em um determinado horizonte visando atingir os objetivos de *Supply Chain* com os recursos disponíveis e mediante as restrições existentes. Os atributos de *performance* da Cadeia de Suprimentos impactados por essa categoria de processos e suas métricas de cada atributo são:
- RS: *Order Fulfillment Cycle Time* (RS.1.1), que consiste no tempo médio de atendimento de um pedido, e *Plan Cycle Time* (RS.3.98), que é o tempo médio investido em planejamento;
 - AM: *Return on Working Capital* (AM.1.3), que consiste na razão entre os lucros obtidos com a cadeia de suprimentos e o capital operacional aplicado, *Cash-to-Cash Cycle Time* (AM.1.1), que mede o tempo que o capital investido leva para retornar para a organização, e *Return on Supply Chain Fixed Assets* (AM.1.2), que é um

indicador análogo ao AM.1.3, porém mede o retorno que a empresa obtém sobre o seu capital imobilizado e não sobre o capital operacional;

- CO: *Cost to Plan Supply Chain* (CO.3.108), que indica a soma de todos os custos envolvidos no planejamento da cadeia de suprimentos, e *Environmental Compliance Cost* (CO.3.147) que mede o percentual dos custos da cadeia associados com questões de *compliance* na esfera ambiental.
- a) processos M1.1 e M.2.1: consistem nos processos que visam ao planejamento detalhado dos produtos a serem manufaturados, contempla toda a organização operacional, a distribuição e sequenciamento das atividades, a mitigação dos impactos de *setup* e a busca pelo melhor uso possível da capacidade produtiva. A única diferença entre os dois processos agrupados nesse item é que o primeiro aborda uma produção *Make-to-Stock* e o segundo uma política *Make-to-Order*. Os atributos de *performance* de tais processos e suas métricas são:
- RL: *Schedule Achievement* (RL.3.49), que mede o percentual de tempo que uma fábrica leva para atingir o volume de produção em relação ao tempo que se determinou no planejamento;
 - RS: *Schedule Production Activities Cycle Time* (RS.3.123), que consiste no montante de tempo que se leva para a programação das atividades de produção;
 - CO: *Peak Time Energy Use* (CO.3.167), que consiste no percentual do consumo total de energia de uma fábrica que ocorre durante os horários de pico regional, e *Cost to Schedule Production Activities* (CO.3.127), que totaliza os custos de programação das atividades de produção;
 - AM: *Capacity Utilization* (AM.3.9), indicador que objetiva aferir o uso da capacidade produtiva de uma planta, ou seja, o quanto se está aproveitando da capacidade produtiva existente para a produção de bens ou serviços.
- b) processo D2.3: envolve o planejamento do atendimento dos pedidos dos clientes por meio da reserva dos itens já produzidos e existentes em estoque e o volume de produção que está programado, além disso, esse processo também contempla a definição de datas de entrega. Envolve três atributos de *performance*, conforme se descreve a seguir:
- RL: *Percentage of Orders Delivered in Full* (RL.2.1), que representa o percentual de pedidos atendidos integralmente, e *Delivery Performance to Customer Commit*

Date (RL.2.2), que aponta o percentual de pedidos que foram entregues para os clientes dentro do prazo acordado;

- RS: *Order Fulfillment Dwell Time* (RS.3.94), que é a métrica que totaliza os *lead times* ocorridos durante o processo de atendimento de um pedido sem que nenhuma atividade ocorra devido a imposições do cliente, e *Reserve Resources and Determine Delivery Date Cycle Time* (RS.3.116), que acumula o valor médio do tempo investido nas atividades de reserva de recursos e de determinação das datas de entrega;
- CO: *Cost to Reserve Resources and Determine Delivery Date* (CO.3.120), que representa os custos associados com o processo D.2.3.

Esses processos, atributos de *performance* e métricas destacados no SCOR por apresentarem interface com técnicas de otimização aplicadas à melhoria do PCP serão muito úteis no momento de validação do modelo proposto por esta pesquisa.

2.3 HEURÍSTICAS PARA A SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE DIMENSIONAMENTO DE LOTES

Uma definição bastante clássica de heurísticas é apresentada por Nicholson (1971) que as define como métodos para resolver problemas com base em uma abordagem intuitiva na qual a estrutura do problema pode ser interpretada e explorada de modo inteligente para a obtenção de uma solução razoável. Observa-se que, apesar de clássica, essa definição ainda é atual, pois não difere muito de definições mais recentes: El-Ghazali (2009) as define como métodos que permitem a obtenção de boas soluções em um intervalo de tempo razoável para problemas de grandes instâncias; Hillier e Liberman (2013) definem um método heurístico como um procedimento que proporciona uma alta probabilidade de obtenção de uma boa solução viável para um determinado problema, sem garantia de otimalidade.

El-Ghazali (2009) classifica os métodos heurísticos em duas famílias: heurísticas específicas e metaheurísticas. Heurísticas específicas são adaptadas e construídas para solução de problemas específicos ou conjuntos particulares de instâncias, já as metaheurísticas são métodos mais abrangentes que podem ser aplicados a diferentes classes de problemas de otimização. Desse modo as metaheurísticas podem ser vistas como metodologias mais gerais que podem ser adaptadas para a resolução de diferentes problemas.

Por esse caráter mais abrangente, a metaheurística tornou-se uma das mais importantes técnicas no âmbito de otimização quando não se obtém bons resultados ao se trabalhar com métodos exatos (HILLIER; LIBERMAN, 2013). No âmbito dos problemas de dimensionamento de lotes, isso não é diferente, ao se observar o Quadro 1 resultante do trabalho de Karimi-Nasab e Seyedhoseini (2013), percebe-se que muitos dos autores utilizam e propõem metaheurísticas para a resolução de seus problemas – métodos como Recozimento Simulado (*Simulated Annealing*), Busca Tabu (*Tabu Search*), Busca em Vizinhança Variável (VNS - *Variable Neighborhood Search*), Algoritmos Genéticos (*Genetic Algorithms*) e Otimização por Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization*).

Mais especificamente para o CLSD, podem-se destacar as metaheurísticas propostas por Almada-Lobo (2007), Almada-Lobo, Oliveira e Carravilla (2008) e Almada-Lobo e James (2010).

Os trabalhos Almada-Lobo (2007) e Almada-Lobo, Oliveira e Carravilla (2008) apresentam uma metaheurística de Busca em Vizinhança Variável (VNS - *Variable Neighborhood Search*) para resolver o problema de dimensionamento de lotes de longo prazo na indústria de embalagens de vidro. Já em Almada-Lobo e James (2010), propõem-se duas metaheurísticas distintas para a solução do CLSD (modelado para apenas uma máquina): uma Busca Tabu e um VNS.

Almada-Lobo e James (2010) realizam testes computacionais comparando a Busca Tabu e o VNS propostos, avaliando o VNS como metaheurística mais adequada nas condições por eles testadas¹. Os autores ainda citam, como oportunidades futuras de pesquisa, a proposição de metaheurísticas VNS que contemplem o CLSD-PM. Nesse contexto, passa a ser bastante interessante que se explorem essas metaheurísticas na proposição do método de solução desse projeto de pesquisa.

O VNS consiste em uma proposição de Mladenović (1995) que se baseia na ideia de que se explorem sucessivamente estruturas de vizinhanças predefinidas a fim de se obterem melhores soluções. El-Ghazali (2009) cita que a premissa assumida por essa metaheurística decorre de fato de que, ao se usar várias estruturas de vizinhança em um procedimento de busca local, é possível a obtenção de diferentes ótimos locais, logo, maximizando a probabilidade de obtenção do ótimo global. O Algoritmo 1 contém o pseudocódigo geral de um VNS.

¹ Nesse caso é importante salientar que tal afirmação é válida para as condições de teste dos autores, caso contrário, estaríamos ignorando o conceito de *No Free Lunch* estabelecido por Wolpert e Macready (1997).

Algoritmo 1: Estrutura Geral de um VNS

```

1  Entrada: conjunto de vizinhanças  $N_k$  para ( $k = 1$  até  $K_{\text{máx}}$ ) para a fase de Shaking
2  Obtenha uma solução inicial  $x = x_0$ 
3  Enquanto não for atingido um critério de parada, faça
4       $k \leftarrow 1$ 
5      Enquanto ( $k \leq k_{\text{máx}}$ ), faça
6          Shaking: selecione uma solução  $x'$  aleatória da  $k^{\text{ésima}}$  vizinhança  $N_k(x)$  de  $x$ 
7           $x'' \leftarrow$  busca local ( $x'$ )
8          Se  $f(x'') < f(x)$ , então
9               $x \leftarrow x''$ 
10              $k \leftarrow 1$ 
11          Senão, faça
12               $k \leftarrow k + 1$ 
13          Fim Se
14      Fim Enquanto
15  Fim Enquanto
16  Saída: melhor solução  $x$  encontrada

```

Fonte: Adaptado El-Ghazali (2009)

Percebe-se, conforme sequência do Algoritmo 1, que, primeiramente, é necessário que se liste e se ordene um conjunto de estruturas de vizinhança. Então cada iteração do VNS é composta por três grandes passos: perturbação ou *shaking*, busca local e troca de vizinhança. Na fase de *shaking*, estocástica, um vizinho da solução incumbente x – aqui denominado de x' – para estrutura N_k é escolhido aleatoriamente, então aplica-se um procedimento de busca local sobre esse vizinho x' , a fim de que se encontre o ótimo local x'' . Note que, além das N_k estruturas de vizinhança definidas para a etapa de perturbação, é necessário que se estabeleça claramente um conjunto de estruturas de vizinhanças para os quais irá se proceder com a busca local. Caso x'' seja melhor que a solução incumbente x , substitui-se x por x'' e volta-se a explorar a primeira estrutura de vizinhança, caso contrário deve-se atualizar $k = k+1$ e continuar com o processo iterativo para o novo conjunto de vizinhanças. A Figura 7 ilustra o mecanismo de funcionamento do VNS para um problema de minimização.

Figura 7 – Princípio da Busca em Vizinhança Variável ilustrada para um problema de minimização
Fonte: Adaptado Hansen, Mladenović e Pérez (2008)

Hansen, Mladenović e Pérez (2008) realizam uma ampla revisão sobre variações e aplicações do VNS desde a sua primeira publicação. Após quase uma década do uso dessa metaheurística, os autores destacam alguns fatos que embasam a obtenção de sucesso pelo método em diversos estudos:

- **fato 1:** um ótimo local em relação a uma estrutura de vizinhança, não é necessariamente um ótimo local para outra estrutura de vizinhança;
- **fato 2:** um ótimo global é um ótimo local em relação à qualquer estrutura de vizinhança;
- **fato 3:** para diversos problemas, os ótimos locais em relação a uma ou a diversas estruturas de vizinhança estão relativamente próximos (esse fato 3 consiste em uma observação empírica dos autores).

Assim, fica bastante evidente que os fatos levantados por esses autores reforçam a premissa mencionada no trabalho de El-Ghazali (2009) ao definir essa metaheurística. Hansen, Mladenović e Pérez (2008) destacam ainda a simplicidade e a necessidade de poucas estruturas de vizinhança para a aplicação bem sucedida do VNS, o que o diferencia de outras metaheurísticas que exigem estruturas de implementação eventualmente mais sofisticadas e custosas computacionalmente.

Nesse mesmo trabalho, os autores destacam ainda a aplicação bem sucedida do mesmo por Almada-Lobo, Oliveira e Carravilla (2008) na resolução do problema de dimensionamento de lotes de longo prazo da indústria de embalagens de vidro.

Desse modo, fica bastante evidente que o VNS é uma boa opção para proposição de um método de solução do problema estudado por esse trabalho. Com base na estrutura geral do VNS definida nessa revisão bibliográfica, será proposto, mais adiante, um VNS para o problema do dimensionamento e sequenciamento de lotes de curto prazo com restrições tecnológicas na indústria de embalagens de vidro.

3 MÉTODO DE PESQUISA

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Esta pesquisa está intrinsecamente relacionada com Pesquisa Operacional (PO), definida por Arenales *et al.* (2007) como a abordagem científica para auxiliar a tomada de decisões buscando a otimização de projeto, planejamento e operação de sistemas. Morabito e Pureza (2010) citam que, por apresentar tais características, a PO também é chamada de ciência da gestão ou administração (*management science*), ciência da decisão (*science of decision making*), ou ciência e tecnologia de decisão. Logo, assim como a maioria dos trabalhos que têm interface com a PO, é utilizada a metodologia de modelagem quantitativa.

Morabito e Pureza (2010, p. 167) definem modelos quantitativos como

“[...] modelos abstratos descritos em linguagem matemática e computacional, que utilizam técnicas analíticas (matemáticas, estatísticas) e experimentais (simulação) para calcular valores numéricos das propriedades do sistema em questão, podendo ser usados para analisar os resultados de diferentes ações possíveis no sistema. Modelos quantitativos compreendem um conjunto de variáveis de controle que variam em um domínio específico e variáveis de desempenho que inferem a qualidade das decisões obtidas a partir de relações causais e quantitativas definidas entre essas variáveis”.

Na esfera dos problemas de modelagem quantitativa, este trabalho se enquadra na classe de problemas de modelagem axiomática normativa, conforme classificação de Bertrand e Fransoo (2002). Essa classe pode ser atribuída ao trabalho pelos seguintes motivos: trata-se de uma pesquisa axiomática, pois a pesquisa parte de uma situação idealizada que é a proposição de um modelo e de uma metaheurística que preencham uma lacuna da literatura e, somente em uma segunda etapa, o trabalho passa a ter adesão com um problema real estudado para fins de validação; e a pesquisa axiomática se enquadra na classe normativa, pois os resultados deste trabalho permitem a obtenção de uma solução para o modelo de programação inteira mista proposto que implica em uma tomada de decisão mais assertiva no planejamento do negócio de embalagens de vidro.

A seguir são detalhadas as etapas desta pesquisa no âmbito do processo de modelagem matemática.

3.2 ETAPAS DA PESQUISA

Esta seção secundária subdivide-se em: 3.2.1, seção terciária que descreve as etapas gerais de um trabalho de modelagem quantitativa, e 3.2.2, seção terciária que detalha as etapas específicas desenvolvidas neste trabalho científico.

3.2.1 ETAPAS GERAIS DA MODELAGEM QUANTITATIVA

Morabito e Pureza (2010) descrevem as cinco etapas gerais para a execução da modelagem quantitativa em PO: definição do problema, construção do modelo, solução do modelo, validação do modelo e implementação da solução. A Figura 8, adaptada de Mitroff *et al.* (1974), ilustra tais etapas e, na sequência, cada uma dessas etapas é apresentada com um maior nível de detalhe.

Figura 8 – Modelagem quantitativa em Pesquisa Operacional
Fonte: Adaptado de Mitroff *et al.* (1974)

3.2.1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Essa etapa é fundamental para o sucesso de uma pesquisa envolvendo modelagem quantitativa, pois, caso o problema seja mal delimitado, busca-se uma solução ótima para o problema incorreto, ou seja, para um problema que não condiz com a situação real enfrentada. As principais atividades executadas nesse ponto da pesquisa consistem na definição do escopo do problema em estudo, das limitações presentes, bem como das decisões e dos objetivos de interesse envolvidos, o que viabiliza a obtenção de um modelo conceitual que irá embasar todo o trabalho, daí a criticidade intrínseca a esse processo.

3.2.1.2 CONSTRUÇÃO DO MODELO

Trata-se do processo de estruturar todas as informações e estimativas coletadas na primeira fase e utilizá-las para avaliação ou desenvolvimento de um modelo matemático para o problema. Em geral, a literatura existente sobre problemas correlatos é uma boa fonte de informações para alicerçar a construção do modelo. Além disso, é fundamental a coleta de dados para definir parâmetros para o problema e a realização de análises e experimentos que permitam verificar o quanto esse modelo quantitativo corresponde, de fato, ao problema delineado pelo modelo conceitual.

3.2.1.3 SOLUÇÃO DO MODELO

Consiste na utilização de métodos de resolução e algoritmos com o apoio de *software* e *hardware* adequados para que se encontre a solução do modelo matemático. Essa fase usualmente é mais bem definida para estudos em Pesquisa Operacional, para os quais há ferramenta para solução dos problemas com considerável precisão.

3.2.1.4 VALIDAÇÃO DO MODELO

A validação é a averiguação da adequação do modelo proposto ao problema definido, ou seja, uma análise para checar se o modelo descreve de forma adequada o comportamento do sistema real. Um procedimento eficaz para tal verificação é comparar os resultados do modelo com dados históricos. Uma observação válida, nesse caso, é o fato de que a solução do modelo terá validação altamente influenciada pela qualidade dos dados de entrada e pelos parâmetros anteriormente definidos.

Destaca-se na literatura o esquema de validação de modelos de PO, proposto por Oral e Kettani (1993), que se baseia em um tetraedro imaginário e em suas facetas. Os autores consideram que há quatro elementos básicos correlatos que caracterizam um problema de PO – Situação Gerencial, Modelo Conceitual, Modelo Formal e Decisão – e propõem que cada um desses elementos constitui vértices de um tetraedro imaginário. Dessa forma, uma análise tridimensional contemplando três desses vértices, seria o suficiente para caracterização da maioria dos problemas de PO, ou seja, o problema seria classificado como pertencente a uma das facetas do tetraedro. A Figura 9 ilustra o tetraedro de validação proposto.

Figura 9 – Tetraedro de validação de problemas de Pesquisa Operacional
Fonte: Adaptado de Oral e Kettani (1993)

A partir daí, Oral e Kettani (1993) definem as quatro facetas:

- a) Faceta Protótipo: formada pelos vértices Situação Gerencial, Modelo Formal e Decisão. Caracteriza problemas nos quais o Modelo Conceitual, em geral, está em segundo plano por se tratarem de problemas já bastante conhecidos e estudados como, por exemplo, o Problema do Caixeiro Viajante;
- b) Faceta Descritiva: formada pelos vértices Situação Gerencial, Modelo Conceitual e Modelo Formal. Nos problemas classificados como pertencentes à essa faceta, a decisão não é o foco principal, a ênfase está sobre o entendimento do sistema ou da organização sobre os quais está alocada a Situação Gerencial;
- c) Faceta Pragmática: formada pelos vértices Situação Gerencial, Modelo Conceitual e Decisão. Em geral, essa faceta abrange problemas demasiadamente complexos, para os quais a construção do modelo formal não necessariamente é a melhor alternativa para a tomada de decisão;
- d) Faceta Teórica: formada pelos vértices Modelo Conceitual, Modelo Formal e Decisão. Aplica-se a casos para os quais se assume que o Modelo Conceitual já representa a Situação Gerencial com considerável fidelidade, logo o foco maior é aplicado na busca de um Modelo Formal e na construção de métodos de solução;

Em um segundo momento, os autores definem as principais práticas de validação de problemas em PO, que serão utilizadas para viabilizar a validação de cada uma das quatro facetas do tetraedro:

- a) validação da formulação: validação do grau de relevância das proposições e teorias do modelo formal, bem como da sua capacidade de representação da situação gerencial;
- b) validação da legitimidade: consiste no uso de uma avaliação equivalente ao conjunto das validações experimental e lógica, porém realizada com base na percepção de envolvidos com uma situação gerencial real e não com base no modelo formal. Avalia a adequação da solução obtida e aceitação do modelo em um caso real;
- c) validação da competência: avaliação da representatividade, da usabilidade, da sinergia proporcionada e do custo envolvido na solução do modelo na tomada de decisão. Assemelha-se ao processo de validação operacional, porém se diferencia por apresentar a sinergia com o negócio sob um aspecto mais amplo;
- d) validação da verificação: validação de um processo de verificação de um modelo e de suas soluções, a fim de se realizarem os processos de validação conceitual e operacional em uma pesquisa que não envolve uma situação gerencial real;

- e) validação experimental: validação do método de solução empregado sobre o modelo formal, bem como da qualidade das soluções proporcionadas pelo método;
- f) validação operacional: avalia a viabilidade e a efetividade da operacionalização do modelo e implementação de suas soluções. Considera-se o tempo de solução, os recursos necessários para a solução e o quão distante essa se encontra de uma decisão;
- g) validação conceitual: pondera a qualidade do modelo conceitual, ou seja, consiste na aferição de quanto esse modelo capta a percepção dos principais atores envolvidos no problema gerencial;
- h) validação lógica: avaliação do processo de transformação do modelo conceitual em modelo formal, ou seja, averigua-se a fidelidade do modelo formal em relação ao modelo conceitual desenhado;
- i) validação de dados: validação dos dados do modelo avaliando suficiência, acurácia, manutenibilidade, confiabilidade e custo dos dados.

Por fim, Oral e Kettani (1993) correlacionam as facetas do tetraedro com diferentes práticas de validação de modelos em PO, conforme ilustrado no Quadro 3:

- a) Faceta Protótipo: devem-se utilizar a validação da formulação, a validação experimental, a validação operacional e a validação de dados. A validação experimental pode ser substituída pela validação da legitimidade e a validação operacional pode ser substituída pela validação da verificação;
- b) Faceta Descritiva: devem-se utilizar a validação da legitimidade, a validação operacional, a validação conceitual e a validação de dados. As validações operacional e conceitual podem ser substituídas pela validação da verificação;
- c) Faceta Pragmática: devem-se utilizar a validação da competência, a validação conceitual, a validação lógica e a validação de dados. A validação conceitual pode ser substituída pela validação da verificação e a validação lógica pode ser substituída pela validação da legitimidade;
- d) Faceta Teórica: devem-se utilizar a validação da verificação, a validação experimental, a validação lógica e a validação de dados. As validações lógica e experimental podem ser substituídas pela validação da legitimidade.

TIPOS DE VALIDAÇÃO		Validação da formulação	Validação da legitimidade	Validação da competência	Validação da verificação	Validação experimental	Validação operacional	Validação conceitual	Validação lógica	Validação de dados
FACETAS	Faceta Protótipo	X	▲		○	X▲	X○			X
	Faceta Pragmática		X		○		X○	X○		X
	Faceta Descritiva		▲	X	○			X○	X▲	X
	Faceta Teórica		▲		X	X▲			X▲	X
LEGENDA										
X	Indica correspondência simples entre o tipo de validação indicado na coluna do quadro e a faceta do tetraedro representada pela linha.									
▲	Indica que o tipo de validação indicado na coluna pode atender a faceta do tetraedro da linha correspondente, em substituição ao tipo de validação indicado na mesma linha por X▲.									
X▲	Indica correspondência entre o tipo de validação indicado na coluna e a faceta da respectiva linha, com possibilidade de substituição desse tipo de validação por outro que esteja indicado por um símbolo ▲ no cruzamento desta mesma linha com outra coluna.									
○	Indica que o tipo de validação indicado na coluna pode atender a faceta do tetraedro da linha correspondente, em substituição ao tipo de validação indicado na mesma linha por X○.									
X○	Indica correspondência entre o tipo de validação indicado na coluna e a faceta da respectiva linha, com possibilidade de substituição desse tipo de validação por outro que esteja indicado por um símbolo ○ no cruzamento desta mesma linha com outra coluna.									

Quadro 3 – Correlação entre facetas do tetraedro e práticas de validação em Pesquisa Operacional
Fonte: Adaptado de Oral e Kettani (1993)

3.2.1.5 IMPLEMENTAÇÃO DA SOLUÇÃO

Nessa última etapa, procura-se implementar a solução a um problema real de uma empresa ou organização, com a tradução da solução do modelo em decisões dentro do ambiente de estudo. Essa etapa pode demandar muito tempo, principalmente para os casos em que é necessária a implantação de sistema computacional integrado aos *softwares* e bases de dados já utilizados pela organização envolvida.

É cabível a observação de que as soluções dos modelos apoiam o processo de tomada de decisão em uma organização, buscando uma maior assertividade, porém não substitui a existência de um tomador de decisão, já que em geral problemas envolvem fatores subjetivos não mensuráveis que não constam em um modelo suportados por matemática computacional.

3.2.2 ETAPAS ESPECÍFICAS DA PESQUISA

Com base no *framework* geral para a realização de trabalhos de modelagem quantitativa apresentado em 3.2.1, definem-se as etapas específicas de realização desta pesquisa, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Etapas do trabalho de pesquisa

Fonte: Autoria própria

Assim, a pesquisa aborda um processo de modelagem matemática desde a definição do problema até a solução pelo modelo, com base na metaheurística proposta. Nota-se que a etapa de implementação da solução não está inclusa neste trabalho, pois o tempo necessário para disponibilizar um *software* de otimização integrado com o sistema *Enterprise Resource Planning* (ERP) da empresa estudada excederia o tempo hábil disponível para a execução da pesquisa; porém observa-se que, com o resultado final obtido, a empresa já tem um modelo customizado, devidamente parametrizado em conformidade com sua situação atual e validado pela gestão industrial, além de possuir um método eficaz e eficiente de solução do problema, bastando investir tempo e recursos de valor financeiro relativamente baixo em um projeto de Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC) para consolidar todo este trabalho, integrando seu resultado com a rotina já existente no ERP.

A etapa de definição do problema foi conduzida em conformidade com o que se propõe para tal fase do trabalho no *framework* geral do método. Foi definida uma fábrica para auxiliar na condução do estudo. Definiu-se que o modelo teria por objetivo minimizar as perdas decorrentes de *setup*, bem como a redução do nível de estoques e dos atrasos de entregas (que podem impactar até mesmo em perda de vendas) por meio de um melhor dimensionamento do volume dos lotes de produção e de um planejamento otimizado dos mesmos nas linhas da fábrica. A construção do modelo conceitual foi baseada na literatura existente sobre dimensionamento de lotes, com atenção especial para os modelos já existentes na indústria vidreira; porém, houve um foco intenso em incorporar aspectos reais dessa indústria a esse modelo, com o objetivo de se mapear as restrições tecnológicas inerentes ao processo de fabricação de embalagens de vidro. Dessa forma, o modelo quantitativo obtido se diferencia dos demais, buscando obter um resultado mais verossímil.

Para a construção do modelo matemático, o processo não foi muito diferente. Com base na literatura, definiu-se trabalhar com um modelo de programação inteira mista, que consiste na abordagem mais tradicional e mais utilizada para esse fim como foi evidenciado na revisão bibliográfica. Após tal definição, a construção do modelo teve como base o modelo conceitual, o modelo CLSD-PM e uma grande quantidade de informações coletadas em campo junto à empresa estudada. Nesse caso, as informações variaram desde dados estruturados a percepções identificadas com o auxílio de entrevistas realizadas com gestores e especialistas da organização.

Já na etapa de validação do modelo, foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre metodologias de validação em PO e adotou-se como referência o tetraedro proposto por Oral e Kettani (1993) para realização desse processo. Desse modo, foi possível a realização de uma validação ampla do modelo proposto, que ainda conta com o subsídio de testes computacionais com instâncias de um problema real, de aplicação de questionários a especialistas da indústria de embalagens de vidro com base nos resultados obtidos e de uma análise desses mesmos resultados sob o âmbito do modelo SCOR. Nesses testes computacionais para resolução do modelo, trabalhou-se com *Branch-and-Cut* de um dos *solvers* estado-da-arte para Programação Inteira Mista: o pacote comercial IBM ILOG CPLEX Optimization Studio Versão 12.5.

Para a solução do modelo obtido, foi realizado um trabalho inicial de levantamento bibliográfico das heurísticas mais indicadas para a resolução do problema de dimensionamento de lotes, observando-se uma considerável probabilidade de obtenção de bons resultados ao se trabalhar com uma metaheurística VNS. Com base nesse método, foi elaborada a metaheurística para solução do modelo proposto e, por fim, para a validação do método de solução, foram

realizados testes computacionais comparando os resultados obtidos pela metaheurística com os resultados obtidos por meio do uso do pacote comercial CPLEX.

4 A INDÚSTRIA DE EMBALAGENS DE VIDRO

A produção de embalagens de vidro é bastante particular, apresentando desde processos comuns à fabricação de outros produtos de vidro (como composição e fusão) a processos específicos (como a conformação e a aplicação de tratamentos superficiais). A indústria de embalagens de vidro apresenta um regime de produção contínua, com linhas operando em tempo integral durante os sete dias da semana. A Figura 11 ilustra uma visão geral desse processo e, a seguir, suas etapas são explicadas com um maior nível de detalhe.

Figura 11 – Visão geral do processo de fabricação de embalagens de vidro

Fonte: Adaptado de Kovacec, Pilipovic e Stefanic (2010)

As matérias-primas utilizadas na produção são, basicamente, sílica, carbonatos de sódio, calcita, dolomita, feldspatos e caco de vidro de fornecedores externos ou reaproveitado do próprio processo. Outras matérias-primas podem ser utilizadas para atribuir características especiais ao vidro, como sua coloração; um exemplo bastante comum é a adição de cromo na composição a fim de se obter o denominado vidro verde. Todas essas matérias-primas são colocadas em misturadores, formando a composição do vidro que é transportada ao forno por meio de correias transportadoras, sendo a enfora realizada de modo controlado. O forno de fusão trabalha em torno de 1650°C, fundindo a composição e a transformando na massa de vidro que alimenta as diversas linhas de produção de embalagem (KOVACEC; PILIPOVIC; STEFANIC, 2010).

A massa de vidro escorre por gravidade do forno até as máquinas responsáveis por sua conformação, denominadas Máquinas IS (do inglês, *Individual Section*), em canais de tijolos

refratários, denominados fornecedoras. Tais canais são importantes para a determinação da qualidade das embalagens produzidas, pois realizam trocas térmicas com o vidro, sendo responsáveis pela sua homogeneidade térmica. Cada linha de produção é alimentada por uma fornecedora e possui uma máquina conformadora. Ao término do canal de refratários há um conjunto denominado *feeder* que é responsável por transformar a massa de vidro em gotas que alimentam a máquina IS. Basicamente, esse conjunto possui um tubo cerâmico que controla o fluxo de vidro de acordo com a altura na qual é posicionado e que mantém o condicionamento do vidro obtido nas fornecedoras por apresentar movimento de rotação, um pino refratário que realiza um movimento vertical empurrando a massa de vidro existente no tubo cerâmico contra uma arruela refratária, com um ou mais orifícios pelos quais o vidro escorre e, por fim, por um aparelho mecânico ou servo-operado de tesoura que possui lâminas metálicas refrigeradas que transformam o fio de vidro que sai da arruela em gotas que abastecem o processo produtivo. Abaixo do *feeder* existe uma plataforma com um aparelho denominado distribuidor, que em conjunto com canais defletores, entrega as gotas de vidro às diversas seções que compõem a máquina de conformação de vidro (KOVACEC; PILIPOVIC; STEFANIC, 2010).

É importante observar, na máquina IS, que cada gota se transforma em uma garrafa ou pote. Nota-se ainda que o número de orifícios da arruela refratária determina quantas gotas alimentam cada seção da máquina, sendo possível fabricar de um a quatro artigos por seção de acordo com a configuração escolhida. A Figura 12 ilustra a sequência do trabalho que ocorre no mecanismo de *feeder* para formação da gota.

Figura 12 – Formação da gota na fabricação de embalagens de vidro

Fonte: Adaptado de Kovacec, Pilipovic e Stefanic (2010)

Na sequência desse processo produtivo, as gotas chegam às seções da máquina IS. Almada-Lobo (2007) cita as quatro principais características desse tipo de equipamento:

- a) o número de seções individuais, tipicamente variando de seis a vinte (uma informação complementar nesse tópico é que duas máquinas IS podem ser montadas lado a lado formando uma configuração denominada “máquina *tandem*”, o que permite um aumento da flexibilidade produtiva com a fabricação de dois artigos na mesma linha, porém com as restrições técnicas impostas pela fornecedora);
- b) o número de cavidades por seção (de acordo com o número de gotas que se irá trabalhar: simples gota, dupla gota, tripla gota ou quádrupla gota);
- c) a distância entre centros das cavidades nas quais se posicionam os moldes que recebem as gotas ($4\frac{1}{4}$ ”, 5”, $5\frac{1}{2}$ ” ou $6\frac{1}{4}$ ”);
- d) o tipo de processo de fabricação de embalagens no qual operam: Soprado-Soprado (BB, do inglês *Blow-Blow*) ou Prensado-Soprado (PB, do inglês *Press-Blow*). De forma geral, as máquinas de conformação podem operar com ambos os processos com algumas adaptações e configurações de *setup*.

As máquinas IS são máquinas de conformação pneumáticas e as mais utilizadas no processo vidreiro; cabe à observação de que os grandes fabricantes desse tipo de equipamento já trabalham para o lançamento de soluções mais avançadas tecnologicamente que ainda têm de amadurecer no mercado, como, por exemplo, a Máquina de Conformação Servo-Eletrônica (conhecidas no mercado como máquinas NIS).

Conforme já mencionado, a fabricação de embalagens de vidro nesses equipamentos pode ocorrer por dois processos, BB e PB, sendo que o segundo se divide em Prensado-Soprado e Prensado-Soprado Boca Estreita, dependendo do artigo que se irá produzir, potes ou garrafas, respectivamente. A Figura 13 delinea cada um desses processos de conformação.

Figura 13 – Processos de conformação para fabricação de embalagens de vidro

Fonte: Adaptado de Almada-Lobo (2007)

As etapas gerais do processo BB são:

- carregamento: momento em que a gota chega à seção da máquina de conformação, onde é carregada em um pré-molde denominado bloco;
- compressão: injeta-se ar comprimido no bloco para a formação do gargalo;
- assopro do parison: injeta-se ar comprimido no bloco para a formação do esboço da garrafa, também conhecido como *parison*;
- transferência: consiste na transferência física do esboço da garrafa para seu molde final ou forma;
- assopro final: injeção de ar comprimido na forma com o esboço, para que se forme a garrafa;
- extração: para finalizar a conformação, a forma se abre e um mecanismo da máquina IS denominado alicate transporta a garrafa ou as garrafas, no caso de mais de uma gota, da máquina para uma esteira transportadora para continuidade do processo produtivo.

O processo PB é caracterizado por ser um processo de maior complexidade operacional, sendo tecnicamente mais desafiador parametrizá-lo. É um processo semelhante ao BB, porém com algumas singularidades, como se pode evidenciar no detalhamento de suas operações:

- a) carregamento: a gota chega ao bloco, porém, nesse caso, é depositada sobre um pino de prensagem;
- b) prensagem: no processo BB, o *parison* é formado por ar comprimido, já no PB, o mesmo é formado pelo movimento do pino de prensagem;
- c) transferência: sem diferenças em relação ao processo BB, a Figura 14 ilustra um *parison* oriundo de um processo PB pronto para ser transferido;
- d) assopro final: sem grandes diferenças em relação às suboperações do processo BB. Devido a algumas particularidades do processo PB, recursos adicionais podem ser utilizados nesse momento para aumentar a qualidade da garrafa ou pote produzido;
- e) extração: operação análoga à extração na conformação via processo BB, como mostra a Figura 15 .

Figura 14 – *Parison* obtido por processo de conformação Prensado-Soprado
Fonte: Kovacec, Pilipovic e Stefanic (2010)

Figura 15 – Operação de extração em processo de produção Prensado-Soprado
Fonte: Kovacec, Pilipovic e Stefanic (2010)

Após a conformação, as embalagens ainda passam por mais alguns processos intrínsecos a sua produção. Kovacec, Pilipovic e Stefanic (2010) descrevem uma primeira etapa de inspeção já na saída da máquina IS, que pode ser realizada ou não de acordo com os controles adotados pela unidade fabril. Os autores citam ainda: a aplicação do tratamento a quente que consiste na aplicação de uma camada em torno de 10 nanômetros de material cerâmico sobre a garrafa ou pote ainda quente; o processo de recozimento no qual os produtos passam por um processo de resfriamento controlado em um equipamento denominado archa para que se aliviem as tensões superficiais existentes no vidro conformado (usualmente, na saída da archa as garrafas passam por um segundo tratamento superficial denominado tratamento a frio); as inspeções e testes ópticos, mecânicos e eletrônicos realizados para eliminação de artigos que contenham trincas, deformações ou outros tipos de defeito.

Os processos descritos ocorrem paralelamente nas diferentes linhas de produção existentes na fábrica, cada uma com seu túnel de tratamento a quente, com sua archa ou forno de recozimento e a respectiva rampa de tratamento a frio localizado na saída desse forno, além de toda a estrutura composta por transportadores, mesas de acúmulo e máquinas de inspeção diversas de acordo com as necessidades do processo e com os artigos produzidos em cada linha, podendo, inclusive, haver ramificações das linhas produtivas na área fria para a eliminação de gargalos.

Terminado o processo de inspeção das embalagens, as linhas são munidas de paletizadoras, que formam e encaminham os *pallets* de produtos acabados para uma ou mais linhas específicas de embalagem desses *pallets*, a partir da qual os produtos já podem ser

enviados para o armazém ou diretamente para a expedição de acordo com a demanda existente. Eventualmente, pode haver alguma etapa adicional no processo produtivo como a decoração de garrafas e potes, como descrito por Almada-Lobo (2007), porém isso depende muito da estratégia adotada pela empresa produtora e não é *core-business* do ramo vidreiro. A Figura 16 complementa o fluxograma da Figura 11, mostrando a visão de linhas independentes alimentadas por um *batch* comum produzido no forno. Para total compreensão de tais figuras, cabe a observação de que dentro do ramo de produção de embalagens de vidro o processo se subdivide em duas grandes áreas – área quente e área fria – a primeira abrangendo do forno de fusão até a archa de recozimento, e a segunda o término da área quente até a linha de embalagem.

Figura 16 – Layout do processo de fabricação de embalagens de vidro
Fonte: Adaptado de Almada-Lobo (2007)

Com base nessa contextualização do processo produtivo da indústria vidreira, torna-se possível a identificação dos fatores que podem impactar diretamente o PCP de uma fábrica de embalagens de vidro sob o ponto de vista de operacionalização do plano de produção:

- a) a cor do vidro, já que um forno de fusão trabalha com uma única composição que alimenta todas as suas linhas (cada período contínuo de produção de embalagens de vidro em uma única cor é denominado de “campanha de produção”);

- b) a capacidade do forno em termos de toneladas de vidro fundido;
- c) a capacidade de cada linha em volume de produção de acordo com a capacidade de extração de vidro do forno pela fornecedora e pela máquina IS;
- d) a capacidade técnica da linha em produzir determinado artigo do portfólio que é principalmente atrelada à máquina IS instalada na linha, mas que também é influenciada por outros equipamentos e definições de projeto da linha;
- e) a sequência dos artigos que entram e saem da linha (trata-se de um problema que tem a característica de preparações ou *setups* dependentes da sequência) que pode ser considerado o principal fator de impacto no planejamento da produção vidreira, pois influencia na produção, em termos operacionais, de diversas maneiras:
 - dependendo do tipo de *setup* que ocorre de um artigo i para um artigo j na máquina k , tem-se um tempo de troca mecânica da máquina (T1), mas há também um tempo de aquecimento da produção ou tempo de *ramp-up* (T2), no qual a máquina de conformação opera com um rendimento de produção inferior ao seu rendimento padrão. É cabível a observação de que trocas que envolvem parametrizações mais complexas da máquina IS como a troca de um artigo produzido em simples gota para um artigo fabricado em dupla gota ou a troca de família de artigos produzidos (nesse caso as famílias seriam BB e PB) penalizam o processo de maneira mais assídua tanto em T1 quanto em T2;
 - além das perdas de T1 e T2 associadas com a sequência de produção em cada máquina, uma troca de fabricação em determinada linha produtiva pode impactar indiretamente em perdas de qualidade nas demais linhas, esse ponto envolve maior complexidade, pois aborda questões bastante técnicas da produção de embalagens. O que empiricamente se percebe nesse tipo de indústria é que para os casos nos quais há um *setup* em uma determinada linha k que impacta em uma variação muito brusca do vidro que se consome na fornecedora k para alimentar a produção do artigo que entra na máquina IS, o vidro perde sua homogeneidade térmica nas demais fornecedoras visto que todas são alimentadas por uma única batelada ou *batch* de vidro fundido no forno.

5 O MODELO PROPOSTO

Este capítulo tem como objetivo apresentar o modelo matemático para o caso prático estudado da indústria de embalagens de vidro. Para isso, são apresentados os temas:

- a) definição do modelo conceitual;
- b) o modelo de dimensionamento de lotes proposto.

5.1 DEFINIÇÃO DO MODELO CONCEITUAL

Com base nas características da indústria de embalagens de vidro descritas no Capítulo 4, é possível desenhar um modelo conceitual que proporcione o atingimento dos objetivos desse trabalho.

Por se tratar de um modelo de otimização do dimensionamento e sequenciamento de lotes de curto prazo para a indústria de embalagens de vidro, a abrangência do mesmo será o planejamento da produção de um forno para um determinado horizonte de planejamento. Dessa forma, o modelo conceitual representa o problema que uma indústria de embalagens enfrenta após ter definido a cor na qual esse forno irá trabalhar em um certo intervalo de tempo. Essa decisão referente a cor pode ser previamente tomada, por exemplo, utilizando o modelo de longo prazo proposto por Almada-Lobo (2007) e Almada-Lobo, Oliveira e Carravilla (2008).

O problema é como otimizar o dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção desse forno nesse horizonte de planejamento e possui as seguintes características:

- objetivo de minimizar as perdas de produção, o nível de estoque e o *backlogging* existente para o plano de produção de uma fábrica em um horizonte de planejamento de um mês;
- observância à extração máxima ou capacidade do forno;
- conformidade com a política geral dessas empresas na qual as linhas não podem apresentar ociosidade, ou seja, sempre tem de haver produção programada;
- respeito à capacidade técnica de cada linha de produção, sendo que cada máquina de conformação está apta a produzir alguns dos artigos do portfólio da fábrica, devido à restrições tecnológicas impostas pelo projeto e pelo conjunto de equipamentos existentes nas linhas como um todo. Além disso, o rendimento e as velocidades de

produção de cada artigo em cada máquina IS têm de ser respeitados, em função das condições de cada máquina e da extração de cada fornecedora;

- definição do dia como unidade de tempo e respeito à condição de que haja, no máximo, um limitante superior de *setups* por período – devido aos recursos e às condições operacionais existentes na fábrica;
- observância às perdas de produção decorrentes dos tempos T1 e T2 de uma determinada linha pós troca de fabricação, caracterizadas em um contexto de *setup* dependente da sequência e consideradas no volume de produto final obtido nesses períodos;
- penalização do rendimento das demais linhas de produção, em caso de *setups* com bruscas variações de extração, tanto na função objetivo quanto na quantidade de embalagens produzida diariamente;
- ponderação da capacidade de estocagem da fábrica;
- as demandas diárias, os níveis de estoque no início do horizonte de planejamento, as informações técnicas do forno e de cada linha, bem como as informações referentes aos impactos das trocas de fabricação (T1, T2 e perdas de produtividade por variação de extração) são parâmetros de entrada fornecidos ao modelo;
- o programa de produção, as perdas de produção em toneladas de vidro, os níveis de estoques e o *backlogging* são fornecidos pelo modelo como *output*.

A Figura 17 compila tais características e ilustra o modelo conceitual desta pesquisa.

Figura 17 – Ilustração do modelo conceitual definido para o problema de pesquisa
Fonte: Autoria própria

5.2 O MODELO DE DIMENSIONAMENTO DE LOTES PROPOSTO: CLSD-GCST (CAPACITATED LOT SIZING AND SCHEDULING PROBLEM FOR GLASS CONTAINERS SHORT TERM PLANNING)

Conforme mencionado na Seção 2.1, na revisão bibliográfica sobre os modelos de dimensionamento de lotes, a inspiração para o modelo proposto nessa pesquisa será o modelo CLSD-PM apresentado por James e Almada-Lobo (2011). Como trata-se de um modelo customizado para a resolução do problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção na indústria de embalagens de vidro, o mesmo foi nomeado CLSD-GCST – *Capacitated Lot Sizing and Scheduling Problem for Glass Containers Short Term Planning*.

O modelo CLSD-GCST encontra-se descrito a seguir.

Índices

- $t = 1, \dots, T$: períodos de produção, neste modelo considera-se o dia como unidade de tempo;
- $i = 1, \dots, N$: tipos de artigos produzidos;
- $j = 1, \dots, N$: tipos de artigos produzidos;
- $m = 1, \dots, M$: números de máquinas de conformação da fábrica.

Dados do Problema

- β : custo, em reais, por tonelada de vidro fundido;
- λ : custo, em reais, para manter uma tonelada de vidro em estoque por um período;
- Ω : custo, em reais, do atraso da entrega de uma tonelada de vidro por um período;
- θ : custo, em reais, do atraso acumulado após último período do horizonte de planejamento (no modelo proposto, esse tipo de atraso será considerado uma oportunidade de venda perdida);
- A : capacidade de armazenagem de artigos na fábrica, dada em toneladas de vidro;
- C : capacidade de fusão do forno, dada em toneladas de vidro;
- μ : número máximo preparações de máquina ou *setups* por período;
- d_{it} : demanda do artigo i no período t , informada em toneladas de vidro;
- ε_{mi} : taxa de extração² de vidro da máquina m ao produzir o artigo i , ou seja, a quantidade de vidro, em toneladas, que a máquina m consome do forno por unidade de tempo para produzir o artigo i ;
- p_{mi} : taxa de produção³ da máquina m ao produzir o artigo i , ou seja, a quantidade de artigos i , em toneladas de vidro bom, produzida pela máquina m por unidade de tempo;
- s_{mij} : T1 ou tempo de preparação mecânica (expresso em uma fração do período t corrente) em uma troca de fabricação na máquina m do artigo i para o artigo j ;
- r_{mij} : T2 ou tempo de *ramp-up* (expresso em uma fração do período t corrente) em uma troca de fabricação na máquina m do artigo i para o artigo j ;
- I_{0i} : estoque inicial do artigo i , em toneladas de vidro;
- b_{0i} : *backlog* inicial ou atraso de entregas inicial do artigo i , em toneladas de vidro;
- α_{0mi} : configuração inicial das máquinas, ou seja, para quais artigos cada uma das m máquinas está preparada no início do horizonte de planejamento;
- ω : tempo de produção que cada máquina m perde em um período (expresso em uma fração desse período) quando há uma troca de fabricação que altera

² Essa taxa de extração ε_{im} é obtida pelo produto do peso médio do artigo i , da sua velocidade de produção em artigos por unidade de tempo por seção da máquina m e do número de seções utilizado para sua fabricação.

³ Basicamente essa taxa de produção p_{mi} consiste no produto da extração ε_{im} pelo rendimento padrão que a máquina m consegue obter para o artigo i , conforme estabelecido pela norma técnica da empresa.

significativamente a extração de vidro do forno de fusão, ativando a variável de criticidade de troca de fabricação

Variáveis do Problema

- X_{mit} : fração do período corrente no qual a máquina m produz o artigo i no período t ;
- I_{it} : estoque do artigo i no início do período t , em toneladas de vidro;
- I'_i : estoque final (após o último período do horizonte de planejamento) do artigo i , em toneladas de vidro;
- B_{it} : *backlog* ou atraso de entregas do artigo i no início do período t , em toneladas de vidro;
- B'_i : *backlog* ou atraso final (após o último período do horizonte de planejamento) de entregas do artigo i , em toneladas de vidro (no modelo proposto, esse tipo de atraso será considerado uma oportunidade de venda perdida);
- δ_t : criticidade de uma troca de fabricação ocorrido no período t , de acordo com a variação de extração do forno resultante;
- α_{mit} : $\alpha_{mit} = 1$, se a máquina m está preparada para a produção do artigo i no início do período t , caso contrário, $\alpha_{mit} = 0$;
- Y_{mit} : $Y_{mit} = 1$, se a máquina m está preparada para a produção do artigo i durante o período t , caso contrário, $Y_{mit} = 0$;
- Z_{mijt} : $Z_{mijt} = 1$, se há uma troca de fabricação do artigo i para o artigo j na máquina m no início do período t , caso contrário, $Z_{mijt} = 0$.

Modelo Matemático

Minimizar:

$$\begin{aligned} & \beta \cdot \left\{ \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^T \left[\left(s_{mij} + \frac{r_{mij}}{2} \right) \cdot \max(p_{mi}, p_{mj}) \cdot Z_{mijt} \right] + \sum_{t=1}^T (\omega \cdot \delta_t) \cdot C \right\} \\ & + \lambda \cdot \left(\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T I_{it} + \sum_{i=1}^N I'_i \right) + \Omega \cdot \left(\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T B_{it} \right) + \theta \cdot \left(\sum_{i=1}^N B'_i \right) \end{aligned} \quad (5.1)$$

Sujeito à:

$$-B_{it} + I_{it} + \sum_{m=1}^M X_{mit} \cdot p_{mi} = d_{it} + I_{i(t+1)} - B_{i(t+1)} \quad i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T-1 \quad (5.2)$$

$$-B_{iT} + I_{iT} + \sum_{m=1}^M X_{mit} \cdot p_{mi} = d_{iT} + I'_i - B'_i \quad i = 1, \dots, N \quad (5.3)$$

$$\sum_{i=1}^N \alpha_{mit} = 1 \quad m = 1, \dots, M; \quad t = 1, \dots, T \quad (5.4)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N Z_{mijt} \leq \mu \quad t = 1, \dots, T; \quad i \neq j \quad (5.5)$$

$$Y_{mit} \leq \sum_{j=1}^N (Z_{mjit}) + \alpha_{mit} \quad m = 1, \dots, M; i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (5.6)$$

$$\sum_{j=1}^N (Z_{mjit}) + \alpha_{mit} = \sum_{j=1}^N (Z_{mijt}) + \alpha_{mi(t+1)} \quad m = 1, \dots, M; i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T-1 \quad (5.7)$$

$$\sum_{i=1}^N Y_{mit} = 1 \quad m = 1, \dots, M; \quad t = 1, \dots, T \quad (5.8)$$

$$\delta_t \geq \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left(\left\lfloor \frac{\varepsilon_{mi} - \varepsilon_{mj}}{10} \right\rfloor \cdot Z_{mijt} \right) \quad t = 1, \dots, T \quad (5.9)$$

$$\delta_t \geq \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left[\left\lfloor \frac{\varepsilon_{mi} - \varepsilon_{mj}}{10} \right\rfloor \cdot (-Z_{mijt}) \right] \quad t = 1, \dots, T \quad (5.10)$$

$$Y_{mit} - (\omega \cdot \delta_t) \leq \sum_{j=1}^N \left[\left(s_{mji} + \frac{r_{mji}}{2} \right) \cdot Z_{mjit} \right] + X_{mit} \leq \text{mínimo} [Y_{mit}; 2 - (\omega \cdot \delta_t) - Y_{mit}]$$

$$m = 1, \dots, M; i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (5.11)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^N (\varepsilon_{mi} \cdot Y_{mit}) \leq C \quad t = 1, \dots, T \quad (5.12)$$

$$\sum_{i=1}^N I_{it} \leq A \quad t = 1, \dots, T \quad (5.13)$$

$$\sum_{i=1}^N I'_i \leq A \quad (5.14)$$

$$I_{i1} = I_{0i} \quad i = 1, \dots, N \quad (5.15)$$

$$B_{i1} = b_{0i} \quad i = 1, \dots, N \quad (5.16)$$

$$\alpha_{mi1} = \alpha_{0mi} \quad m = 1, \dots, M; \quad i = 1, \dots, N \quad (5.17)$$

$$(X_{mit}, I_{it}, I'_i, B_{it}, B'_t) \in R_+, \delta_t \in Z_+, (Y_{mit}, \alpha_{mit}, Z_{mijt}) \in \{0,1\} \quad (5.18)$$

A função objetivo (5.1) visa a minimizar os custos, em reais, das perdas de produção por troca de fabricação nas linhas, dos níveis de estoque da fábrica, dos atrasos no decorrer do horizonte de planejamento e do atraso final de entrega de produtos acabados, que será considerado um volume de vendas perdido. As restrições (5.2) e (5.3) consistem no balanço de estoque para cada período e para o período final do horizonte de planejamento, respectivamente. As restrições (5.4) garantem que cada máquina inicie cada período preparada para somente um artigo e, em (5.5), garante-se que se respeite o número máximo de trocas de fabricação por período. As restrições (5.6) asseguram que uma máquina somente está apta a produzir um determinado artigo em um período, se ela já inicia o período preparada para aquela produção ou se há uma preparação dessa máquina para esse artigo no início do período. As restrições (5.7) correspondem às equações de balanço de preparação, incorporando a característica de carregamento da preparação entre períodos. Em (5.8), assegura-se que cada máquina está preparada para somente um artigo durante cada período. Por meio de (5.9) e (5.10), atribui-se um valor δ_t que penaliza a produção em todas as linhas quando há uma troca de fabricação que impacta em uma variação de extração de vidro fundido do forno em um valor superior a dez toneladas por dia. Este último conjunto de restrições foi baseado na análise do histórico dos últimos três anos de produção e na experiência dos técnicos vidreiros. O que se pode observar é que a cada dez toneladas de variação da extração do forno por uma troca de fabricação, penaliza-se a capacidade produtiva de toda a fábrica segundo uma determinada constante, que neste modelo é representada pelo parâmetro ω . As restrições (5.11) garantem que, se uma máquina está preparada para a produção de determinado artigo durante um período ($Y_{mit} = 1$), então a mesma produzirá esse artigo na maior fração (X_{mit}) do período possível, havendo somente o decréscimo do impacto de eventuais *setups* ocorridos no início do período (preparação mecânica da máquina, estabilização de produção e variações de extração do forno). Em (5.12), limita-se a produção diária à capacidade do forno. As restrições (5.13) e (5.14) asseguram que os níveis de estoque de cada período respeitam a capacidade física dos armazéns da fábrica. As restrições (5.15), (5.16) e (5.17) proporcionam a inserção dos dados iniciais de estoque, atraso e preparação das máquinas no problema. Em (5.18), define-se o domínio das variáveis de decisão do problema.

Instâncias baseadas em um problema real do CLSD-GCST foram resolvidas pelo *Branch-and-Cut* do pacote comercial CPLEX, conforme testes computacionais do Capítulo 7, e, com base nesses resultados e na metodologia de validação de Oral e Kettani (1993), procedeu-se com a validação do modelo, que encontra-se no Capítulo 8.

A seguir, no Capítulo 6, apresenta-se o método de solução proposto.

6 O MÉTODO DE SOLUÇÃO

O método de solução é proposto neste trabalho como alternativa à solução do problema sem que se necessite da utilização de pacotes comerciais, logo, representando uma opção de menor custo às empresas do setor. A fim de que fosse possível a disponibilização de uma ferramenta de simples interface, com a robustez necessária para a utilização em uma situação real e no intervalo de tempo disponível para esse projeto de mestrado, o método de solução proposto foi implementado na linguagem Visual Basic for Applications (VBA) e aplicado a planilhas do *software* Microsoft Excel, o que possibilita que a metaheurística seja facilmente utilizada por um usuário que tenha conhecimentos intermediários nesse programa (algo que é bastante comum entre os profissionais de Planejamento e Controle da Produção de empresas brasileiras, porém não se observa esse mesmo nível de conhecimento em relação à linguagens de programação ou *softwares* de otimização).

Conforme mencionado na Seção 2.3, na revisão bibliográfica sobre os heurísticas para a solução do problema de dimensionamento de lotes, a metaheurística *Variable Neighborhood Search* (VNS) será adotada para a solução do problema em questão.

Para a proposição de um VNS que resolva o problema delimitado pelo modelo CLSD-GCST, adotou-se uma codificação inteira para cada solução do problema, dada em função de variáveis Y_{mt} , que representam para qual artigo cada máquina m está preparada durante cada período t . A Figura 18, a seguir, ilustra uma solução do problema segundo esse esquema de codificação para um exemplo com $M = 3$ máquinas e $T = 7$ períodos.

PLANO DE PRODUÇÃO	PERÍODOS	1	2	3	4	5	6	7
	MÁQUINAS	ARTIGOS						
	1	8	8	8	8	6	31	31
	2	15	23	20	23	23	23	23
	3	5	5	5	5	5	5	5

Figura 18 – Exemplo da codificação adotada no método de solução
Fonte: Autoria própria

Inicialmente, propõe-se uma heurística construtiva para que, em um segundo momento, o VNS atue na melhoria de uma solução inicial de qualidade razoável. Para a compreensão dessa heurística construtiva, é importante que se definam alguns índices que são calculados durante a sua execução:

- Capacidade Disponível (t): trata-se da capacidade do forno disponível em um determinado período t , ao se levar em consideração a quantidade de vidro fundido extraída pelas M máquinas em decorrência do artigo para o qual estão preparadas durante um período.

$$CAPACIDADE_{DISPONÍVEL}(t) = C - \sum_{m=1}^M \varepsilon_{(m,Y_{mt})} \quad (6.1)$$

- Demanda Resultante (i, t): trata-se da soma da demanda do item i no período t com os atrasos de entrega acumulados para esse item até o mesmo período. Caso haja algum estoque desse item, o estoque é descontado no cálculo da demanda resultante.

$$DEMANDA_{RESULTANTE}(i, t) = d_{it} + B_{it} - I_{it} \quad (6.2)$$

- Índice de Prioridade (m, i, t): índice que pondera, para cada artigo i em cada período t , qual o valor da prioridade que a máquina m recebe para operacionalizar tal produção. Esse índice será utilizado no algoritmo construtivo para ordenar qual máquina tem prioridade na produção de alguns artigos selecionados da seguinte forma: quanto menor o valor do índice, maior a prioridade para que o item i seja processado na máquina m durante o período t . Sua fórmula de cálculo encontra-se a seguir e, basicamente, tende a penalizar as produções que implicam em maiores tempos de preparação de máquina (T1), estabilização de produção (T2) e variações mais bruscas na extração do forno, além de favorecer as máquinas que tenham maiores taxas de produção para o artigo i em questão. Para o cálculo desse índice, é definida a variável auxiliar α_{mt} , que representam para qual artigo cada máquina m está preparada no início de cada período t .

$$\text{ÍNDICE DE PRIORIDADE}(m, i, t) = \frac{S_{(m,\alpha_{mt,i})} + r_{(m,\alpha_{mt,i})}}{(1 + S_{(m,\alpha_{mt,i})} + r_{(m,\alpha_{mt,i})})} + \frac{|\varepsilon_{(m,\alpha_{mt})} - \varepsilon_{(m,i)}|}{(1 + \varepsilon_{(m,\alpha_{mt})} + \varepsilon_{(m,i)})} + \frac{1}{e^{p_{(m,i)}}} \quad (6.3)$$

O algoritmo construtivo calcula o valor das variáveis Y_{mt} para cada período t a cada iteração. Dessa forma, é possível que se obtenha uma solução factível x para o problema após a sua implementação. O algoritmo foi construído para a obtenção da factibilidade e, para as 36 instâncias testadas – obtidas de um problema real, essa condição foi constatada. Vale observar que, dependendo da instância, o algoritmo proposto pode não garantir a factibilidade do problema em relação às restrições (5.13) e (5.14) do modelo CLSD-GCST, que delimitam os níveis de estoque máximos para cada período. Nesse caso, teria que ser adicionado um

procedimento que modifique a solução x para diminuição dos níveis de estoque nos períodos que impedem a factibilidade. O procedimento construtivo, encontra-se descrito no Algoritmo 2.

Algoritmo 2: Heurística Construtiva Proposta

```

1   $t \leftarrow 1$ 
2  Enquanto  $(t \leq T)$ , faça
3     $\text{contador de preparações} \leftarrow 0$ 
4    Calcule Capacidade Disponível  $(t)$ 
5    Para  $(i = 1 \text{ à } N)$ , faça
6      Calcule Demanda Resultante  $(i, t)$ 
7    Fim Para
8    Ordene as Demandas Resultantes de forma decrescente
9    Para (Maior Demanda Resultante à Menor Demanda Resultante), faça
10     Se há algum  $(Y_{mt} = \emptyset)$ , então
11       Calcule Índice de Prioridade  $(m, i, t)$ 
12       Ordene os Índices de Prioridade de forma crescente
13       Para (Menor Índice de Prioridade ao Maior Índice de Prioridade), faça
14         Se  $\{(Y_{mt} = \emptyset) \text{ e } (p_{mi} > 0) \text{ e } [(Capacidade Disponível(t) + e_m, \alpha_{mt} - e_{mi}) \geq 0]\}$ , então
15           Se  $(\alpha_{mit} \neq i)$ , então
16              $Y_{mit} \leftarrow i$ 
17              $\text{contador de preparações} \leftarrow \text{contador de preparações} + 1$ 
18             Se  $\text{contador de preparações} = \mu$ , então
19               Para máquinas com  $(Y_{mt} = \emptyset)$ , faça
20                  $Y_{mt} \leftarrow \alpha_{mt}$ 
21               Fim Para
22             Fim Se
23             Senão, faça
24                $Y_{mt} \leftarrow \alpha_{mt}$ 
25             Fim Se
26           Fim Se
27         Fim Para
28       Fim Se
29     Fim Para
30     $t \leftarrow t + 1$ 
31  Fim Enquanto

```

A partir da solução inicial x , aplicou-se a metaheurística VNS descrita no Algoritmo 3 para o processo de otimização. Consiste em um algoritmo no qual foram definidas oito estruturas de vizinhança para a fase de *shaking*, sendo uma dessas vizinhanças também utilizada

para o procedimento de busca local. A busca local é do tipo *best improvement*, ou seja, busca-se o melhor vizinho ao se varrer toda a vizinhança. O algoritmo modifica a estrutura de vizinhança após a ocorrência de n iterações sem a obtenção de melhoria da solução, sendo esse valor n pré-determinado na constante *Limitante Superior*.

Algoritmo 3: VNS Proposto

```

1  Entrada: conjunto de vizinhanças  $N_k$  para ( $k = 1$  até 8) para a fase de Shaking
2  Chame heurística construtiva para obtenção de uma solução inicial  $x = x_0$ 
3   $k \leftarrow 1$ 
4  Enquanto ( $k \leq 9$ ), faça
5      Se a  $k^{\text{ésima}}$  vizinhança  $N_k(x) \neq \emptyset$ , então
6           $n \leftarrow 1$ 
7          Enquanto ( $n \leq \text{Limitante Superior}$ ), faça
8              Shaking: selecione uma solução  $x'$  aleatória da  $k^{\text{ésima}}$  vizinhança  $N_k(x)$  de  $x$ 
9               $x'' \leftarrow$  busca local best improvement ( $x'$ )
10             Se  $f(x'') < f(x)$ , então
11                  $x \leftarrow x''$ 
12                  $n \leftarrow \text{Limitante Superior} + 1$ 
13                  $k \leftarrow 0$ 
14             Senão, faça
15                  $n \leftarrow n + 1$ 
16             Fim se
17         Fim Enquanto
18     Fim se
19      $k \leftarrow k + 1$ 
20 Fim Enquanto
21 Saída: melhor solução  $x$  encontrada

```

Para a implementação dessa metaheurística, a definição das estruturas de vizinhança é um passo fundamental. A seguir são explicadas as diferentes estruturas de vizinhança incorporadas ao VNS proposto, sendo tais explicações seguidas por ilustrações de um exemplo de aplicação da estrutura à uma solução incumbente x em um problema de $M = 3$ máquinas e $T = 7$ períodos:

- 1) *Transpose*: juntamente com a estrutura 3 – *Hybrid Swap* – baseia-se nos trabalhos de Almada-Lobo (2007) e Almada-Lobo, Oliveira e Caravilla (2008). Consiste em uma troca de posição entre duas campanhas adjacentes de artigos distintos em uma

mesma máquina. Vale observar que além de ser uma estrutura de vizinhança aplicada na fase de *shaking* do VNS, a etapa de busca local do algoritmo proposto também se baseia nessa estrutura de vizinhança. A Figura 19 ilustra a estrutura de vizinhança *Transpose*;

Figura 19 – Exemplo da estrutura de vizinhança *Transpose*

Fonte: Autoria própria

- 2) *Modified Transpose*: modificação da estrutura 1 – *Transpose* – consistindo na troca de posição entre duas campanhas não adjacentes de artigos distintos em uma mesma máquina. A Figura 20 ilustra a estrutura de vizinhança *Modified Transpose*;

Figura 20 – Exemplo da estrutura de vizinhança *Modified Transpose*

Fonte: Autoria própria

- 3) *Hybrid Swap*: move uma campanha de determinado artigo de uma máquina para outra, preservando sua data de início. A produção sobreposta na máquina destino do *Hybrid Swap* é movida para a máquina de origem da campanha selecionada. A Figura 21 ilustra a estrutura de vizinhança *Hybrid Swap*;

Figura 21 – Exemplo da estrutura de vizinhança *Hybrid Swap*
Fonte: Autoria própria

- 4) *Modified Hybrid Swap*: move uma campanha de determinado artigo de uma máquina para outra, preservando sua data de início. Nesse caso, porém, a produção sobreposta na máquina destino do *Modified Hybrid Swap* não é movida para a máquina de origem da campanha selecionada, sendo retirada da solução. A máquina origem tem os períodos vagos de produção preenchidos pela extensão de uma das campanhas adjacentes. Observa-se que esse movimento não pode ser aplicado a uma máquina que contém uma única campanha ao longo do horizonte de planejamento. A Figura 22 ilustra a estrutura de vizinhança *Modified Hybrid Swap*;

Figura 22 – Exemplo da estrutura de vizinhança *Modified Hybrid Swap*
Fonte: Autoria própria

- 5) *Aleatory Campaign Insert*: consiste na inserção de uma campanha de tamanho aleatório na produção de uma das máquinas ao longo do horizonte de planejamento, sem que se elimine totalmente a produção dos artigos das campanhas já existentes. O artigo dessa nova campanha inserido também é escolhido aleatoriamente, dentre os artigos para os quais a máquina possui taxas de produção estritamente positivas ($p_{mi} > 0$). A Figura 23 ilustra a estrutura de vizinhança *Aleatory Campaign Insert*;

Figura 23 – Exemplo da estrutura de vizinhança *Aleatory Campaign Insert*
Fonte: Autoria própria

- 6) *Aleatory Campaign Exchange*: consiste na substituição de uma campanha existente em uma das máquinas por uma campanha de um outro artigo, escolhida aleatoriamente dentre os artigos para os quais a máquina possui taxas de produção estritamente positivas ($p_{mi} > 0$). A Figura 24 ilustra a estrutura de vizinhança *Aleatory Campaign Exchange*;

Figura 24 – Exemplo da estrutura de vizinhança *Aleatory Campaign Exchange*
Fonte: Autoria própria

- 7) *Campaign Size Increase*: consiste no aumento do tamanho de uma campanha existente em uma das máquinas. Esse aumento ocorre aleatoriamente substituindo alguns períodos de produção de uma ou duas campanhas adjacentes, porém é mandatório que não se eliminem as campanhas adjacentes, ou seja, tem que restar pelo menos um período de produção de cada campanha adjacente existente. A Figura 25 ilustra a estrutura de vizinhança *Campaign Size Increase*;

Figura 25 – Exemplo da estrutura de vizinhança *Campaign Size Increase*

Fonte: Autoria própria

- 8) *Campaign Size Decrease*: consiste na diminuição do tamanho de uma campanha existente em uma das máquinas. Essa diminuição ocorre aleatoriamente, sendo alguns dos períodos de produção incorporados às campanhas adjacentes, porém é mandatório que não se elimine totalmente a campanha à qual se aplica essa estrutura. Esse movimento não se aplica a campanhas de um único período. A Figura 26 ilustra a estrutura de vizinhança *Campaign Size Decrease*;

Figura 26 – Exemplo da estrutura de vizinhança *Campaign Size Decrease*

Fonte: Autoria própria

- 9) *Campaign Exclusion*: consiste na exclusão de uma campanha existente em uma das máquinas. Essa campanha é substituída pela extensão de uma de suas campanhas adjacentes. Note que as estruturas *Campaign Size Increase*, *Campaign Size Decrease* e *Campaign Exclusion* não são aplicáveis a campanhas que ocupam integralmente a disponibilidade de uma máquina ao longo do horizonte de planejamento. A Figura 27 ilustra a estrutura de vizinhança *Campaign Exclusion*.

O VNS proposto foi testado para a solução das mesmas instâncias do problema delineado pelo CLSD-GCST que foram testadas no CPLEX, esses testes computacionais encontram-se no Capítulo 7. No Capítulo 8, encontra-se a validação da metaheurística com base em uma comparação analítica dos resultados pelo VNS com os obtidos pelo *Branch-and-Cut* do CPLEX.

7 TESTES COMPUTACIONAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos testes computacionais realizados para resolver o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes de curto prazo para a indústria de embalagens de vidro.

O modelo proposto foi aplicado para a resolução de instâncias baseadas em um problema real a fim de que fosse validado. O problema aparece em uma indústria especializada na fabricação de vidro âmbar para embalagens de cerveja pertencente a uma grande multinacional que figura entre as líderes do setor e que apresenta as características definidas no modelo conceitual.

Um amplo levantamento de dados foi realizado nessa empresa, envolvendo desde o resgate de todo o histórico do sistema ERP (*Enterprise Resource Planning*) até a realização de entrevistas com especialistas e gestores, tanto do departamento de PCP, quanto das áreas técnicas de produção e manutenção. Desse modo, foi possível que se levantassem todos os índices e dados do problema para essa fábrica que possui um único forno de capacidade máxima de fusão de 360 toneladas de vidro por dia, é equipada com 3 máquinas IS e possui uma capacidade de armazenagem de 18.000 toneladas de embalagens. As demandas diárias e os níveis de estoque da fábrica para 3 anos de produção foram levantadas para cada um dos 31 artigos do seu portfólio, assim como as características técnicas de cada linha, as perdas referentes a T1 e T2 para cada troca de artigo possível em cada máquina IS foram estimadas e, com uma análise do histórico de trocas da fábrica aliado a uma bateria de entrevistas com os técnicos de produção, foi possível estimar a constante $\omega = 0,02$ que penaliza a capacidade produtiva de toda a fábrica para trocas de fabricação com variações bruscas da extração de vidro do forno. Para essa fábrica o parâmetro $\mu = 1$, pois a equipe técnica somente consegue operacionalizar uma preparação de máquina por dia.

Foi possível ainda, que se estimassem os custos, em reais, da tonelada de vidro fundida (β) e da tonelada de vidro mantida em estoque por dia (λ). Como particularidade do modelo de gestão da empresa estudada, o parâmetro $\Omega = 0$ foi definido, pois os atrasos que ocorrem no decorrer horizonte de planejamento, em geral, não acarretam em penalizações financeiras para essa organização. O contrário ocorreu com o parâmetro θ , que pôde ser estimado, pois o atraso final (B'_i), de fato, implica em custos referentes à perda de mercado pela empresa.

As instâncias do ano de produção mais estável da fábrica foram selecionadas para execução dos testes, pois, dessa forma, diminuem-se as interferências de problemas técnico-operacionais em um cenário de comparação entre o planejamento otimizado e o planejamento real executado. Uma breve caracterização dessa indústria, bem como as instâncias utilizadas nos testes computacionais encontram-se no Apêndice A.

Assim, uma série de testes computacionais utilizando essas instâncias foi executada. Os testes foram realizados em um computador equipado com sistema operacional Windows 8, CPU Intel® Core™ i7 2,2GHz e 8 GB de memória RAM e se dividiram em 3 etapas:

- a) testes com as instâncias do ano selecionado para diferentes horizontes de planejamento a partir do início de cada mês selecionado e com uma parametrização de tempo limite de 3.600 segundos no *software* IBM ILOG CPLEX Optimization Studio Versão 12.5, utilizando o CLSD-GCST. Os resultados encontram-se no Quadro 4;

	Horizonte de planejamento (dias)	Tempo (s)	Gap otimalidade* (%)	Valor da função objetivo (RS)	Perdas T1 + T2 (RS)	Perdas variação extração (RS)	Soma estoques totais (RS)	Atraso final (RS)
Janeiro	T = 7	3	0,00	113.003	18.849	0	88.616	5.538
	T = 14	89	0,00	200.359	24.713	5.342	170.304	0
	T = 31	3.607	6,67	431.782	36.748	0	395.034	0
Fevereiro	T = 7	6	0,00	133.197	31.939	0	101.258	0
	T = 14	84	0,00	235.223	42.351	0	192.872	0
	T = 28	3.616	5,21	443.664	50.449	5.342	387.873	0
Março	T = 7	2	0,00	134.490	11.030	0	123.460	0
	T = 14	4	0,00	253.536	17.082	0	236.454	0
	T = 31	2.149	0,00	556.438	35.299	5.342	515.797	0
Abril	T = 7	2	0,00	125.883	6.574	0	119.309	0
	T = 14	5	0,00	242.497	12.744	0	229.753	0
	T = 30	610	0,00	509.291	19.044	5.342	484.905	0
Maio	T = 7	3	0,00	151.187	26.415	0	124.772	0
	T = 14	7	0,00	267.514	26.415	0	241.099	0
	T = 31	3.606	3,43	577.435	38.061	16.027	523.347	0
Junho	T = 7	7	0,00	173.477	37.579	0	135.898	0
	T = 14	21	0,00	304.499	37.579	0	266.920	0
	T = 30	3.606	3,16	642.678	51.091	5.342	586.245	0
Julho	T = 7	2	0,00	143.189	13.866	0	129.323	0
	T = 14	5	0,00	260.938	13.866	0	243.962	3.110
	T = 31	3.604	0,36	549.790	33.133	5.342	511.315	0

Quadro 4 – Solução de instâncias do CLSD-GCST no CPLEX

(continua)

	Horizonte de planejamento (dias)	Tempo (s)	Gap otimalidade*	Valor da função objetivo (RS)	Perdas T1 + T2 (RS)	Perdas variação extração (RS)	Soma estoques totais (RS)	Atraso final (RS)
Agosto	T = 7	1	0,00	120.286	6.170	0	114.116	0
	T = 14	3	0,00	230.040	6.170	0	223.870	0
	T = 31	59	0,00	526.156	12.549	5.342	508.265	0
Setembro	T = 7	2	0,00	136.982	6.170	5.342	125.470	0
	T = 14	5	0,00	261.971	13.096	5.342	243.533	0
	T = 30	3.606	2,69	571.687	35.362	10.685	525.640	0
Outubro	T = 7	2	0,00	141.998	18.047	0	123.951	0
	T = 14	11	0,00	267.555	33.707	10.685	223.163	0
	T = 31	3.338	0,00	509.476	39.877	10.685	458.914	0
Novembro	T = 7	3	0,00	108.101	21.911	10.685	75.505	0
	T = 14	8	0,00	167.031	21.911	10.685	134.435	0
	T = 30	3.607	5,40	299.658	40.630	10.685	248.343	0
Dezembro	T = 7	2	0,00	74.651	14.395	0	60.256	0
	T = 14	3.083	0,00	163.581	53.248	5.342	104.991	0
	T = 31	3.607	29,15	302.849	107.961	10.685	184.203	0

* GAP DE OTIMALIDADE = (MELHOR SOLUÇÃO INTEIRA - LIMITANTE INFERIOR) / MELHOR SOLUÇÃO INTEIRA

Quadro 4 – Solução de instâncias do CLSD-GCST no CPLEX

(conclusão)

Fonte: Autoria própria

- b) testes com as mesmas instâncias do ano selecionado, utilizando o VNS proposto implementado em linguagem VBA, sendo a entrada e saída de dados realizadas por meio de planilhas do Microsoft Excel 2013. Adotou-se, como parametrização da metaheurística, um *Limitante Superior* = 100 para o número de iterações sem melhoria em cada estrutura de vizinhança. Os resultados encontram-se na Quadro 5;

	Horizonte de planejamento (dias)	Tempo total de execução (s)	Tempo para encontrar melhor solução (s)	Gap otimalidade*	Valor da função objetivo (RS)	Perdas T1 + T2 (RS)	Perdas variação extração (RS)	Soma estoques totais (RS)	Atraso final (RS)
Janeiro	T = 7	369	293	6,33	120.639	26.420	0	88.681	5.538
	T = 14	709	627	22,19	257.500	54.996	32.054	170.450	0
	T = 31	1405	1282	8,00	438.034	38.642	5.342	394.050	0
Fevereiro	T = 7	516	441	4,44	139.381	32.688	5.342	101.351	0
	T = 14	767	668	0,60	236.642	42.358	0	194.284	0
	T = 28	1077	957	5,71	445.979	48.738	0	397.241	0
Março	T = 7	118	62	0,16	134.703	11.030	0	123.673	0
	T = 14	255	175	0,22	254.098	17.081	0	236.946	71
	T = 31	107	2	13,24	641.382	65.961	5.342	536.094	33.985
Abril	T = 7	69	47	0,10	126.016	6.573	0	119.443	0
	T = 14	232	172	0,13	242.824	12.743	0	230.081	0
	T = 30	404	340	1,52	517.175	12.743	0	504.432	0

Quadro 5 – Solução de instâncias do CLSD-GCST via VNS proposto

(continua)

	Horizonte de planejamento (dias)	Tempo total de execução (s)	Tempo para encontrar melhor solução (s)	Gap otimalidade* (%)	Valor da função objetivo (RS)	Perdas T1 + T2 (RS)	Perdas variação extração (RS)	Soma estoques totais (RS)	Atraso final (RS)
Maio	T = 7	205	142	0,23	151.541	26.420	0	125.121	0
	T = 14	158	97	5,79	283.943	40.082	10.685	233.176	0
	T = 31	978	885	6,05	593.533	38.054	16.027	539.452	0
Junho	T = 7	260	183	4,03	180.761	45.070	0	135.691	0
	T = 14	359	278	2,02	310.786	45.070	0	265.716	0
	T = 30	1371	1282	4,92	654.583	50.869	0	603.714	0
Julho	T = 7	71	15	0,22	143.506	13.869	0	129.637	0
	T = 14	110	51	0,24	261.573	13.869	0	244.594	3.110
	T = 31	812	707	1,41	555.647	33.140	5.342	517.165	0
Agosto	T = 7	67	46	0,11	120.418	6.171	0	114.247	0
	T = 14	174	152	0,11	230.300	6.171	0	224.129	0
	T = 31	305	240	0,28	527.654	12.547	5.342	509.765	0
Setembro	T = 7	22	1	0,17	137.211	6.171	5.342	125.698	0
	T = 14	59	37	1,37	265.602	6.171	5.342	244.062	10.027
	T = 30	1323	1235	3,12	574.260	44.686	5.342	524.232	0
Outubro	T = 7	61	40	10,91	159.391	27.531	10.685	121.175	0
	T = 14	104	46	0,18	268.042	33.702	10.685	223.655	0
	T = 31	224	155	3,58	528.382	47.563	10.685	470.134	0
Novembro	T = 7	133	78	0,25	108.370	21.914	10.685	75.771	0
	T = 14	248	186	0,30	167.541	21.914	10.685	134.942	0
	T = 30	194	71	7,13	305.237	45.400	5.342	254.386	109
Dezembro	T = 7	165	109	0,29	74.870	14.401	0	60.469	0
	T = 14	1143	1030	9,12	180.000	58.754	10.685	110.561	0
	T = 31	1354	1109	56,53	493.637	157.727	53.424	189.955	92.531

* GAP DE OTIMALIDADE = (MELHOR SOLUÇÃO INTEIRA - LIMITANTE INFERIOR) / MELHOR SOLUÇÃO INTEIRA

Quadro 5 – Solução de instâncias do CLSD-GCST via VNS proposto

(conclusão)

Fonte: Autoria própria

- c) testes de um planejamento de curto prazo estendido, aglutinando os dados dos trimestres do ano selecionado para gerar quatro diferentes instâncias⁴ e testando estas instâncias maiores tanto no pacote comercial CPLEX, quanto utilizando o VNS proposto implementado em VBA. Esse último teste tem como intuito a análise do desempenho do *Branch-and-Cut* de um *solver* estado-da-arte contra o do VNS conforme aumentam o tamanho das instâncias do CLSD-GCST. O Quadro 6 contém os resultados obtidos pelo CPLEX, o Quadro 7, os resultados obtidos pelo VNS. Este último teste consiste em um teste preliminar para avaliar o desempenho dos dois

⁴ Nesse caso, tais instâncias que representam o planejamento trimestral da produção são formadas pela soma das demandas dos três meses subsequentes aglutinados, sempre utilizando os níveis de estoque e o estado inicial de preparação das máquinas do primeiro desses meses, respeitando a sequência cronológica (exemplo: para o primeiro trimestre, utilizam-se os mesmos estoques iniciais e estados de preparação das máquinas das instâncias referentes ao mês de janeiro). Logo, tais instâncias são facilmente obtidas, caso o leitor queira reproduzi-las, a partir dos dados contidos do Apêndice A.

métodos de solução em grandes instâncias e foi realizado com o intuito de proporcionar um indicativo do comportamento de ambos. Para uma melhor compreensão desses comportamentos, mais testes tem de ser realizados, o que proporciona a oportunidade de pesquisas futuras. Nesse teste preliminar, o problema foi processado no CPLEX com tempos limites de processamento de 3.600 segundos, 7.200 segundos, 10.800 segundos, 14.400 segundos e 18.000 segundos, mantendo-se o VNS parametrizado ou calibrado com *Limitante Superior* = 100. A seguir, encontram-se os resultados.

	Horizonte de planejamento (dias)	3600 s de processamento			7200 s de processamento			10800 s de processamento			14400 s de processamento			18000 s de processamento		
		Gap otimalidade* (%)	Valor da função objetivo (RS)		Gap otimalidade* (%)	Valor da função objetivo (RS)		Gap otimalidade* (%)	Valor da função objetivo (RS)		Gap otimalidade* (%)	Valor da função objetivo (RS)		Gap otimalidade* (%)	Valor da função objetivo (RS)	
1º TRI	T = 90	79,53	4.558.145		75,46	3.845.398		73,30	3.534.522		73,30	3.534.522		73,30	3.534.522	
2º TRI	T = 91	SEM SOLUÇÃO	FACTIVEL	SEM SOLUÇÃO	FACTIVEL	SEM SOLUÇÃO	FACTIVEL	92,53	16.462.600		92,10	15.566.800		40,53	2.068.941	
3º TRI	T = 92	81,75	6.571.231		81,75	6.571.231		79,35	5.814.458		79,24	5.781.143		79,24	5.781.143	
4º TRI	T = 92	67,76	2.671.313		59,77	2.155.623		41,68	1.487.067		41,68	1.487.067		41,68	1.487.067	

* GAP DE OTIMALIDADE = $\frac{\text{MELHOR SOLUÇÃO INTEIRA} - \text{LIMITANTE INFERIOR}}{\text{MELHOR SOLUÇÃO INTEIRA}}$

Quadro 6 – Solução das instâncias estendidas do CLSD-GCST no CPLEX
Fonte: Autoria própria

	Horizonte de planejamento (dias)	Tempo total de execução (s)	Tempo para encontrar melhor solução (s)	Gap otimalidade* (%)	Valor da função objetivo (R\$)
Janeiro	T = 90	1710	1520	71,24	3.280.310
Fevereiro	T = 91	8962	8559	37,86	1.980.317
Março	T = 92	5874	5521	34,87	1.843.046
Abril	T = 92	804	480	34,69	1.327.909

$$* \text{GAP DE OTIMALIDADE} = \frac{\text{MELHOR SOLUÇÃO INTEIRA} - \text{LIMITANTE INFERIOR}}{\text{MELHOR SOLUÇÃO INTEIRA}}$$

Quadro 7 – Solução das instâncias estendidas do CLSD-GCST via VNS proposto
Fonte: Autoria própria

Por fim, para que se criassem subsídios para uma validação empírica do modelo, foram calculados os valores das funções objetivo para os planos de produção reais que foram executados pela empresa estudada nesses doze meses do ano selecionado com base nos dados e nas premissas do modelo matemático proposto. Os resultados obtidos encontram-se no Quadro 8.

	Horizonte de planejamento (dias)	Tempo de planejamento	Valor da função objetivo (R\$)	Perdas T1 + T2 (R\$)	Perdas variação extração (R\$)	Soma estoques totais (R\$)	Atraso final (R\$)
Janeiro	T = 31	1 semana	760.964	49.202	0	404.056	307.706
Fevereiro	T = 28	1 semana	4.172.756	89.867	48.082	493.288	3.541.519
Março	T = 31	1 semana	1.968.694	58.448	32.054	600.046	1.278.146
Abril	T = 30	1 semana	639.551	91.603	21.370	526.578	0
Mai	T = 31	1 semana	804.330	99.956	48.082	554.321	101.971
Junho	T = 30	1 semana	751.582	108.424	21.370	621.788	0
Julho	T = 31	1 semana	715.475	94.313	42.739	526.644	51.779
Agosto	T = 31	1 semana	648.044	82.736	37.397	527.911	0
Setembro	T = 30	1 semana	635.625	71.319	16.027	548.279	0
Outubro	T = 31	1 semana	619.727	109.728	10.685	499.314	0
Novembro	T = 30	1 semana	2.603.512	90.089	10.685	305.522	2.197.216
Dezembro	T = 31	1 semana	2.674.376	60.957	42.739	274.845	2.295.835

Quadro 8 – Valores para os planos reais executados nos períodos correspondentes às instâncias testadas
Fonte: Autoria própria

Em uma primeira análise dos resultados dos testes aqui apresentados, nota-se uma grande vantagem do uso de métodos de solução do CLSD-GCST para a resolução dos

problemas da empresa, em relação ao método empírico, hoje, por eles utilizado. Isso, pois, ao se resolver o CLSD-GCST por ambos os métodos testados, têm-se soluções de melhor qualidade e em um período de tempo muito reduzido, isso é totalmente evidente ao se confrontar os dados dos Quadros 4, 5 e 8.

Ainda ao se observarem os resultados dos últimos testes, nos Quadros 6 e 7, percebe-se que o uso da metaheurística, além de representar uma ferramenta mais simples e acessível por sua implementação em VBA, proporciona uma possibilidade de planejamento estendido de qualidade para a empresa, pois ao contrário do que ocorre com o CPLEX, o VNS consegue resolver com qualidade, em um tempo consideravelmente baixo, instâncias que representam o planejamento da produção de até três meses da empresa estudada.

No Capítulo 8, os resultados desses testes computacionais serão mais bem explorados durante os processos de validação do CLSD-GCST e do VNS.

8 VALIDAÇÃO

Este capítulo tem como objetivo apresentar os processos de validação das proposições desse trabalho, para isso é dividida em duas seções secundárias:

- c) validação do modelo CLSD-GCST;
- d) validação do VNS.

A seguir, cada uma dessas validações é detalhada.

8.1 VALIDAÇÃO DO MODELO CLSD-GCST

O processo de validação do modelo estudado foi fortemente baseado no tetraedro proposto por Oral e Kettani (1993), apresentado na Seção 3.2.1.4. Basicamente buscou-se validar o modelo segundo cada uma das facetas do tetraedro, de modo análogo ao processo de validação realizado no trabalho de Vasco (2012).

A estratégia de validação adotada abrangeu as seguintes práticas de validação: validação da formulação, validação de legitimidade, validação de competência, validação operacional, validação conceitual e validação de dados. Dessa forma, visou-se à abrangência de todas as facetas do tetraedro utilizado como referência, conforme ilustrado na Figura 28. A seguir cada etapa da validação é descrita com mais detalhes.

Figura 28 – Estratégia de validação do modelo proposto
Fonte: Autoria própria

8.1.1 VALIDAÇÃO DA FORMULAÇÃO

Conforme mencionado na Seção 2.1, o modelo CLSD-GCST é uma especialização do CLSD-PM proposto por James e Almada-Lobo (2011). Como o CLSD-PM é um modelo já publicado e aceito pela comunidade científica, trata-se de uma formulação válida. Desse modo, considera-se sua especialização para a indústria de embalagens de vidro, o CLSD-GCST, uma formulação também válida, sem a necessidade da realização de uma validação específica nesse caso.

8.1.2 VALIDAÇÃO DA LEGITIMIDADE

A validação da legitimidade foi baseada na comparação dos resultados dos testes computacionais realizados para as instâncias mensais de produção do ano selecionado no CPLEX (Quadro 4) com os valores calculados das funções objetivo para os planos de produção reais que foram executados nesses doze meses pela fábrica estudada com base nos dados e nas premissas do modelo matemático proposto, ambos contidos no Capítulo 7 (Quadro 8).

Esses resultados foram utilizados para a criação das questões focadas na validação da legitimidade do modelo proposto contidas no questionário do Apêndice B (questões de 4 a 10), aplicado ao chefe de produção e ao programador da produção da fábrica estudada.

Antes da aplicação do questionário, todo o trabalho foi contextualizado para ambos. O modelo conceitual descrito na Seção 5.1 e o modelo formal descrito na Seção 5.2 foram a eles apresentados. Além disso, todas as instâncias (contidas no Apêndice A) para os testes foram disponibilizadas, bem como os resultados dos testes computacionais e os planos de produção resultantes das diferentes soluções do problema. Os questionários respondidos pelo chefe de produção e pelo programador de produção encontram-se no Anexo B.

O chefe de produção é engenheiro mecânico de formação e um profissional já com bastante experiência na indústria de embalagens de vidro, trabalhando há 15 anos nesse segmento. Ao se analisarem suas respostas, percebe-se que o mesmo concorda plenamente com a importância da atividade de dimensionamento e sequenciamento de lotes para o negócio e avalia que, mesmo com tal importância, hoje, na empresa, essa atividade é realizada de forma totalmente empírica, com base na experiência dos profissionais de PCP. O chefe de produção

concorda com a possibilidade de ganhos associada à implantação de um SAD (Sistema de Apoio à Decisão) que auxiliasse o dimensionamento e sequenciamento de lotes, porém salienta que para que esse sistema implique em ganhos efetivos, é necessário que o mesmo seja bastante flexível, adaptando-se facilmente a mudanças repentinas de demanda, ocasionadas pelas necessidades do mercado. Quanto aos planos gerados, o chefe de produção os avalia como factíveis e passíveis de operacionalização, observando que, sob um ponto de vista técnico, gostaria de penalizar ainda mais, na solução do modelo, as preparações de máquina, devido ao impacto das mesmas na estabilização do processo produtivo. Quanto aos ganhos proporcionados pelos planos obtidos com o CPLEX em comparação aos planos reais, o profissional os avalia como válidos.

Já o programador da produção é engenheiro de produção e menos experiente nesse setor industrial, trabalhando há 2 anos na empresa. Em suas respostas, fica evidente que ele também concorda plenamente com a importância da atividade de dimensionamento e sequenciamento de lotes para o negócio e também afirma que, hoje, o planejamento é totalmente empírico com base em algumas premissas definidas em reuniões conduzidas pela empresa. Enquanto o chefe de produção é mais conservador ao responder as perguntas sobre a implementação de um SAD, o programador da produção defende totalmente a implementação de um sistema que opere nesse sentido. Isso porque, ao avaliar os resultados da solução do modelo proposto no CPLEX, o programador vislumbra a possibilidade de elaboração de planos considerando o compromisso entre diversos indicadores que são impactados pelo planejamento da produção, o que não é possível quando se elaboram os planos manualmente. Além disso, o programador defende que, com a agilidade que um SAD proporcionaria, seria possível a simulação e a avaliação de diversos cenários de planejamento, levando a uma tomada de decisão mais assertiva. Quanto à avaliação dos planos gerados pelo CPLEX, o programador afirma que os planos são factíveis, observando a necessidade de alguns ajustes em casos pontuais em que os artigos planejados implicariam em preparações de máquina demasiadamente complexas. Vale observar que a solução do modelo permite algumas dessas trocas mais complexas, pois o modelo considera o compromisso entre o custo dessas perdas e outros custos como o de estoque e o de *backlogging*, visando à uma minimização total dos custos. Quanto aos ganhos proporcionados pelos planos obtidos com o CPLEX, em comparação aos planos reais, o programador também os avalia como válidos.

Dessa forma, as respostas de tais questionários, permitem-nos julgar o modelo CLSD-GCST como válido, sob o prisma da validação da legitimidade. Ambos os profissionais acreditam no potencial do uso do modelo como uma forma de otimizar o planejamento da

produção e julgam factíveis os planos obtidos pelo modelo para doze diferentes meses, além de considerá-los mais adequados que os planos reais executados ao validarem o ganho financeiro calculado com base na análise comparativa dos planos obtidos pelo CPLEX com os planos reais executados para os mesmos períodos que geraram as instâncias.

Quanto às ressalvas feitas pelo chefe de produção e pelo programador da produção em relação aos planos de produção obtidos, fica bastante evidente que isso se deve à calibração dos parâmetros estimados para o modelo: ao se dar mais peso às perdas operacionais associadas às trocas de fabricação, já se estaria reduzindo a necessidade dos pequenos ajustes que ambos observaram.

8.1.3 VALIDAÇÃO CONCEITUAL

Esta etapa do processo de validação foi baseada nas respostas das questões 1, 2 e 3 do questionário do Apêndice B, que foram preparadas visando à validação do modelo conceitual proposto para o dimensionamento e sequenciamento de lotes na indústria de embalagens de vidro. Os questionários respondidos pelo chefe de produção e pelo programador de produção encontram-se no Anexo B.

Para esta avaliação, percebe-se que tanto o chefe de produção quanto o programador da produção concordam plenamente que o modelo conceitual proposto representa de forma verossímil o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes na indústria de embalagens de vidro. Além disso, ambos concordam com o valor que seria gerado ao se resolver automaticamente esse problema, classificado por ambos como crítico. Logo, tem-se o modelo conceitual proposto validado.

8.1.4 VALIDAÇÃO DA COMPETÊNCIA (BASEADA NO MODELO SCOR)

Conforme mencionado na Seção 3.2.1.4, a validação da competência consiste na avaliação da representatividade, da usabilidade, da sinergia proporcionada e do custo envolvido na solução do modelo na tomada de decisão, apresentando uma ampla interface com o negócio ao qual se está aplicando alguma ferramenta de PO.

Mediante tal contexto, as métricas do modelo SCOR apresentadas na Seção 2.2 que têm interface com a modelagem quantitativa aplicada à otimização da *performance* da cadeia de suprimentos, passam a ter uma forte relação com o objetivo da validação de competência.

Com base nessa relação, as métricas do modelo SCOR foram utilizadas como base da validação de competência realizadas neste trabalho. O objetivo dessa etapa de validação foi utilizar os resultados dos testes computacionais e confrontá-los com cada um dos processos, atributos de *performance* e métricas do SCOR destacados na revisão bibliográfica que têm interface com a aplicação de modelos matemáticos de otimização. A Figura 29 ilustra de modo bastante claro quais processos e indicadores do SCOR serão avaliados nesse contexto.

FACETA DESCRITIVA DO TETRAEDRO DE VALIDAÇÃO PROCESSOS E INDICADORES UTILIZADOS PARA VALIDAÇÃO DE COMPETÊNCIA COM BASE NO MODELO SCOR
Categoria de processos de planejamento da cadeia de suprimentos (P1)		
Atributos de performance e Métricas	Tempo de resposta (RS)	<i>Order Fulfillment Cycle Time</i> (RS.1.1)
		<i>Plan Cycle Time</i> (RS.3.98)
	Custos (CO)	<i>Cost to Plan Supply Chain</i> (CO.3.108)
	Gestão de ativos (AM)	<i>Return on Working Capital</i> (AM.1.3)
		<i>Cash-to-Cash Cycle Time</i> (AM.1.1)
		<i>Return on Supply Chain Fixed Assets</i> (AM.1.2)
Processo de Planejamento das Atividades da Produção <i>Make-to-Stock</i> (M1.1) Processo de Planejamento das Atividades da Produção <i>Make-to-Order</i> (M2.1)		
Atributos de performance e Métricas	Confiabilidade (RL)	<i>Schedule Achievement</i> (RL.3.49)
	Tempo de resposta (RS)	<i>Schedule Production Activities Cycle Time</i> (RS.3.123)
	Custos (CO)	<i>Cost to Schedule Production Activities</i> (CO.3.127)
	Gestão de ativos (AM)	<i>Capacity Utilization</i> (AM.3.9)
Processo de Reserva de Inventário e de Determinação da Datas de Entrega (D2.3)		
Atributos de performance e Métricas	Confiabilidade (RL)	<i>Percentage of Orders Delivered in Full</i> (RL.2.1)
		<i>Delivery Performance to Customer Commit Date</i> (RL.2.2)
	Tempo de resposta (RS)	<i>Order Fulfillment Dwell Time</i> (RS.3.94)
		<i>Reserve Resources and Determine Delivery Date Cycle Time</i> (RS.3.116)
	Custos (CO)	<i>Cost to Reserve Resources and Determine Delivery Date</i> (CO.3.120)

Figura 29 – Validação de competência baseada no modelo SCOR
Fonte: Autoria própria

Esta etapa da validação também foi baseada na comparação dos resultados dos testes computacionais realizados para as instâncias mensais de produção do ano selecionado no CPLEX (Quadro 4) com os valores calculados das funções objetivo para os planos de produção reais que foram executados nesses doze meses pela fábrica estudada com base nos dados e nas premissas do modelo matemático proposto, ambos contidos no Capítulo 7 (Quadro 8).

Para melhor ilustrar a diferença entre as soluções obtidas da solução do CLSD-GCST via CPLEX e pelos programadores de produção da empresa, foram plotados o Gráfico 1, que mostra a diferença da função objetivo ao longo dos doze meses analisados, e os gráficos contidos na Figura 30 que comparam as soluções de ambos os modelos segundo os principais custos contemplados pelo CLSD-GCST – custos de perdas por troca de fabricação (T1 e T2), custos por perdas decorrentes de variações bruscas de extração, custos de estoque totais ao longo do horizonte de planejamento e custos de atraso ou *backlogging* ao término do horizonte de planejamento, que representariam vendas perdidas ou *lost sales*.

Gráfico 1 – Comparação das funções objetivo para as soluções obtidas via CPLEX e pelos programadores da produção da empresa
Fonte: Autoria própria

Figura 30 – Gráficos comparativos dos custos que compõem o valor da função objetivo para as soluções obtidas via CPLEX e pelos programadores da produção da empresa

(continua)

Figura 30 – Gráficos comparativos dos custos que compõem o valor da função objetivo para as soluções obtidas via CPLEX e pelos programadores da produção da empresa

(continuação)

Figura 30 – Gráficos comparativos dos custos que compõem o valor da função objetivo para as soluções obtidas via CPLEX e pelos programadores da produção da empresa

(conclusão)

Fonte: Autoria própria

Fica bastante evidente, ao se observarem o Gráfico 1 e a Figura 30, que há ganhos financeiros ao se optar pela abordagem quantitativa proposta em detrimento à adoção da atual prática de planejamento da produção da empresa, seja pela análise da função objetivo ou pela comparação de cada um dos custos que a compõem em ambos os casos. Pode-se destacar ainda, nessa comparação, a grande redução de custos de *backlogging* ao término do horizonte de planejamento. Essas informações serão úteis para análise de impacto do uso do CLSD-GCST em uma situação gerencial segundo o modelo SCOR.

Conforme destacado na revisão bibliográfica e ilustrado na Figura 29, em relação à categoria de processos de planejamento da cadeia de suprimentos (P1) do SCOR, foram avaliados os indicadores: *Order Fulfillment Cycle Time* (RS.1.1), *Plan Cycle Time* (RS.3.98), *Return on Working Capital* (AM.1.3), *Cash-to-Cash Cycle Time* (AM.1.1), *Return on Supply Chain Fixed Assets* (AM.1.2), *Cost to Plan Supply Chain* (CO.3.108) e *Environmental Compliance Cost* (CO.3.147). Nesse sentido, pode-se afirmar, com base nos resultados obtidos, que 4 desses 7 indicadores são passíveis de melhoria ao se optar pelo uso do CLSD-GCST associado a um método de solução:

- *Order Fulfillment Cycle Time* (RS.1.1), pois com a evidente diminuição de atrasos no atendimento das demandas, diminui-se o tempo médio de atendimento de um pedido;
- *Plan Cycle Time* (RS.3.98), pois reduziu-se o tempo de geração de planos de uma semana para algumas horas;
- *Return on Working Capital* (AM.1.3), pois o dimensionamento e sequenciamento de lotes otimizado implica em menores custos operacionais, impactando de modo positivo nesse indicador que consiste na razão entre os lucros obtidos com a cadeia de suprimentos e o capital operacional aplicado;
- *Cost to Plan Supply Chain* (CO.3.108), pois o planejamento otimizado requer menos tempo e menos recursos.

Já em relação aos processos de Planejamento das Atividades da Produção *Make-to-Stock* (M1.1) e de Planejamento das Atividades da Produção *Make-to-Order* (M2.1), foram avaliados os indicadores: *Schedule Achievement* (RL.3.49), *Schedule Production Activities Cycle Time* (RS.3.123), *Peak Time Energy Use* (CO.3.167), *Cost to Schedule Production Activities* (CO.3.127) e *Capacity Utilization* (AM.3.9). Pode-se afirmar que 3 desses 5 indicadores são passíveis de melhoria ao se usar o modelo proposto:

- *Schedule Production Activities Cycle Time* (RS.3.123), pois o uso do método quantitativo reduz drasticamente o tempo necessário para o planejamento da produção, anteriormente feito em uma semana;
- *Cost to Schedule Production Activities* (CO.3.127), pois os custos de planejamento ficam reduzidos ao se usar o CLSD-GCST aliado a um método de solução – além de se obter um planejamento acelerado, são necessários menos recursos da equipe de PCP para a geração de planos, que passa a ser automatizada;
- *Capacity Utilization* (AM.3.9), pois o melhor sequenciamento dos lotes, com menos perdas produtivas decorrentes das preparações de máquinas (T1 e T2) e de variações bruscas de extração, implica em uma maior e melhor utilização da capacidade produtiva disponível.

Por fim, em relação ao processo de Reserva de Inventário e de Determinação das Datas de Entrega (D2.3), foram avaliados os indicadores: *Percentage of Orders Delivered in Full* (RL.2.1), *Delivery Performance to Costumer Commit Date* (RL.2.2), *Order Fulfillment Dwell Time* (RS.3.94), *Reserve Resources and Determine Delivery Date Cycle Time* (RS.3.116) e *Cost to Reserve Resources and Determine Delivery Date* (CO.3.120).

Usualmente esse último processo é mais focado nos processos de agendamento associados com o atendimento de pedidos do cliente, a partir dos estoques existentes e do volume de produção programado. Como o CLSD-GCST abrange o sequenciamento da produção e não somente o dimensionamento dos lotes, sua aplicação pode trazer ganhos potenciais para 4 dos 5 indicadores mencionados:

- *Percentage of Orders Delivered in Full* (RL.2.1) e *Delivery Performance to Costumer Commit Date* (RL.2.2), pois o sequenciamento dos lotes de produção obtido pela solução do modelo no CPLEX, visivelmente reduz o *backlogging* ao término do horizonte de planejamento para todos os produtos quando comparado com sequenciamento real executado pela empresa;
- *Reserve Resources and Determine Delivery Date Cycle Time* (RS.3.116) e *Cost to Reserve Resources and Determine Delivery Date* (CO.3.120), pois o uso do modelo proporciona uma análise otimizada dos recursos produtivos necessários, mais rápida e bem menos custosa. Do modo com que o modelo está desenhado, o mesmo não chega a abranger a definição das datas de entrega, mas vale a observação de que é possível ampliá-lo para que essa definição possa ser integrada ao processo de tomada

de decisão, sendo esse, inclusive, um dos pontos a se destacar no âmbito de oportunidades futuras de pesquisa.

De forma geral, dos 17 indicadores do modelo SCOR selecionados para avaliação do desempenho da solução do CLSD-GCST, observou-se que 11 são passíveis de melhoria com o simples uso de uma ferramenta de apoio à decisão baseada no modelo, ou seja, 64% dos indicadores avaliados.

Esse raciocínio pode-se estender para a categoria de processo e para os processos avaliados: para a categoria de processos de planejamento da cadeia de suprimentos (P1), o uso das técnicas de PO pode implicar na melhoria de 57% dos indicadores avaliados; para os processos de Planejamento das Atividades da Produção *Make-to-Stock* (M1.1) e de Planejamento das Atividades da Produção *Make-to-Order* (M2.1), na melhoria de 60% dos indicadores avaliados; e para o processo de Reserva de Inventário e de Determinação das Datas de Entrega (D2.3), na melhoria de 80% dos indicadores avaliados, valendo a observação de que a melhoria nesse caso pode ser mais efetiva ao se ampliar o modelo para abranger o problema de determinação de datas de entrega para cada cliente. O Gráfico 2 ilustra essa análise de indicadores para a categoria de processos P1 e para os processos M1.1, M2.1 e D2.3.

Gráfico 2 – Análise de impacto do uso do CLSD-GCST nos processos do modelo SCOR
Fonte: Autoria própria

Ao se utilizarem os mesmos indicadores para uma análise segundo um outro eixo delineado pelos seus atributos de *performance*, percebe-se que:

- associados ao atributo de *performance* Confiabilidade (RL), têm-se os indicadores *Schedule Achievement* (RL.3.49), *Percentage of Orders Delivered in Full* (RL.2.1) e *Delivery Performance to Costumer Commit Date* (RL.2.2). Pela análise realizada nos eixo dos processos, percebe-se que com a aplicação do CLSD-GCST é possível que se melhorem 2 desses 3 indicadores, ou seja 66%;
- associados ao atributo de *performance* Tempo de Resposta (RS), têm-se os indicadores *Order Fulfillment Cycle Time* (RS.1.1), *Plan Cycle Time* (RS.3.98), *Schedule Production Activities Cycle Time* (RS.3.123), *Order Fulfillment Dwell Time* (RS.3.94) e *Reserve Resources and Determine Delivery Date Cycle Time* (RS.3.116). Pela análise anterior, percebe-se que é possível impactar positivamente em 4 desses 5 indicadores, ou seja 80%;
- associados ao atributo de *performance* Custo (CO), têm-se os indicadores *Cost to Plan Supply Chain* (CO.3.108), *Environmental Compliance Cost* (CO.3.147), *Peak Time Energy Use* (CO.3.167), *Cost to Schedule Production Activities* (CO.3.127) e *Cost to Reserve Resources and Determine Delivery Date* (CO.3.120). Pode-se inferir que há possibilidade de ganho, com aplicação do CLSD-GCST, em 3 desses 5 indicadores, ou seja 60%;
- associados ao atributo de *performance* Gestão de Ativos (AM), têm-se os indicadores *Return on Working Capital* (AM.1.3), *Cash-to-Cash Cycle Time* (AM.1.1), *Return on Supply Chain Fixed Assets* (AM.1.2) e *Capacity Utilization* (AM.3.9). Pela análise anterior, percebe-se que é possível impactar positivamente em 2 desses 4 indicadores, ou seja 50%.

Ou seja, assim como no eixo de análise dos processos contemplados pelos indicadores avaliados, a análise dos atributos de *performance* associados a tais indicadores também mostra um resultado favorável. O Gráfico 3 ilustra essa análise de indicadores para cada atributo de *performance*.

Gráfico 3 – Análise de impacto do uso do CLSD-GCST nos atributos de *performance* do modelo SCOR
 Fonte: Autoria própria

Concluindo, pode-se evidenciar que a análise das métricas do modelo SCOR indicam uma grande vantagem para o negócio em se aplicar o modelo proposto nesse trabalho associado a um método de solução, assim fica evidente que o CLSD-GCST tem sua validação de competência bem sucedida com representatividade no apoio da tomada de decisão e sinergia com o negócio sob um aspecto mais amplo.

8.1.5 VALIDAÇÃO OPERACIONAL

Essa etapa do processo de validação consistiu na aplicação de um questionário ao programador da produção da fábrica analisando a viabilidade de se implementar o modelo computacionalmente, aliado a um método de solução, como um SAD. Esse questionário encontra-se no Apêndice C deste trabalho e o questionário respondido encontra-se no Anexo C.

Ao responder esse segundo questionário, o programador reforça as vantagens de implementação de um SAD, principalmente pelo fato de que um sistema computacional proporcionaria a consideração do compromisso ou *trade-off* entre diversos fatores ao planejar

a produção, o que é impossível de se realizar com as ferramentas atualmente disponíveis para o PCP da empresa. Outro ponto que o programador reforça é agilidade da solução do problema, o que proporcionaria a possibilidade de solução do modelo para diversas condições, desse modo simulando diversos cenários que seriam apresentados aos gestores do PCP e da produção.

Em termos de validação do modelo propriamente dito, o programador afirma que os dados de entrada, os custos contidos na função objetivo e que as condições modeladas pelas restrições tecnológicas são totalmente válidas, representando o problema enfrentado pelo PCP da empresa de forma verossímil.

Já ao avaliar a viabilidade de implementação de um projeto de TI, integrando um método de solução do CLSD-GCST à rotina do PCP da empresa, o programador diz que essa integração com o dia-a-dia dos programadores seria muito simplificada e acredita que um projeto com esse intuito seria viável.

Por fim, ao analisar a operacionalização dos planos gerados pelo CPLEX, o programador afirma que somente seriam realizados alguns ajustes de acordo com estratégias definidas nas reuniões de Planejamento de Vendas e Operações ou S&OP (*Sales and Operations Planning*) da empresa e os planos já estariam aptos a serem enviados à produção. Vale observar que, em uma situação real, os resultados das reuniões de S&OP poderiam ser utilizados para calibração dos parâmetros do modelo antes de resolvê-lo.

Assim conclui-se que o modelo também foi aprovado no processo de validação operacional.

8.1.6 VALIDAÇÃO DE DADOS

O intuito dessa prática de validação é averiguar os dados do modelo, avaliando a suficiência, a acurácia, a confiabilidade e o custo dos mesmos.

Todos os dados utilizados neste trabalho tiveram como fontes arquivos históricos contidos no sistema ERP da empresa estudada, além de normas e procedimentos dessa organização. Como o processo de levantamento de dados ocorreu de modo interativo e os dados são oriundos de bases oficiais da empresa, considera-se que os dados são válidos e se dispensa a execução dessa última prática de acordo com a estratégia de validação adotada.

8.2 VALIDAÇÃO DO VNS

Para validação do VNS adotou-se a abordagem de validação experimental, associada com as facetas Protótipo e Teórica do tetraedro de Oral e Kettani (1993). Para isso, os resultados obtidos pelo VNS (Quadros 5 e 7) foram comparados com os resultados obtidos pelo CPLEX (Quadros 4 e 6).

Ao se comparar os métodos para as instâncias que contemplam até 1 mês de produção, com valores de $T = 7$, $T = 14$, $T = 28$, $T = 30$ e $T = 31$, percebe-se que, com a calibração do *Limitante Superior* = 100, o VNS consegue soluções de qualidade considerável, próximas às obtidas pelo CPLEX (que na maioria dos casos, atinge a otimalidade). Para as instâncias que representam a programação da produção de 1 mês, $T = 28$, $T = 30$ e $T = 31$, o Gráfico 4 ilustra a comparação dos valores da função objetivo obtidas pelo CPLEX, pelo VNS e pelos programadores da produção da empresa, para evidenciar que a qualidade das soluções da metaheurística se aproxima da qualidade das soluções obtidas pelo CPLEX e que ambas são bastante superiores ao planos de produção obtidas pelos programadores da produção da fábrica estudada.

Gráfico 4 – Comparação das funções objetivo para as soluções obtidas via CPLEX, VNS e pelos programadores da produção da empresa
Fonte: Autoria própria

Vale observar que, antes de uma análise mais criteriosa do desempenho do VNS, variações na ordem das 9 estruturas de vizinhanças propostas foram testadas, sem que se observassem melhorias nas soluções obtidas. Logo, manteve-se a ordem original das estruturas de 1 à 9, propostas intuitivamente pelas características de cada estrutura.

Além disso, vale observar que nesses testes que embasaram a validação, o critério de parada do VNS foi que o algoritmo percorresse toda a estrutura de vizinhança após a ocorrência n iterações sem a obtenção de melhoria da solução, sendo esse valor n pré-determinado na constante *Limitante Superior* = 100. Adotou-se esse valor de 100, pois percebeu-se com a realização de alguns experimentos para calibração do método de solução que para valores superiores a 100, tinha-se um grande aumento de tempo computacional, sem melhorias significativas na solução – isso para instâncias com, no máximo, $T = 31$ dias. Além disso, observou-se que, mesmo com o caráter estocástico da etapa de *shaking*, para esse valor de *Limitante Superior* = 100, diversas execuções do VNS retornavam a mesma solução final para uma determinada instância – novamente, isso para instâncias com, no máximo, $T = 31$ dias.

Retomando à análise de desempenho do VNS para as instâncias que contemplam até 1 mês de produção, percebe-se que o método de solução não somente retorna soluções próximas às do CPLEX para diversas instâncias, mas também apresenta tempos de processamento inferiores aos 3.600 segundos estabelecidos de limite para o *solver* para as instâncias com $T = 28$, $T = 30$ e $T = 31$ dias. A Figura 31, a seguir, ilustra esse compromisso entre qualidade da solução obtida e tempo de processamento para o CPLEX e para o VNS proposto.

Figura 31 – Comparação entre as soluções obtidas via CPLEX e via VNS

(continua)

Figura 31 – Comparação entre as soluções obtidas via CPLEX e via VNS

(continuação)

Figura 31 – Comparação entre as soluções obtidas via CPLEX e via VNS

(continuação)

Figura 31 – Comparação entre as soluções obtidas via CPLEX e via VNS

(conclusão)

Fonte: Autoria própria

Já para as instâncias que simulam o planejamento de curto prazo estendido, trimestrais, percebe-se que, mesmo mantendo a calibração do VNS realizada para instâncias menores, o mesmo tem uma *performance* superior à do CPLEX para todas as instâncias testadas ao se variar o tempo limite de execução do CPLEX de 3.600 até 18.000 segundos. Esse resultado está evidente nas Quadros 6 e 7 do Capítulo 7, porém para melhor ilustrar tal comportamento, foi preparada a Figura 32 que mostra a evolução do *Branch and Cut* do CPLEX conforme varia-se o tempo limite de processamento contra a *performance* do VNS com a mesma calibração utilizada para as instâncias menores.

Figura 32 – Comparação entre as soluções obtidas via CPLEX e via VNS para as instâncias trimestrais
Fonte: Autoria própria

Ao observar esses resultados para instâncias baseadas em trimestres, percebe-se que o VNS, nesse caso, passa a superar o CPLEX. A metaheurística proposta alcança mais rapidamente soluções de qualidade considerável quando comparado ao CPLEX⁵.

Outros testes foram realizados para estas instâncias no CPLEX, evidenciando que esse *solver* passa a ser competitivo com essas soluções obtidas pelo VNS, no que tange à qualidade da solução, a partir de 36.000 segundos de processamento. Vale observar que não foi feito um novo procedimento de calibração para o VNS visando à resolução dessas instâncias estendidas, por uma questão de tempo disponível à pesquisa. Porém, é totalmente viável uma nova calibração do VNS, por exemplo, por meio de uma alteração no seu critério de parada, deixando que se busquem soluções de melhor qualidade por mais tempo. Nesse sentido, o experimento que mostra que o CPLEX passa a ser competitivo com a metaheurística a partir de um tempo de processamento de 36.000 segundos passaria a não ser mais válido, pois, ao se alterar o

⁵ Nesse caso, vale observar o fato de que o *gap* de otimalidade calculado para a metaheurística, usa como referência o melhor limitante inferior obtido pelo CPLEX após processar as instâncias trimestrais por 18.000 segundos.

critério de parada do VNS, junto com o aumento de tempo de processamento também haveria um aumento da probabilidade de obtenção de melhores soluções.

Essas últimas considerações abrem espaço para oportunidades de pesquisa futuras explorando melhor a calibração do VNS proposto para diferentes conjuntos de instâncias, porém pode-se afirmar que, para instâncias maiores, o VNS tem um comportamento melhor que o do *Branch-and-Cut* do CPLEX, o que justifica a proposição da metaheurística não somente como uma ferramenta mais acessível à empresa por sua implementação em VBA viabilizando uma interface em Microsoft Excel, mas também por consistir em uma alternativa viável para a solução de instâncias maiores, para as quais o *solver* encontra maiores dificuldades.

Por fim, após traçar esse paralelo entre as *performances* do CPLEX e do VNS proposto para as instâncias estudadas, serão analisados alguns aspectos mais específicos do comportamento dessa metaheurística a fim finalizar seu processo de validação experimental.

Uma primeira análise interessante é a comparação da qualidade das soluções iniciais obtidas pela heurística construtiva proposta e das soluções finais obtidas após a busca realizada pelo VNS. O Quadro 9 contém essa comparação para as 40 instâncias estudadas e o Quadro 10 contém uma análise estatística da qualidade das soluções obtidas por ambos os métodos.

Mês	Dias	Solução Heurística Construtiva	Solução VNS	Gap Heurística Construtiva	Gap VNS
Janeiro	T = 7	153.165	120.639	26,22%	6,33%
	T = 14	310.825	257.500	35,54%	22,19%
	T = 31	514.099	438.034	21,61%	8,00%
Fevereiro	T = 7	193.862	139.381	31,29%	4,44%
	T = 14	380.857	236.642	38,24%	0,60%
	T = 28	1.140.245	445.979	63,12%	5,71%
Março	T = 7	162.911	134.703	17,45%	0,16%
	T = 14	281.958	254.098	10,08%	0,22%
	T = 31	676.565	641.382	17,76%	13,24%
Abril	T = 7	143.752	126.016	12,43%	0,10%
	T = 14	279.965	242.824	13,38%	0,13%
	T = 30	585.094	517.175	12,96%	1,52%
Maio	T = 7	227.729	151.541	33,61%	0,23%
	T = 14	340.035	283.943	21,33%	5,79%
	T = 31	700.926	593.533	20,45%	6,05%

Quadro 9 – Comparação entre a qualidade da solução inicial obtida via heurística construtiva e da solução final obtida pelo VNS

(continua)

Mês	Dias	Solução Heurística Construtiva	Solução VNS	Gap Heurística Construtiva	Gap VNS
Junho	T = 7	230.504	180.761	24,74%	4,03%
	T = 14	342.178	310.786	11,01%	2,02%
	T = 30	711.912	654.583	12,58%	4,92%
Julho	T = 7	170.610	143.506	16,07%	0,22%
	T = 14	474.473	261.573	45,00%	0,24%
	T = 31	630.917	555.647	13,17%	1,41%
Agosto	T = 7	144.368	120.418	16,68%	0,11%
	T = 14	253.991	230.300	9,43%	0,11%
	T = 31	567.321	527.654	7,26%	0,28%
Setembro	T = 7	137.211	137.211	0,17%	0,17%
	T = 14	266.793	265.602	1,81%	1,37%
	T = 30	629.086	574.260	11,56%	3,12%
Outubro	T = 7	178.456	159.391	20,43%	10,91%
	T = 14	288.001	268.042	7,10%	0,18%
	T = 31	572.439	528.382	11,00%	3,58%
Novembro	T = 7	117.070	108.370	7,66%	0,25%
	T = 14	177.703	167.541	6,01%	0,30%
	T = 30	344.716	305.237	17,77%	7,13%
Dezembro	T = 7	91.679	74.870	18,57%	0,29%
	T = 14	347.061	180.000	52,87%	9,12%
	T = 31	764.637	493.637	71,94%	56,53%
1º TRI	T = 90	4.282.671	3.280.310	77,97%	71,24%
2º TRI	T = 91	2.332.241	1.980.317	47,24%	37,86%
3º TRI	T = 92	2.121.295	1.843.046	43,41%	34,87%
4º TRI	T = 92	1.522.506	1.327.909	43,04%	34,69%

Quadro 9 – Comparação entre a qualidade da solução inicial obtida via heurística construtiva e da solução final obtida pelo VNS

(conclusão)

Fonte: Autoria própria

Instâncias	Gap Médio Heurística Construtiva	Gap Médio VNS	Desvio Padrão Gap Heurística Construtiva	Desvio Padrão Gap VNS
T = 7	18,78%	2,27%	9,51%	3,48%
T = 14	20,98%	3,52%	17,31%	6,51%
T = 28, 30, 31	23,43%	9,29%	21,09%	15,29%
T = 90, 91, 92	52,91%	44,66%	16,81%	17,77%
Total 40 instâncias	24,25%	8,99%	18,82%	16,10%

Quadro 10 – Análise estatística dos dados do Quadro 9

Fonte: Autoria própria

Ao se observar os Quadros 9 e 10, pode-se inferir:

- a heurística construtiva proposta atinge seu objetivo de proporcionar uma solução inicial de considerável qualidade, isso fica muito claro ao se analisarem os *gaps* médios das soluções obtidas por esse método – são valores relativamente baixos e obtidos em tempos computacionais inferiores a 1 segundo para todas as 40 instâncias, isso torna a heurística construtiva bastante razoável e passível de aplicação. Como uma ressalva, vale observar que para os diferentes tamanhos de instâncias avaliadas, a heurística construtiva apresenta valores de desvio padrão altos, ou seja, há uma certa variabilidade na qualidade das soluções obtidas de instância para instância;
- o VNS proposto também se mostra eficiente reduzindo consideravelmente o *gap* da solução inicial obtida pela heurística construtiva, a pior das reduções médias ocorre para as instâncias trimestrais dos problemas de dimensionamentos estendidos, porém já se discutiu anteriormente que esse resultado poderia ser melhorado como uma melhor calibração da metaheurística para esses casos. Além disso, os desvios padrão obtidos ao se compararem os *gaps* das soluções finais obtidas pelo VNS são menores que os desvios padrão calculados para a heurística construtiva, apontando uma menor variabilidade na qualidade das soluções finais que na qualidade das soluções iniciais.

Dando continuidade a avaliação do VNS propriamente dito, é interessante que se observe o efeito que cada uma das estruturas de vizinhança tem nas diferentes execuções do método. O Gráfico 5, a seguir, ilustra, em números absolutos, quanta vezes cada uma das estruturas de vizinhança foi utilizada na fase de *shaking* do VNS e quantas vezes cada estrutura proporcionou melhorias na solução do problema no total de execuções realizadas para a resolução das 40 instâncias estudadas.

Gráfico 5 – Comportamento em números absolutos das estruturas de vizinhança do VNS na solução das 40 instâncias estudadas
Fonte: Autoria própria

A análise do Gráfico 5, mostra que todas as estruturas de vizinhança definidas proporcionam melhorias das soluções incumbentes durante a execução do VNS. Porém algumas destacam-se em relação às outras, como é o caso das estruturas 1 – *Transpose*, 5 – *Aleatory Campaign Exchange* e 7 - *Campaign Size Increase*. Outra possível observação é a de que algumas estruturas de vizinhança são mais executadas que outras, isso pois dois principais motivos:

- as primeiras estruturas de vizinhanças tendem a ser mais acionadas pela própria concepção do algoritmo, pois, independente da estrutura que se está explorando, toda vez que se encontra uma solução x'' mais vantajosa que a solução x incumbente, o algoritmo necessariamente volta a explorar a primeira estrutura de vizinhança, ou seja, as primeiras estruturas são naturalmente mais exploradas;
- dependendo da solução incumbente, algumas estruturas de vizinhança não possuem nenhuma solução, constituindo um conjunto vazio, e, desse modo, o algoritmo passa para a estrutura subsequente sem utilizar aquela estrutura naquele momento.

Verifica-se que as vizinhanças mais exploradas são 1 – *Transpose*, 3 – *Modified Hybrid Swap* e 4 – *Aleatory Campaign Insert*. Esse resultado reforça os argumentos acima, pois a estrutura 1 é sempre acionada quando se encontra uma solução melhor que a incumbente, já as estruturas 3 e 4 são duas das estruturas de vizinhança que sempre proporcionam a obtenção de vizinhos (para ambas sempre haverá um vizinho, independente da solução incumbente), ou seja, o algoritmo nunca irá passar a estrutura subsequente sem explorá-la.

Ao comparar-se a relação número de iterações realizadas com uma determinada estrutura de vizinhança e o número de melhorias na solução incumbente obtidas ao se explorar tal estrutura, é possível tirar alguma conclusão sobre a eficiência da estrutura de vizinhança. O Quadro 11 contém essas relações, nele denominadas de taxa de eficiência, para os mesmos dados que estão ilustrados no Gráfico 5.

Estruturas de Vizinhança ▾	Nº Total Iterações	Nº Total Melhorias	Taxa de Eficiência*
1	39666	209	0,00527
2	28586	33	0,00115
3	34208	12	0,00035
4	29210	50	0,00171
5	22285	117	0,00525
6	15511	29	0,00187
7	6808	85	0,01249
8	4075	18	0,00442
9	3457	2	0,00058
Total Geral	183806	555	0,00302

* Taxa de Eficiência = Nº Total Melhorias/ Nº Total Iterações

Quadro 11 – Eficiência global das diferentes estruturas de vizinhança

Fonte: Autoria própria

Logo, o Quadro 11 evidencia que, em linhas gerais, algumas estruturas de vizinhança foram extremamente eficientes como, por exemplo, as estruturas 7 - *Campaign Size Increase* e 5 - *Aleatory Campaign Exchange*, enquanto outras se demonstraram pouco eficientes para as instâncias como as estruturas 3 - *Modified Hybrid Swap* e 9 - *Campaign Exclusion*.

Esse tipo de informação pode ser útil para uma calibração mais fina do método de solução proposto, sendo possível inclusive uma parametrização que permita que o VNS realize uma busca mais extensiva em estruturas mais promissoras, no sentido de eficiência.

Essa ideia de eficiência foi generalizada para os diferentes tamanhos de instâncias do problema, dependendo da dimensão T do horizonte de planejamento. Os resultados dessa generalização encontram-se, a seguir no Quadro 12 e o Gráfico 6 ilustra as taxas para as diferentes estruturas para os diversos tamanhos de instâncias.

Estruturas de Vizinhança ▾	Nº Total Iterações	Nº Total Melhorias	Taxa de Eficiência*
☐ 7 dias	24504	52	0,00212
1	5145	8	0,00155
2	2500	0	0,00000
3	5506	1	0,00018
4	3597	15	0,00417
5	3027	13	0,00429
6	2261	7	0,00310
7	868	8	0,00922
8	800	0	0,00000
9	800	0	0,00000
☐ 14 dias	41669	103	0,00247
1	8727	27	0,00309
2	5801	1	0,00017
3	8262	5	0,00061
4	6638	16	0,00241
5	4758	31	0,00652
6	3387	3	0,00089
7	1818	16	0,00880
8	1221	2	0,00164
9	1057	2	0,00189
☐ T = 28, 30, 31	75122	220	0,00293
1	15738	81	0,00515
2	12718	11	0,00086
3	13528	5	0,00037
4	12439	13	0,00105
5	9427	49	0,00520
6	6456	12	0,00186
7	2277	43	0,01888
8	1339	6	0,00448
9	1200	0	0,00000
☐ T = 90, 91, 92	42511	180	0,00423
1	10056	93	0,00925
2	7567	21	0,00278
3	6912	1	0,00014
4	6536	6	0,00092
5	5073	24	0,00473
6	3407	7	0,00205
7	1845	18	0,00976
8	715	10	0,01399
9	400	0	0,00000
Total Geral	183806	555	0,00302

Quadro 12 – Eficiência das estruturas de vizinhança para os diferentes tamanhos de instâncias
 Fonte: Autoria própria

Gráfico 6 – Taxa de eficiência das estruturas de vizinhança para os diferentes tamanhos de instâncias
Fonte: Autoria própria

Com a informação no Gráfico 6, fica perceptível e evidencia-se de modo claro que algumas estruturas de vizinhança realmente são mais eficientes para todos os tamanhos de instâncias avaliados (por exemplo, as estruturas 7 - *Campaign Size Increase* e 5 – *Aleatory Campaign Exchange*), figurando entre as mais eficientes para todos os casos. Já para outras estruturas, encontram-se variações de eficiência dependendo do tamanho das instâncias.

Uma última informação que pode ser avaliada na validação do método de solução é a velocidade com a qual o método converge para os diferentes tamanhos de instâncias. Ao se confrontarem a diferença entre o *gap* médio da solução inicial (obtida pela heurística construtiva) e o *gap* médio da solução final do VNS com o número médio de iterações do VNS que resultaram em melhoria para os diferentes tamanhos de instâncias, pode-se ter uma ideia de quantas iterações com melhoria da solução incumbente foram necessárias para a obtenção da solução final e se pode ter uma medida da velocidade de convergência do algoritmo. O Quadro 13 compila essas duas medidas, confrontando-as.

Instâncias	Gap Médio Heurística Construtiva	Gap Médio VNS	Diferença entre os gaps	Nº Médio de Iterações que implicaram em melhoria	Taxa média de diminuição do gap por iteração*
T = 7	18,78%	2,27%	16,51%	0,48	34,28%
T = 14	20,98%	3,52%	17,46%	0,95	18,31%
T = 28, 30, 31	23,43%	9,29%	14,14%	2,04	6,94%
T = 90, 91, 92	52,91%	44,66%	8,25%	5,00	1,65%
Total 40 instâncias	24,25%	8,99%	15,26%	1,55	9,86%

* Taxa média de diminuição do gap por iteração = $\frac{\text{diferença entre os gaps}}{\text{Nº médio de iterações que implicaram em melhoria}}$

Quadro 13 – Convergência do VNS para os diferentes tamanhos de instâncias
Fonte: Autoria própria

Pelos dados do Quadro 13, evidencia-se que, para instâncias menores (por exemplo, $T = 7$ e $T=14$), o VNS converge mais rapidamente para soluções melhores, proporcionando soluções finais com *gaps* baixos em poucas iterações que são suficientes para a melhoria da solução. À medida que as instâncias aumentam, o VNS passa a proporcionar soluções de qualidade reduzida (quando comparadas aos resultados obtidos para as pequenas instâncias) e também passa a convergir mais lentamente, precisando de mais iterações que impactam em melhoria da solução incumbente para chegar à solução final.

Desse modo, pode-se considerar o VNS proposto válido, conforme a validação experimental realizada. O VNS proporciona soluções de qualidade considerável em um baixo tempo computacional, inclusive, superando o CPLEX para instâncias maiores com $T = 90, 91$ e 92 . Ainda foi realizada uma análise do comportamento do VNS que evidenciou o bom desempenho da heurística construtiva utilizada por esse método de solução para obtenção de soluções iniciais e proporcionou a compreensão do impacto resultante do uso de cada estrutura de vizinhança, bem como da velocidade de convergência do algoritmo. Essas informações podem embasar uma melhor calibração do método de solução ou, até mesmo, a evolução do mesmo em pesquisas futuras.

9 CONCLUSÕES

Os resultados desse trabalho permitem a proposição de um novo modelo matemático baseado em programação inteira mista para a resolução do problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção na indústria de embalagens de vidro, o CLSD-GCST.

O CLSD-GCST abrange o planejamento de curto prazo, ou operacional, e tem como principais diferenciais o fato de incorporar especificidades desse processo produtivo não tratadas na literatura, principalmente no que tange ao impacto das trocas de fabricação pelos seguintes fatores:

- a) tempo de *ramp-up* ou T2;
- b) perdas de produtividade por variação de extração.

A resolução de 40 instâncias do CLSD-GCST baseadas em um problema real de uma grande indústria do setor em um dos *solvers* estado-da-arte para programação inteira mista, o pacote comercial IBM ILOG CPLEX Optimization Studio (Versão 12.5), permitiu a validação desse modelo segundo a metodologia existente na literatura proposta por Oral e Kettani (1993). Esse processo de validação contou, inclusive, com a participação de profissionais da indústria de embalagens de vidro.

Foi realizada, ainda, uma validação específica de competência do modelo CLSD-GCST, baseada no modelo SCOR, que possibilitou que se inferisse uma concreta possibilidade de ganhos financeiros e estratégicos na aplicação desse modelo aliado a um método de solução em cenários reais enfrentados pelas indústrias de embalagens de vidro.

Foram desenvolvidas uma heurística construtiva que permite rapidamente a obtenção de soluções factíveis para o CLSD-GCST e uma metaheurística VNS que permite a obtenção de soluções de qualidade para esse mesmo problema em um curto intervalo de tempo. O VNS proposto permite ainda que se supere a limitação encontrada pelo *solver* de programação inteira mista na solução de instâncias que abrangem horizontes de planejamento superiores a um mês. Além disso, o VNS foi experimentalmente validado com as mesmas 40 instâncias baseadas no problema real e seu comportamento foi discutido, principalmente no que tange à eficiência das distintas estruturas de vizinhança propostas e da convergência do método para os diferentes tamanhos de instâncias.

É válido ressaltar que, como o VNS foi implementado na linguagem Visual Basic for Applications (VBA) e aplicado a planilhas do *software* Microsoft Excel, o resultado final de

sua implementação foi uma ferramenta de simples interface e com a robustez necessária para a utilização em situações reais enfrentadas pela indústria de embalagens de vidro. Assim, o resultado final do trabalho gerou também um protótipo de SAD no Microsoft Excel que poderia ser utilizado facilmente por qualquer indústria do setor com um simples projeto de TIC.

Dessa forma, é possível afirmar que este trabalho resultou em importantes contribuições referentes à literatura das áreas de conhecimento abordadas:

- a) no que se diz respeito ao estudo do dimensionamento e sequenciamento de lotes, o trabalho contribuiu de forma efetiva ao viabilizar a incorporação de novas especificidades de um processo produtivo aos modelos clássicos existentes, além de enriquecer a literatura com o estudo de instâncias baseadas em um problema real auxiliando a suprir essa lacuna apontada por Clark, Almada-Lobo e Almeder (2011);
- b) em um sentido mais amplo de gestão de processos e operações, o trabalho evidencia as vantagens que podem ser obtidas ao se conciliarem abordagens mais quantitativas, como a Pesquisa Operacional, e mais qualitativas, como o BPM – representado pelo uso do SCOR;
- c) sob um enfoque do estudo de metaheurísticas, o trabalho contribui com a literatura consistindo em um caso bem sucedido da aplicação da metaheurística VNS a um problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes com máquinas paralelas.

Por fim, como oportunidades de trabalhos futuros, destacam-se:

- a) desenvolvimento de um SAD que integre modelos de planejamento de longo prazo de Almada-Lobo (2007) e Almada-Lobo, Oliveira e Carravilla (2008), o CLSD-GCST e os respectivos métodos de solução propostos, todos baseados em VNS;
- b) o VNS proposto nesse trabalho pode ser mais explorado, com base nos resultados apresentados no Capítulo 8 durante a validação do método de solução. Uma calibração mais fina do VNS para os diferentes tamanhos de instâncias pode ser obtido, incluindo uma parametrização que permita que o VNS realize uma busca mais extensiva em estruturas de vizinhança mais promissoras;
- c) a possibilidade aplicação do modelo e do método de solução propostos (com eventuais ajustes) para indústrias com características semelhantes à indústria de embalagens de vidro.

REFERÊNCIAS⁶

ABSI, N.; KEDAD-SIGHOUM, S.; DAUZÈRE-PÉRÈS, S. Uncapacitated lot-sizing problem with production time windows early productions, backlogs and lost sales. **International Journal of Production Research**, v. 49, n. 9, p. 2551-2566, 2011.

AFENTAKIS, P. Simultaneous lot sizing and sequencing for multistage production systems. **IIE Transactions**, v. 17, n. 4, p. 327-331, 1985.

AKBALIK, A.; PENZ, B. Comparison of just-in-time and time windows delivery policies for a single item capacitated lot sizing problem. **International Journal of Production Research**, v. 49, n.9, p. 2567-2585, 2011.

ALIDAEI, B.; WOMER, N.K. Scheduling with time dependent processing times: Review and extensions. **Journal of the Operational Research Society**, v. 50, p. 711-720, 1999.

ALMADA-LOBO, B. **Lotsizing and Scheduling in the Glass Container Industry**. 2007. 164f. Tese (Doutorado) - Universidade do Porto, Porto, 2007.

ALMADA-LOBO, B.; KLABJAN, D.; CARRAVILLA, M. A.; OLIVEIRA, J. F. Single machine multi-product capacitated lotsizing with sequence-dependent setups. **International Journal of Production Research**, v. 45, n. 20, p. 4873-4894, 2007.

ALMADA-LOBO, B., OLIVEIRA, J.F. E CARRAVILLA M.A. Production planning and scheduling in the glass container industry: A VNS approach. **International Journal of Production Economics**, v. 114, n.1, p. 363-375, 2008.

ALMADA-LOBO, B.; JAMES, R. Neighborhood search metaheuristics for capacitated lotsizing with sequence-dependent setups. **International Journal of Production Research**, v. 48, n. 3, p. 861-878, 2010.

ALVAREZ-Valdes, R., FUERTES, A.; TAMARIT, J.M.; GIMENEZ, G., RAMONS, R. A heuristic to schedule flexible job-shop in a glass factory. **European Journal of Operational Research**, v. 165, n. 2, p. 525-534, 2005.

⁶ De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023.

ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. Pesquisa operacional. Rio de Janeiro: Campus/ Elsevier, 2007.

BELVAUX, G.; WOLSEY, L. A. Modelling practical lot-sizing problems as mixed-integer programs. **Management Science**, v. 47, n. 7, p. 993-1007, 2001.

BERTRAND, J.W.; FRANSOO, J.C. Modelling and Simulation Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 241-264, 2002.

BRAHIMI, N; DAUZERE-PERES, S.; NAJID, N. M.; NORDLI, A. Single Item Lot Sizing Problems. **European Journal of Operational Research**, v. 168, p. 1-16, 2006.

BRUGGEMANN, W.; JAHNKE, H. The discrete lot-sizing and scheduling problem: Complexity and modification for batch availability. **European Journal of Operational Research**, v. 124, n. 3, p. 511-528, 2000.

BUSCHER, U.; SHEN, L. An integrated tabu search algorithm for the lot streaming problem in job shops. **European Journal of Operational Research**, v. 199, n. 2, p. 385-399, 2009.

BUSCHKUHL, L.; SAHLING, F.; HELBER, S.; TEMPELMEIER, H. Dynamic capacitated lot-sizing problems: A classification and review of solution approaches. **OR Spectrum**, v. 32, n.2, p.231-261, 2010.

CAMARGO, V. C. B., TOLEDO, F. M. B. E ALMADA-LOBO, B. Three time-based scale formulations for the two-stage lot sizing and scheduling in process industries. **Journal of the Operational Research Society**, v.63, n.11, p. 1613-1630, 2012.

CHAN, F.T.S.; WONG, T.C.; CHAN, L.Y. Lot streaming for product assembly in job shop environment. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 24, n. 3, p. 321-331, 2008.

CHEN, K.; JI, P. A mixed integer programming model for advanced planning and scheduling (APS). **European Journal of Operational Research**, v. 181, n. 1, p. 515-522, 2007.

CHENG, R.; GEN, M.; TSUJIMURA, Y. A tutorial survey of job-shop scheduling problems using genetic algorithms, part II: Hybrid genetic search strategies. **Computers & Industrial Engineering**, v. 36, n. 2, p. 343-364, 1999.

CLARK, A., ALMADA-LOBO, B. E ALMEDER, C. Lot sizing and scheduling: industrial extensions and research opportunities. **International Journal of Production Research**, v.49, n.9, p. 2457-2461, 2011.

CORRÊA, H. L.; GIANESI, I. G. N.; CAON, M. **Planejamento, Programação e Controle da Produção: MRP II/ ERP: conceitos, uso e implantação: base para SAP, Oracle Applications e outros softwares integrados de gestão**. 5ª edição. São Paulo: Atlas, 2008.

DAUZÈRE-PÉRÈS, S., BRAHIMI, N., NAJID, N. M. E NORDLI, A. **The single-item lot sizing problem with time windows**. Nantes: Ecole des Mines de Nantes, 2002. Technical report.

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

DEFERSHA, F.M.; CHEN, M. A linear programming embedded genetic algorithm for an integrated cell formation and lot sizing considering product quality. **European Journal of Operational Research**, v. 187, n. 1, p. 46-69, 2008.

DIABY, M.; CRUZ, J.M.; NSAKANDA, A.L. Shortening cycle times in multi-product, capacitated production environments through quality level improvements and setup reduction. **European Journal of Operational Research**, v. 228, n.3, p. 526-535, 2013.

EL-GHAZALI T. **Metaheuristics: from design to implementation**. Chichester: Wiley, 2009.

EL-HAFSI, M. An operational decision model for lead-time and price quotation in congested manufacturing systems. **European Journal of Production Research**, v. 40, p. 4285-4304, 2002.

FLOUDAS, C.A.; LIN, X. Continuous-time versus discrete-time approaches for scheduling of chemical processes: A review. **Computers and Chemical Engineering**, v. 28, p. 2109-2129, 2004.

FRANCK, B.; NEUMANN, K.; SCHWINDT, C. A capacity-oriented hierarchical approach to single-item and small-batch production planning using project-scheduling methods. **OR Spectrum**, v. 19, n. 2, p. 77-85, 1997.

GALSS, C.A.; POSSANI, E. Lot streaming multiple Jobs in a flow shop. **International Journal of Production Research**, v. 49, p. 2669-2681, 2011.

GEORGIAIDIS, P.; MICHALOUDIS, C. Real-time production planning and control system for job-shop manufacturing: A system dynamics analysis. **European Journal of Operational Research**, v. 216, n.1, p. 94-104, 2012.

GHOSH, S.; GAGNON, R.J. A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems. **International Journal of Production Research**, v. 27, n.4, p. 637-670, 1989.

GICQUEL, C.; MINOUX, M.; DALLERY, Y. Exact solution approaches for the discrete lot-sizing and scheduling problem with parallel resources. **International Journal of Production Research**, v. 49, n. 9, p. 2587-2603, 2011.

GONÇALVES, J.F.; SOUSA, P.S.A. A genetic algorithm for lot sizing and scheduling under capacity constraints and allowing backorders. **International Journal of Production Research**, v. 49, n. 9, p. 2683-2703, 2011.

GUIMARÃES, L.; KLABJAN, D.; ALMADA-LOBO, B. Modeling lotsizing and scheduling problems with sequence dependent setups. **European Journal of Operational Research**, v. 239, n. 3, p. 644-662, 2014.

HAASE, K. Capacitated lot-sizing with sequence dependent setup costs. **Operations Research Spektrum**, v. 18, p. 51-59, 1996.

HANS, E.; VAN DE VELDE, S. The lot sizing and scheduling of sand casting operations. **International Journal of Production Research**, v. 49, p. 2481-2499, 2011.

HANSEN, P.; MLADENOVIĆ, N.; MORENO PÉREZ, JA. Variable Neighborhood search: methods and applications. **4OR: A Quarterly Journal of Operations Research**, v. 6, n. 4, p. 319-360, 2008.

HARJUNKOSKI, I.; GROSSMANN, I.E. Decomposition techniques for multistage scheduling problems using mixed-integer and constraint programming methods. **Computers & Chemical Engineering**, v. 26, n. 11, p. 1533-1552, 2002.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN G. J. Introdução à pesquisa operacional. 4ª edição, Porto Alegre: AMGH, 2013.

HUANG, J.Y.; YAO, M.J. A genetic algorithm for solving the economic lot scheduling problem in flow shops. **International Journal of Production Research**, v. 46, n. 14, p. 3737-3761, 2008.

IERAPETRITOU, M.G.; FLOUDAS, C.A. Effective continuous-time formulation for short-term scheduling: 2. Continuous and semicontinuous processes. **Industrial Engineering and Chemical Research**, v. 37, p. 4360-4374, 1998.

IERAPETRITOU, M.G.; HENE, T.S.; FLOUDAS, C.A. Short-term scheduling of batch plants with multiple intermediate due dates. **Computers and Chemical Engineering**, v. 23, p. 525-528, 1999.

JAIN, A.S.; MEERAN, S. Deterministic job-shop scheduling: Past, present and future. **European Journal of Operational Research**, v. 113, n. 2, p. 390-434, 1999.

JAMES, R. J. W.; ALMADA-LOBO, B. Single and parallel machine capacitated lotsizing and scheduling: New iterative MIP-based neighborhood search heuristics. **Computers & Operations Research**, v.38, n.12, p.1816-1825, 2011.

JANS, R.; DEGRAEVE, Z. Meta-heuristics for dynamic lot sizing: A review and comparison of solution approaches. **European Journal of Operational Research**, v. 177, n. 3, p. 1855-1875, 2007.

JANS, R.; DEGRAEVE, Z. Modeling industrial lot sizing problems: a review. **International Journal of Production Research**, v. 46, n. 6, p. 1619-1643, 2008.

JODLBAUER, H. An approach for integrated scheduling and lot-sizing. **European Journal of Operational Research**, v. 172, n. 2, p. 386-400, 2006.

KACZMARCZYK, W. Proportional lot-sizing and scheduling problem with identical parallel machines. **International Journal of Production Research**, v. 49, n. 9, p. 2605-2623, 2011.

KARIMI, B.; GHOMI, S.M.T.F.; WILSON, J.M. The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms. **Omega The international Journal of Management Science**, v. 31, n.5, p. 365-378, 2003.

KARIMI-NASAB, M.; ARYANEZHAD, M.B. A multi-objective production smoothing model with compressible operating times. **Applied Mathematical Modelling**, v. 35, n. 7, p. 3596-3610, 2011.

KARIMI-NASAB, M.; FATEMI GHOMI, S.M.T. Multi-objective production scheduling with controllable processing times and sequence-dependent setups for deteriorating items. **International Journal of Production Research**, v. 50, n. 24, 2012. Disponível em < <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2011.649800> >. Acesso em 19 jun. 2014.

KARIMI-NASAB, M.; GHODOOSI, M.R. A multi-level production scheduling model for two stage flowshop. In 1st International symposium & 10th Balkan conference on operational research (BALCOR), 2011, Thessaloniki, Greece, 2011.

KARIMI-NASAB, M.; HADDAD, H.; GHANBARI, P. A simulated annealing for the single machine batch scheduling with deterioration and precedence constraints. **Asian Journal of Industrial Engineering**, v. 4, n. 1, p. 1-16, 2012.

KARIMI-NASAB, M.; KONSTANTARAS, I. A random search heuristic for a multi-objective production planning. **Computers & Industrial Engineering**, v. 62, n. 2, p. 479-490, 2012.

KARIMI-NASAB, M.; SEYEDHOSEINI, S.M. Multi-level lot sizing and job shop scheduling with compressible process times: A cutting plane approach. **European Journal of Operational Research**, v.231, n. 3, p. 598-616, 2013.

KHOUIJA, M.; MICHALEWICZ, Z.; WILMOT, M. The use of genetic algorithms to solve the economic lot size scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, v. 110, n. 3, p. 509-524, 1998.

KIM, J.U.; KIM, Y.D. Simulated annealing and genetic algorithms for scheduling products with multi-level product structure. **Computers & Operations Research**, v. 23, n. 9, p. 857-868, 1996.

KIM,S.I.; HAN, L.; LEE, Y.; PARK, E. Decomposition based heuristic algorithms for lot-sizing and scheduling problem treating time horizon as a continuum. **Computers & Operations Research**, v. 37, n. 2, p. 302-314, 2010.

KOVACEC, M., PILIPOVIC, A. E STEFANIC, N. Improving the quality of glass containers production with plunger process control. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v.3, n.4, p. 304-310, 2010.

KUIK, R.; SALOMON, M.; VAN WASSENHOVE, L. N. Batching decisions: structure and models. **European Journal of Operational Research**, v.75, p. 243-263, 1994.

LAM, K., XING, W. New trends in parallel machine scheduling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 17, n. 3, p. 326-338, 1997.

LEE, C. Y.; LEI, L.; PINEDO, M. Current trends in deterministic scheduling. **Annals of Operations Research**, v. 70, p. 1-41, 1997.

LUO, H.; HUANG, G.Q.; ZHANG, Y.; DAI, Q.; CHEN, X. Two-stage hybrid batching flowshop scheduling with blocking and machine availability constraints using genetic algorithm. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 25, n. 6, p. 962-971, 2009.

MAGNANTI, T.L.; VACHANI, R. A Strong cutting plane algorithm for production scheduling with changeover costs. **Operations Research**, v. 38, n. 3, p. 456-473, 1990.

MARAVELIAS, C. T.; SUNG, C. Integration of production planning and scheduling: Overview, challenges and opportunities. **Computers and Chemical Engineering**, v. 33, n. 12, p. 1919-1930, 2009.

MENEZES, A.; CLARK, A.; ALMADA-LOBO B. Capacitated lot-sizing and scheduling with sequence-dependent, period-overlapping and non-triangular setups. **Journal of Scheduling**, vol. 14, n. 2, p. 209–219, 2011.

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

MITROFF, I. I.; BETZ, F.; PONDY, L. R.; SAGASTI, F. On managing science in the systems age: two schemas for the study of science as a whole systems phenomenon. **Interfaces**, vol. 4, n. 3, p. 46-58, 1974.

MLADENOVIC N. A variable neighbourhood algorithm – a new metaheuristic for combinatorial optimization. Abstracts of papers presented at Optimization Days, Montreal, p. 112, 1995.

MONKMAN, S.K.; MORRICE, D.J.; BARD, J.F. A production scheduling heuristic for an electronics manufacturer with sequence-dependent setup costs. **European Journal of Operational Research**, v. 187, n. 3, p. 110-1114, 2008.

MORABITO, R.; PUREZA, V. Modelagem e simulação. In: MIGUEL, P. A. C. (Ed.). Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010. cap. 8, p. 165–194.

NICHOLSON, T. Optimization in industry, Vol. 1, Optimization Techniques, Longman Press, London, 1971.

NOZICK, L.K.; TURNQUIST, M.A.; LAWTON, C.R.; LIST, G.F.; JONES, D.A. WRIGHT, S.T.; KJELDGAARD, A.E. Production planning for a project job shop, with application to disassembly, evaluation and maintenance of nuclear weapons. **Production Planning & Control**, v. 13, n. 2, p. 187-198, 2002.

ORAL, M.; KETTANI, O. The facets of the modeling and validation process in operations research. **European Journal of Operational Research**, v. 66, n. 2, p. 216-234, 1993.

OUENNICHE, J; BERTRAND, J.W.M. The finite horizon economic lot sizing problem in job shops: The multiple cycle approach. **International Journal of Production Economics**, v. 74, n. 1-3, p. 49-61, 2001.

OUENNICHE, J; BOCTOR, F.F. The two-group heuristic to solve the multi-product, economic lot sizing and scheduling problem in flow shops. **European Journal of Operational Research**, v. 129, n. 3, p. 539-554, 2001.

OZDAMAR, L; BIRBIL, S.I. Hybrid heuristics for the capacitated lot sizing and loading problem with setup times and overtime decisions. **European Journal of Operations Research**, v. 110, n. 3, p. 525-547, 1998.

OZTURK, C.; ORNECK, A.M. Capacitated lot sizing with linked lots for general product structures in job shops. **Computers & Industrial Engineering**, v. 58, n. 1, p. 151-164, 2010.

PAN, C.; YANG, G.K. A method of solving a large-scale rolling batch scheduling problem in steel production using a variant of column generation. **Computers & Industrial Engineering**, v. 56, n. 1, p. 156-178, 2009.

PARTHANADEE, P. BUDDHAKULSOMSIRI, J. Simulation modeling and analysis for production scheduling using real-time dispatching rules: A case study in canned fruit industry. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 70, n. 1, p. 245-255, 2010.

PAUL, R.J. A production scheduling problem in the Glass-Container Industry. **Operations Research**, v.27, n.2, p. 290-302, 1979.

POCHET, Y.; WOLSEY, L. A. Production Planning by Mixed Integer Programming. **Springer Series in Operations Research and Financial Engineering**. Nova York, 2006.

POTTS, C.N.; VAN WASSENHOVE, L.N. Integrating scheduling with batching and lot sizing: A review of algorithms and complexity. **Journal of the Operational Research Society**, v.43, n. 5, p. 395-406, 1992.

QUADT, D.; KUHN, H. Capacitated lot-sizing and scheduling with parallel machines, backorders, and setup carry-over. **Naval Research Logistics**, v. 56, n. 4, p. 366-384, 2009.

RAZA, A.S.; AKGUNDUZ, A. A comparative study of heuristic algorithms on economic lot scheduling problem. **Computers & Industrial Engineering**, v. 55, n. 1, p. 34-109, 2008.

RICHARD, P.; PROUST, C. Maximizing benefits in short-term planning in bottle-glass industry. **International Journal of Production Economics**, v. 64, n. 1-3, p. 11-19, 2000.

ROCHA, P.L.; RAVETTI, M.G.; MATEUS, G.R. The metaheuristic GRASP as an upper bound for a branch and bound algorithm in a scheduling problem with non-related parallel machines and sequence-dependent setup times. In: EU/ME INTERNATIONAL WORKSHOP ON DESIGN AND EVALUATION OF ADVANCED HYBRID META-HEURISTICS, 4th, 2004, Nottingham. Proceedings... Nottingham, 2004, p. 62-67.

RUIZ, R.; VARQUEZ-RODRIGUEZ, J.A. The hybrid flow shop scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, v. 205, n. 1, p. 1-18, 2010.

SALVIETTI, L.; SMITH, N.R. A Profit maximizing economic lot scheduling problem with price optimization. **European Journal of Operational Research**, v. 184, n. 3, p. 900-914, 2008.

SCHWINDT, C.; TRAUTMANN, N. Batch scheduling in process industries: An application of resource-constrained project scheduling. **OR Spectrum**, v. 22, n. 4, p. 501-524, 2000.

SHABTAY, D.; STEINER, G. A survey of scheduling with controllable processing times. **Discrete Applied Mathematics**, v. 155, n. 13, p. 1643-1666, 2007.

SHEN, L.; BUSCHER, U. Solving the serial batching problem in job shop manufacturing systems. **European Journal of Operational Research**, v. 221, n. 1, p. 14-26, 2012.

STADTLER, H. Multilevel capacitated lot-sizing and resource-constrained project scheduling: An integrating perspective. **International Journal of Production Research**, v. 43, n. 24, p. 5253-5270, 2005.

STADTLER, H. Multi-level single machine lot-sizing and scheduling with zero lead time. **European Journal of Operational Research**, v. 209, n. 3, p. 241-252, 2011.

STADTLER, H.; SAHLING, F. A lot-sizing and scheduling model for multi-stage flow lines with zero lead times. **European Journal of Operational Research**, v. 225, n. 3, p. 404-4149, 2013.

STEVENSON, M.; HENDRY, L.C.; KINGSMAN, B.G. A review of production planning and control: The applicability of key concepts to the make-to-order industry. **International Journal of Production Research**, v. 43, n. 5, p. 869-898, 2005.

SUNG, C.S.; MIN, J.I. Scheduling in a two-machine flowshop with batch processing machine(s) for earliness/tardiness measure under a common due date. **European Journal of Operational Research**, v. 131, n. 1, p. 95-106, 2001.

SUPPLY CHAIN COUNCIL. Supply Chain Operations Reference Model – SCOR. v. 9. 2008.

TANG, L.; LIU, G. A mathematical programming model and solution for scheduling production orders in Shanghai Baoshan Iron and Steel Complex. **European Journal of Operational Research**, v. 182, n. 3, p. 1452-1468, 2007.

TANG, L.; MENG, Y.; LIU, J. An improved Lagrangean relaxation algorithm for the dynamic batching decision problem. **International Journal of Production Research**, v. 49, n. 9, p. 2501-2517, 2011.

TASGENTIREN, M.F.; LIANG, Y.C.; SEVKLI, M.; GENÇYILMAZ, G. A particle swarm optimization algorithm for makespan and total flowtime minimization in the permutation flowshop sequencing problem. **European Journal of Operational Research**, v. 177, n. 3, p. 1930-1947, 2007.

TAVAKKOLI-MOGHADDAM, R.; MOSLEHI, G.; VASEI, M.; AZARON, A. A branch-and-bound algorithm for single machine sequencing to minimize the sum of maximum earliness and tardiness with idle insert. **Applied Mathematics and Computation**, v. 174, n. 1, p. 388-408, 2006.

T'KINDT, V., BILLAUT J. C. E PROUST, C. Solving a bicriteria scheduling problem on unrelated parallel machines occurring in the glass bottle industry. **European Journal of Operational Research**, v.135, n. 1, p. 42-49, 2001.

TOLEDO, C.F.M.; ARANTES, M.S.; OLIVEIRA R.R.R.; ALMADA-LOBO, B. Glass container production scheduling through hybrid multi-population based evolutionary algorithm. **Applied Soft Computing**, v. 13, n. 3, p. 1352-1364, 2013.

TORABI, S.A. FATEMI GHOMI, S.M.T.; KARIMI, B. A hybrid genetic algorithm for the finite horizon economic lot and delivery scheduling in supply chains. **European Journal of Operational Research**, v. 173, n. 1, p. 173-189, 2006.

UZSOY, R.; LEE, C.Y.; MARTIN-VEGA, L.A. A review of production planning and scheduling models in the semiconductor industry part I: System characteristics, performance evaluation and production planning. **IEE Transactions**, v. 24, n. 4, p. 47-60, 1992.

VASCO, R.A. **Otimização na alocação dinâmica de veículos no transporte rodoviário de cargas completas entre terminais**. 2012. 347 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

VELEZ, S.; MARAVELIAS, C.T. Multiple and nonuniform time grids In discrete-time MIP models for chemical production scheduling. **Computers and Chemical Engineering**, v. 53, p. 70-85, 2013. Disponível em < <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.compchemeng.2013.01.014> >. Acesso em 19 jun. 2014.

VOLLMANN, T. E.; BERRY, W. L.; WHYBARK, D. C. **Manufacturing Planning and Control Systems**. 4th edition. New York: McGraw-Hil, 1997.

WEIDENHILLER, A.; JODLBAUER, H. Equivalence classes of problem instances for a continuous-time lot sizing and scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, v. 199, n. 1, p. 139-149, 2009.

WENG, W.; FUJIMARA, S. Control methods for dynamic time-based manufacturing under customized product lead times. **European Journal of Operational Research**, v. 218, n. 1, p. 86-96, 2012.

WOLPERT, D. H & MACREADY, W. G. No Free Lunch Theorems for Optimization, **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 1, n. 1, p. 67-82, 1997.

WONG, T.C.; CHAN, F.T.S.; CHAN, L.Y. A resource-constrained assembly job shop scheduling problem with lot streaming technique. **Computers & Industrial Engineering**, v. 57, n. 3, p. 983-995, 2009.

WU, T.; SHI, L.; GEUNES, J.; AKARTUNALI, K. An optimization framework for solving capacitated multi-level lot-sizing problems with backlogging. **European Journal of Operational Research**, v. 214, n. 2, p. 418-441, 2011.

XUAN, H.; TANG, L. Scheduling a hybrid flowshop with batch production at the last stage. **Computers & Operations Research**, v. 34, n. 9, p. 2718-2733, 2007.

YAN, H.S.; WANG, H.X.; ZHANG, X.D. Simultaneous batch splitting and scheduling on identical parallel production lines. **Information Sciences**, v. 221, p. 501-519, 2013.

ZHAO, C.; FU, J.; XU, Q. Production-ratio oriented optimization for multi-recipe material handling via simultaneous hoist scheduling and production line arrangement. **Computers and Chemical Engineering**, v. 50, p. 28-38, 2013.

ZHU, X.; WILHELM, W.E. Scheduling and lot sizing with sequence-dependent setup: A literature review. **IIE Transactions**, v. 38, n. 11, p. 987-1007, 2006.

APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DA INDÚSTRIA ESTUDADA E INSTÂNCIAS

O modelo CLSD-GCST que se propõem neste trabalho de pesquisa diferencia-se por conter em suas restrições os aspectos relacionados ao *setup* dependente da sequência, incluindo a curva de *ramp-up* de cada artigo nesse contexto, e o impacto que uma troca de fabricação em uma determinada linha de produção pode gerar nas demais quando o *setup* envolve uma variação acentuada do fluxo de vidro na fornecedora. Com base nesses fatores, houve um esforço no sentido de encontrar uma indústria para realização do trabalho com características que possibilitassem um foco maior sobre essas questões da produção vidreira e não sobre outros como o planejamento de campanhas de cores das embalagens, por exemplo, que se trata de um problema já solucionado em modelos da literatura.

Após mapeadas algumas possibilidades e realizados os devidos contatos, foi encontrada uma empresa com as particularidades que se adequavam aos objetivos de pesquisa e cuja gestão industrial disponibilizou os dados e as condições necessárias para realização do trabalho. Na sequência, segue a caracterização da empresa empregando uma nomenclatura fictícia para suas linhas, seus produtos, sua carteira de clientes e qualquer informação estratégica do negócio.

A empresa base deste estudo é uma multinacional que possui diversas fábricas de embalagens de vidro no Brasil. Para o processo de modelagem escolheu-se uma planta localizada no estado de São Paulo e especializada no atendimento do mercado cervejeiro. Trata-se de uma planta que possui apenas um forno e que basicamente, por seu mercado alvo, opera com a produção de garrafas em vidro âmbar. Os aspectos de interesse contemplados pela realidade do site são:

- a) trabalho constante com os dois tipos de processo produtivo de garrafas, BB e PB (nesse caso, trata-se do processo Prensado-Soprado Boca Estreita);
- b) apesar de somente produzir artigos de cor âmbar e com garrafas padrão ou *standard*, voltadas para o mercado de cerveja, possui um portfólio que gira em torno de trinta artigos ao se desconsiderar os produtos já descontinuados;
- c) a amplitude da extração média de cada fornecedora ao produzir os diferentes artigos pode chegar a 50 toneladas de vidro por dia dependendo da linha da produção e do sequenciamento da produção, o que desperta interesse particular na solução desse caso de *setup* dependente da sequência, pois empiricamente o que os técnicos dessa indústria averiguam é que uma variação de extração de 10 toneladas por dia em uma

das linhas já acarreta queda do rendimento e em problemas de qualidade nas demais linhas.

A fábrica estudada tem 83% de sua capacidade voltada para a produção de embalagens de cerveja, sendo que esse percentual se divide entre garrafas retornáveis e garrafas não retornáveis ou *One Way* (OW), um pequeno percentual da produção é destinado a embalagens de outros produtos alcoólicos em geral. Quanto à sazonalidade da demanda de embalagens de cerveja, pode-se afirmar que a empresa recebe um maior volume de pedidos concentrados entre os meses de setembro e dezembro, sendo que há uma alta procura por esse tipo de embalagem durante todo o ano. O Gráfico 7 ilustra a distribuição da capacidade da fábrica por tipo de mercado e o Gráfico 8 evidencia a sazonalidade dos pedidos de seus clientes no que tange a embalagens de cerveja.

Gráfico 7 – Distribuição da capacidade de produção da fábrica estudada por tipo de mercado
Fonte: Autoria própria

Gráfico 8 – Sazonalidade dos pedidos de embalagens de cerveja para a empresa estudada
Fonte: Autoria própria

Para o atendimento desses mercados a planta conta com uma área total de 167.000 m², uma equipe de 188 colaboradores entre funcionários e terceiros, processos estruturados contando com as certificações OHSAS 18001, ISO 9001 e ISO 14001, programas de melhoria contínua e uma estrutura produtiva com:

- a) um forno de fusão com uma área aproximada de 100 m² e uma capacidade máxima de 360 toneladas de vidro fundido por dia;
- b) três linhas de produção:
 - linha 1: contém uma máquina IS de oito seções, apta a trabalhar com uma ou duas gotas de vidro por seção, espaçamento de 5 ½” entre os centros das seções e focada somente na produção de garrafas via processo BB. A sua fornecedora em conjunto com a sua máquina IS possuem a capacidade máxima de extração de 104 toneladas de vidro por dia;
 - linha 2: provida de uma máquina de conformação de 12 seções análoga à máquina IS da linha 1, porém o projeto dessa linha permite a produção de garrafas em ambos os processos, BB e PB. A extração máxima dessa linha é 125 toneladas de vidro por dia;
 - linha 3: a maior das linhas, equipada com uma máquina IS 16 seções alimentada por dois conjuntos de *feeders*, apta a produzir BB e PB. Usualmente é a linha mais utilizada para artigos PB que em geral são garrafas OW, dependendo do artigo em linha e da velocidade de produção pode extrair até 165 toneladas de vidro por dia.
- c) um armazém com a capacidade de armazenar 18.000 toneladas de produto acabado.

Apesar de apresentar um elevado grau de maturidade na gestão de seus processos sob alguns aspectos, conforme evidenciam as certificações e a existência de iniciativas como um programa de melhoria contínua, a empresa objeto de estudo não possui nenhuma solução focada no planejamento da produção, de forma geral, os especialistas de planejamento analisam informações contidas em planilhas diversas e propõem planos que são validados junto à gestão industrial de cada fábrica.

O planejamento da produção geralmente considera um horizonte de planejamento de três meses e as demandas nesse horizonte são consideravelmente conhecidas, a maior parcela que as integra já são pedidos efetivos e o restante consiste em uma demanda prevista com assertividade relativamente alta. Predominantemente o PCP classifica os artigos produzidos como *Make-to-Stock*, uma parcela mínima pode ser classificada como *Make-to-Order*, porém

trata-se de um percentual tão baixo do total de garrafas produzidas que é razoável que se considere a produção *Make-to-Stock* como o padrão geral do sistema de produção.

Conforme mencionado no Capítulo 7, as instâncias do ano de produção mais estável da fábrica foram selecionadas para execução de testes computacionais, pois dessa forma, diminuem-se as interferências de problemas técnico-operacionais em um cenário de comparação entre o planejamento otimizado e o planejamento real executado. A seguir, encontram-se os dados da fábrica de embalagens de vidro estudada que constituem tais instâncias:

- a) Quadro 14: Dados básicos do problema;
- b) Quadro 15: Taxas de extração e produção das máquinas para os diferentes artigos;
- c) Quadro 16: Tempos de troca mecânica (T1) para a máquina 1;
- d) Quadro 17: Tempos de troca mecânica (T1) para a máquina 2;
- e) Quadro 18: Tempos de troca mecânica (T1) para a máquina 3;
- f) Quadro 19: Tempos de *ramp-up* (T2) para a máquina 1;
- g) Quadro 20: Tempos de *ramp-up* (T2) para a máquina 2;
- h) Quadro 21: Tempos de *ramp-up* (T2) para a máquina 3;
- i) Quadro 22: Configuração inicial das máquinas de janeiro a dezembro;
- j) Quadro 23: Níveis de estoque iniciais de janeiro a dezembro;
- k) Quadro 24: Demanda de janeiro a dezembro.

	Dado do problema	Parâmetro	Valor
Custos	Custo da tonelada de vidro fundida (R\$)	β	742,00
	Custo de armazenagem de 1 tonelada de produto acabado por 1 dia (R\$)	λ	2,40
	Custo de atraso de entrega de 1 tonelada de produto acabado por 1 dia (R\$)	Ω	0
	Custo de perda de venda de 1 tonelada de produto acabado (R\$)	θ	890,40
Dados Técnicos	Nº de máquinas IS	M	3
	Nº de artigos produzidos	N	31
	Capacidade do forno (ton)	C	360
	Nº máximo de preparações por período	μ	1
	Capacidade de estocagem (ton)	A	18000
	Fator de perda de produção por variação da extração	ω	0,02

Quadro 14 – Dados básicos do problema

Fonte: Autoria própria

	Taxa de extração (ton/dia)			Taxa de produção (ton/dia)		
	Parâmetro ε_{mi}			Parâmetro p_{mi}		
	Linha 1	Linha 2	Linha 3	Linha 1	Linha 2	Linha 3
Artigo 1	75.52	---	---	68.20	---	---
Artigo 2	---	107.00	127.81	---	97.28	116.20
Artigo 3	98.38	---	---	94.45	---	---
Artigo 4	100.27	112.61	164.51	94.48	106.11	155.01
Artigo 5	92.25	121.65	164.23	86.99	114.72	154.87
Artigo 6	81.56	---	---	76.26	---	---
Artigo 7	82.94	---	---	78.80	---	---
Artigo 8	90.69	---	162.43	84.34	---	152.39
Artigo 9	---	95.87	128.70	---	89.82	120.58
Artigo 10	91.35	---	---	86.68	---	---
Artigo 11	82.11	---	---	77.28	---	---
Artigo 12	---	103.33	---	---	97.44	---
Artigo 13	---	95.39	130.50	---	90.19	123.39
Artigo 14	---	80.35	---	---	74.69	---
Artigo 15	---	97.18	135.71	---	89.21	124.58
Artigo 16	---	119.27	---	---	113.91	---
Artigo 17	103.22	118.94	---	96.11	110.75	---
Artigo 18	83.64	---	---	78.11	---	---
Artigo 19	80.77	---	---	75.77	---	---
Artigo 20	---	92.29	125.91	---	84.72	115.58
Artigo 21	95.04	---	---	87.44	---	---
Artigo 22	---	94.35	137.41	---	88.60	129.04
Artigo 23	---	95.39	130.50	---	89.72	122.75
Artigo 24	---	98.91	117.23	---	92.53	109.64
Artigo 25	88.13	117.50	---	82.04	109.40	---
Artigo 26	---	79.28	110.71	---	72.05	100.61
Artigo 27	76.61	---	---	72.94	---	---
Artigo 28	89.86	---	---	85.36	---	---
Artigo 29	87.12	---	---	79.89	---	---
Artigo 30	---	97.18	135.71	---	89.67	125.21
Artigo 31	95.39	119.23	162.05	88.71	112.02	152.24

Quadro 15 – Taxas de extração e produção das máquinas para os diferentes artigos
 Fonte: Autoria própria

T1 DOS ARTIGOS (H)		ARTIGO QUE ENTRA EM PRODUÇÃO																	
		ARTIGO 1	ARTIGO 3	ARTIGO 4	ARTIGO 5	ARTIGO 6	ARTIGO 7	ARTIGO 8	ARTIGO 10	ARTIGO 11	ARTIGO 17	ARTIGO 18	ARTIGO 19	ARTIGO 21	ARTIGO 25	ARTIGO 27	ARTIGO 28	ARTIGO 29	ARTIGO 31
ARTIGO 1		--	1,50	1,50	0,75	0,75	0,75	0,75	1,50	0,75	1,50	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
ARTIGO 3		1,50	--	0,75	1,50	1,50	1,50	1,50	0,75	1,50	0,75	0,75	1,50	0,75	1,50	1,50	0,75	0,75	1,50
ARTIGO 4		1,50	0,75	--	1,50	1,50	1,50	0,75	0,75	1,50	0,50	0,75	1,50	0,75	1,50	1,50	0,75	0,75	1,50
ARTIGO 5		0,75	1,50	1,50	--	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	1,50	0,75	0,50	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
ARTIGO 6		0,75	1,50	1,50	0,75	--	0,75	0,75	1,50	0,75	1,50	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
ARTIGO 7		0,75	1,50	1,50	0,75	0,75	--	0,75	1,50	0,75	1,50	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
ARTIGO 8		0,75	1,50	0,75	0,75	0,75	0,75	--	0,75	0,75	1,50	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
ARTIGO 10		1,50	0,75	0,75	0,75	1,50	1,50	0,75	--	0,75	0,75	0,75	1,50	0,75	0,75	1,50	0,75	0,75	0,75
ARTIGO 11		0,75	1,50	1,50	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	--	1,50	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	1,50
ARTIGO 17		1,50	0,75	0,50	1,50	1,50	1,50	1,50	0,75	1,50	--	0,75	1,50	0,75	1,50	1,50	0,75	0,75	1,50
ARTIGO 18		0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	--	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
ARTIGO 19		0,75	1,50	1,50	0,50	0,75	0,75	0,75	1,50	0,75	1,50	1,50	--	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
ARTIGO 21		0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	--	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
ARTIGO 25		0,75	1,50	1,50	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	1,50	0,75	0,75	0,75	--	0,75	0,75	0,75	0,75
ARTIGO 27		0,75	1,50	1,50	0,75	0,75	0,75	0,75	1,50	0,75	1,50	0,75	0,75	0,75	0,75	--	0,75	0,75	0,75
ARTIGO 28		0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	--	0,75	0,75
ARTIGO 29		0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	--	0,75
ARTIGO 31		0,75	1,50	1,50	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	1,50	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	--
ARTIGO QUE SAI DE PRODUÇÃO																			
		s mij = T1 / 24																	

Quadro 16 – Tempos de troca mecânica (T1) para a máquina 1
Fonte: Autoria própria

T1 DOS ARTIGOS (H)		ARTIGO QUE ENTRA EM PRODUÇÃO																	
ARTIGO	ARTIGO	ARTIGO	ARTIGO	ARTIGO	ARTIGO	ARTIGO	ARTIGO	ARTIGO	ARTIGO	ARTIGO	ARTIGO	ARTIGO	ARTIGO	ARTIGO	ARTIGO	ARTIGO	ARTIGO	ARTIGO	ARTIGO
2	4	5	9	12	13	14	15	16	17	20	22	23	24	25	26	30	31		
ARTIGO 2	--	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,80	2,00	0,80	0,80	2,00	0,80	2,00	0,80	2,00	2,00		
ARTIGO 4	2,00	--	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	2,00	0,80	2,00	2,00	1,50	2,00	1,50	2,00	2,00	1,50		
ARTIGO 5	2,00	1,50	--	1,50	0,80	1,50	1,50	2,00	1,50	2,00	2,00	0,80	2,00	0,50	2,00	2,00	0,80		
ARTIGO 9	2,00	1,50	--	0,80	0,80	0,80	0,80	2,00	1,50	2,00	2,00	0,80	2,00	1,50	2,00	2,00	1,50		
ARTIGO 12	2,00	1,50	0,80	--	0,80	0,80	0,80	2,00	1,50	2,00	2,00	0,80	2,00	0,80	2,00	2,00	0,80		
ARTIGO 13	2,00	1,50	0,80	0,80	--	0,80	0,80	2,00	1,50	2,00	2,00	0,50	2,00	1,50	2,00	2,00	1,50		
ARTIGO 14	2,00	1,50	1,50	0,80	0,80	--	0,80	2,00	1,50	2,00	2,00	0,80	2,00	1,50	2,00	2,00	0,80		
ARTIGO 15	2,00	1,50	1,50	0,80	0,80	0,80	--	2,00	1,50	2,00	2,00	0,80	2,00	0,80	2,00	2,00	1,50		
ARTIGO 16	0,80	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	--	2,00	0,80	0,80	2,00	0,80	2,00	0,80	0,33	2,00		
ARTIGO 17	2,00	0,80	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	2,00	--	2,00	2,00	1,50	2,00	1,50	2,00	2,00	1,50		
ARTIGO 20	0,80	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,80	2,00	--	0,80	2,00	0,80	2,00	0,80	0,80	2,00		
ARTIGO 22	0,80	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,80	2,00	0,80	--	2,00	0,80	2,00	0,80	0,80	2,00		
ARTIGO 23	2,00	1,50	0,80	0,80	0,80	0,50	0,80	2,00	1,50	2,00	2,00	--	2,00	0,80	2,00	2,00	0,80		
ARTIGO 24	0,80	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,80	2,00	0,80	0,80	2,00	--	2,00	0,80	0,80	2,00		
ARTIGO 25	2,00	1,50	0,50	1,50	0,80	1,50	0,80	2,00	1,50	2,00	2,00	0,80	2,00	--	2,00	2,00	0,80		
ARTIGO 26	0,80	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,80	2,00	0,80	0,80	2,00	0,80	2,00	--	0,80	2,00		
ARTIGO 30	0,80	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,33	2,00	0,80	0,80	2,00	0,80	2,00	0,80	--	2,00		
ARTIGO 31	2,00	1,50	0,80	1,50	0,80	1,50	1,50	2,00	1,50	2,00	2,00	1,50	2,00	0,80	2,00	2,00	--		
ARTIGO QUE SAI DE PRODUÇÃO		s mij = T1 / 24																	

Quadro 17 – Tempos de troca mecânica (T1) para a máquina 2
Fonte: Autoria própria

T1 DOS ARTIGOS (H)		ARTIGO QUE ENTRA EM PRODUÇÃO																											
		ARTIGO 2	ARTIGO 4	ARTIGO 5	ARTIGO 8	ARTIGO 9	ARTIGO 13	ARTIGO 15	ARTIGO 20	ARTIGO 22	ARTIGO 23	ARTIGO 24	ARTIGO 26	ARTIGO 30	ARTIGO 31														
ARTIGO 2		--	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	1,00	2,50	1,00	1,00	1,00	2,50	2,50	1,00	1,00	1,00	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
ARTIGO 4		2,50	--	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,50	2,50	2,50	2,00	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,00	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,00	2,00
ARTIGO 5		2,50	2,00	--	1,00	2,00	1,00	2,00	2,00	2,00	1,00	2,50	2,50	2,50	1,00	2,50	2,50	2,50	2,50	1,00	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	1,00	1,00	
ARTIGO 8		2,50	2,00	1,00	--	2,00	--	2,00	2,00	2,00	2,00	2,50	2,50	2,50	2,00	2,50	2,50	2,50	2,50	2,00	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	1,00	1,00	
ARTIGO 9		2,50	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	--	2,00	--	1,00	2,50	2,50	2,50	1,00	2,50	2,50	2,50	2,50	1,00	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,00	2,00	
ARTIGO 13		2,50	2,00	1,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	1,00	--	2,50	2,50	2,50	1,00	2,50	2,50	2,50	2,50	1,00	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,00	2,00	
ARTIGO 15		1,00	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	--	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	2,50	1,00	1,00	1,00	0,33	2,50	2,50	2,50	
ARTIGO 20		1,00	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	1,00	1,00	1,00	2,50	2,50	2,50	2,50	1,00	2,50	2,50	1,00	1,00	1,00	1,00	2,50	2,50	2,50	
ARTIGO 22		1,00	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	1,00	1,00	1,00	2,50	2,50	1,00	1,00	--	2,50	2,50	1,00	1,00	1,00	1,00	2,50	2,50	2,50	
ARTIGO 23		2,50	2,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	2,50	2,50	2,50	--	2,50	2,50	2,50	2,50	--	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,00	2,00	2,00	
ARTIGO 24		1,00	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	1,00	1,00	1,00	2,50	1,00	1,00	1,00	1,00	2,50	2,50	--	1,00	1,00	1,00	2,50	2,50	2,50	
ARTIGO 26		1,00	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	1,00	1,00	1,00	2,50	1,00	1,00	1,00	1,00	2,50	2,50	--	--	1,00	1,00	2,50	2,50	2,50	
ARTIGO 30		1,00	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	0,33	1,00	1,00	2,50	1,00	1,00	1,00	1,00	2,50	2,50	1,00	1,00	1,00	--	2,50	2,50	2,50	
ARTIGO 31		2,50	2,00	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,50	2,50	2,50	2,00	2,50	2,50	2,50	2,50	2,00	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	--	--	--	
ARTIGO QUE SAI DE PRODUÇÃO																	$r_{mij} = T1 / 24$												

Quadro 18 – Tempos de troca mecânica (T1) para a máquina 3
Fonte: Autoria própria

T2 DOS ARTIGOS (H)		ARTIGO QUE ENTRA EM PRODUÇÃO																											
ARTIGO 1	ARTIGO 3	ARTIGO 4	ARTIGO 5	ARTIGO 6	ARTIGO 7	ARTIGO 8	ARTIGO 10	ARTIGO 11	ARTIGO 17	ARTIGO 18	ARTIGO 19	ARTIGO 21	ARTIGO 25	ARTIGO 27	ARTIGO 28	ARTIGO 29	ARTIGO 31												
ARTIGO 1	ARTIGO 3	ARTIGO 4	ARTIGO 5	ARTIGO 6	ARTIGO 7	ARTIGO 8	ARTIGO 10	ARTIGO 11	ARTIGO 17	ARTIGO 18	ARTIGO 19	ARTIGO 21	ARTIGO 25	ARTIGO 27	ARTIGO 28	ARTIGO 29	ARTIGO 31												
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---												
4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
4,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00												
3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00																		

Quadro 19 – Tempos de ramp-up (T2) para a máquina 1
Fonte: Autoria própria

T2 DOS ARTIGOS (H)		ARTIGO QUE ENTRA EM PRODUÇÃO																		
		ARTIGO 2	ARTIGO 4	ARTIGO 5	ARTIGO 9	ARTIGO 12	ARTIGO 13	ARTIGO 14	ARTIGO 15	ARTIGO 16	ARTIGO 17	ARTIGO 20	ARTIGO 22	ARTIGO 23	ARTIGO 24	ARTIGO 25	ARTIGO 26	ARTIGO 30	ARTIGO 31	
ARTIGO QUE SAI DE PRODUÇÃO		ARTIGO 2	--	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	3,00	6,00	3,00	3,00	6,00	3,00	6,00	3,00	3,00	6,00	6,00
		ARTIGO 4	6,00	--	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	6,00	3,00	6,00	6,00	4,00	6,00	6,00	4,00	6,00	6,00	4,00
		ARTIGO 5	6,00	4,00	--	4,00	3,00	4,00	4,00	6,00	4,00	6,00	6,00	3,00	6,00	6,00	2,00	6,00	6,00	3,00
		ARTIGO 9	6,00	4,00	4,00	--	3,00	3,00	3,00	6,00	4,00	6,00	6,00	3,00	6,00	6,00	4,00	6,00	6,00	4,00
		ARTIGO 12	6,00	4,00	3,00	3,00	--	3,00	3,00	6,00	4,00	6,00	6,00	3,00	6,00	6,00	3,00	6,00	6,00	3,00
		ARTIGO 13	6,00	4,00	3,00	3,00	3,00	--	3,00	3,00	6,00	4,00	6,00	6,00	2,00	6,00	4,00	6,00	6,00	4,00
		ARTIGO 14	6,00	4,00	4,00	3,00	3,00	--	3,00	6,00	4,00	6,00	6,00	3,00	6,00	6,00	4,00	6,00	6,00	3,00
		ARTIGO 15	6,00	4,00	4,00	3,00	3,00	3,00	3,00	--	6,00	4,00	6,00	6,00	3,00	6,00	3,00	6,00	6,00	4,00
		ARTIGO 16	3,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	--	6,00	3,00	3,00	6,00	3,00	6,00	3,00	1,50	6,00
		ARTIGO 17	6,00	3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	6,00	--	6,00	6,00	4,00	6,00	4,00	6,00	6,00	4,00
		ARTIGO 20	3,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	3,00	6,00	--	3,00	6,00	3,00	6,00	3,00	3,00	6,00
		ARTIGO 22	3,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	3,00	6,00	3,00	--	6,00	3,00	6,00	3,00	3,00	6,00
		ARTIGO 23	6,00	4,00	3,00	3,00	3,00	2,00	3,00	3,00	6,00	4,00	6,00	6,00	--	6,00	3,00	6,00	6,00	3,00
		ARTIGO 24	3,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	3,00	6,00	3,00	3,00	6,00	--	6,00	3,00	3,00	6,00
		ARTIGO 25	6,00	4,00	2,00	4,00	3,00	3,00	4,00	3,00	6,00	4,00	6,00	6,00	3,00	6,00	--	6,00	6,00	3,00
		ARTIGO 26	3,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	3,00	6,00	3,00	3,00	6,00	3,00	6,00	--	3,00	6,00
		ARTIGO 30	3,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	1,50	6,00	3,00	3,00	6,00	3,00	6,00	3,00	--	6,00
		ARTIGO 31	6,00	4,00	3,00	4,00	3,00	4,00	3,00	4,00	6,00	4,00	6,00	6,00	4,00	6,00	3,00	6,00	6,00	--
		$r_{mij} = T2 / 24$																		

Quadro 20 – Tempos de ramp-up (T2) para a máquina 2

Fonte: Autoria própria

T2 DOS ARTIGOS (H)		ARTIGO QUE ENTRA EM PRODUÇÃO													
		ARTIGO 2	ARTIGO 4	ARTIGO 5	ARTIGO 8	ARTIGO 9	ARTIGO 13	ARTIGO 15	ARTIGO 20	ARTIGO 22	ARTIGO 23	ARTIGO 24	ARTIGO 26	ARTIGO 30	ARTIGO 31
ARTIGO 2		--	6,50	6,50	6,50	6,50	6,50	3,00	3,00	3,00	6,50	3,00	3,00	3,00	6,50
ARTIGO 4		6,50	--	4,00	4,00	4,00	6,50	6,50	6,50	4,00	6,50	6,50	6,50	6,50	4,00
ARTIGO 5		6,50	4,00	--	3,00	4,00	6,50	6,50	6,50	3,00	6,50	6,50	6,50	6,50	3,00
ARTIGO 8		6,50	4,00	3,00	--	4,00	6,50	6,50	6,50	4,00	6,50	6,50	6,50	6,50	3,00
ARTIGO 9		6,50	4,00	4,00	4,00	--	6,50	6,50	6,50	3,00	6,50	6,50	6,50	6,50	4,00
ARTIGO 13		6,50	4,00	3,00	4,00	--	6,50	6,50	6,50	3,00	6,50	6,50	6,50	6,50	4,00
ARTIGO 15		3,00	6,50	6,50	6,50	6,50	--	3,00	3,00	6,50	3,00	3,00	3,00	1,50	6,50
ARTIGO 20		3,00	6,50	6,50	6,50	6,50	6,50	--	3,00	6,50	3,00	3,00	3,00	3,00	6,50
ARTIGO 22		3,00	6,50	6,50	6,50	6,50	6,50	3,00	--	6,50	3,00	3,00	3,00	3,00	6,50
ARTIGO 23		6,50	4,00	3,00	3,00	3,00	6,50	6,50	6,50	--	6,50	6,50	6,50	6,50	4,00
ARTIGO 24		3,00	6,50	6,50	6,50	6,50	6,50	3,00	3,00	6,50	--	3,00	3,00	3,00	6,50
ARTIGO 26		3,00	6,50	6,50	6,50	6,50	6,50	3,00	3,00	6,50	3,00	--	3,00	3,00	6,50
ARTIGO 30		3,00	6,50	6,50	6,50	6,50	6,50	1,50	3,00	6,50	3,00	3,00	3,00	--	6,50
ARTIGO 31		6,50	4,00	3,00	3,00	4,00	6,50	6,50	6,50	4,00	6,50	6,50	6,50	6,50	--
r mij = T1 / 24															

Quadro 21 – Tempos de *ramp-up* (T2) para a máquina 3
Fonte: Autoria própria

PREPARAÇÃO DAS MÁQUINAS - JANEIRO		PREPARAÇÃO DAS MÁQUINAS - JULHO	
MÁQUINA 1	Preparada para produção do Artigo 8	MÁQUINA 1	Preparada para produção do Artigo 8
MÁQUINA 2	Preparada para produção do Artigo 15	MÁQUINA 2	Preparada para produção do Artigo 30
MÁQUINA 3	Preparada para produção do Artigo 5	MÁQUINA 3	Preparada para produção do Artigo 5
PREPARAÇÃO DAS MÁQUINAS - FEVEREIRO		PREPARAÇÃO DAS MÁQUINAS - AGOSTO	
MÁQUINA 1	Preparada para produção do Artigo 17	MÁQUINA 1	Preparada para produção do Artigo 31
MÁQUINA 2	Preparada para produção do Artigo 22	MÁQUINA 2	Preparada para produção do Artigo 30
MÁQUINA 3	Preparada para produção do Artigo 5	MÁQUINA 3	Preparada para produção do Artigo 5
PREPARAÇÃO DAS MÁQUINAS - MARÇO		PREPARAÇÃO DAS MÁQUINAS - SETEMBRO	
MÁQUINA 1	Preparada para produção do Artigo 17	MÁQUINA 1	Preparada para produção do Artigo 31
MÁQUINA 2	Preparada para produção do Artigo 22	MÁQUINA 2	Preparada para produção do Artigo 4
MÁQUINA 3	Preparada para produção do Artigo 5	MÁQUINA 3	Preparada para produção do Artigo 5
PREPARAÇÃO DAS MÁQUINAS - ABRIL		PREPARAÇÃO DAS MÁQUINAS - OUTUBRO	
MÁQUINA 1	Preparada para produção do Artigo 4	MÁQUINA 1	Preparada para produção do Artigo 5
MÁQUINA 2	Preparada para produção do Artigo 22	MÁQUINA 2	Preparada para produção do Artigo 15
MÁQUINA 3	Preparada para produção do Artigo 5	MÁQUINA 3	Preparada para produção do Artigo 5
PREPARAÇÃO DAS MÁQUINAS - MAIO		PREPARAÇÃO DAS MÁQUINAS - NOVEMBRO	
MÁQUINA 1	Preparada para produção do Artigo 31	MÁQUINA 1	Preparada para produção do Artigo 5
MÁQUINA 2	Preparada para produção do Artigo 15	MÁQUINA 2	Preparada para produção do Artigo 20
MÁQUINA 3	Preparada para produção do Artigo 5	MÁQUINA 3	Preparada para produção do Artigo 30
PREPARAÇÃO DAS MÁQUINAS - JUNHO		PREPARAÇÃO DAS MÁQUINAS - DEZEMBRO	
MÁQUINA 1	Preparada para produção do Artigo 8	MÁQUINA 1	Preparada para produção do Artigo 3
MÁQUINA 2	Preparada para produção do Artigo 15	MÁQUINA 2	Preparada para produção do Artigo 4
MÁQUINA 3	Preparada para produção do Artigo 4	MÁQUINA 3	Preparada para produção do Artigo 15

Quadro 22 – Configuração inicial das máquinas de janeiro a dezembro
Fonte: Autoria própria

Estoque Inicial Janeiro (ton)				Estoque Inicial Fevereiro (ton)				Estoque Inicial Março (ton)			
Artigo 1	0,00	Artigo 17	7,74	Artigo 1	0,00	Artigo 17	1307,62	Artigo 1	0,00	Artigo 17	664,26
Artigo 2	0,00	Artigo 18	0,00	Artigo 2	0,00	Artigo 18	0,00	Artigo 2	0,00	Artigo 18	0,00
Artigo 3	103,74	Artigo 19	97,11	Artigo 3	103,74	Artigo 19	97,11	Artigo 3	43,36	Artigo 19	97,11
Artigo 4	829,38	Artigo 20	0,00	Artigo 4	501,66	Artigo 20	231,16	Artigo 4	536,41	Artigo 20	83,61
Artigo 5	895,75	Artigo 21	0,00	Artigo 5	364,56	Artigo 21	205,41	Artigo 5	584,59	Artigo 21	51,35
Artigo 6	0,63	Artigo 22	283,78	Artigo 6	0,00	Artigo 22	668,61	Artigo 6	414,28	Artigo 22	802,08
Artigo 7	0,00	Artigo 23	0,83	Artigo 7	0,00	Artigo 23	62,37	Artigo 7	0,00	Artigo 23	972,97
Artigo 8	130,96	Artigo 24	0,00	Artigo 8	76,68	Artigo 24	0,00	Artigo 8	0,00	Artigo 24	248,38
Artigo 9	187,73	Artigo 25	33,42	Artigo 9	187,73	Artigo 25	33,42	Artigo 9	187,73	Artigo 25	33,42
Artigo 10	42,78	Artigo 26	167,98	Artigo 10	42,78	Artigo 26	159,85	Artigo 10	29,09	Artigo 26	131,41
Artigo 11	537,04	Artigo 27	53,78	Artigo 11	537,04	Artigo 27	53,78	Artigo 11	365,71	Artigo 27	52,90
Artigo 12	47,30	Artigo 28	214,70	Artigo 12	47,30	Artigo 28	214,70	Artigo 12	47,30	Artigo 28	112,46
Artigo 13	0,00	Artigo 29	0,00	Artigo 13	0,00	Artigo 29	0,00	Artigo 13	0,00	Artigo 29	0,00
Artigo 14	16,93	Artigo 30	0,00	Artigo 14	16,26	Artigo 30	0,00	Artigo 14	16,26	Artigo 30	0,00
Artigo 15	625,81	Artigo 31	118,97	Artigo 15	108,91	Artigo 31	168,91	Artigo 15	620,73	Artigo 31	242,35
Artigo 16	69,98	TOTAL =	4466,35	Artigo 16	36,05	TOTAL =	5225,65	Artigo 16	1,41	TOTAL =	6339,16
* OBS: considera-se que, nos diferentes meses, parte-se de um cenário sem atrasos de entrega ou <i>backlogging</i> inicial											

Quadro 23 – Níveis de estoque iniciais da fábrica de janeiro a dezembro

(continua)

Estoque Inicial Abril (ton)				Estoque Inicial Maio (ton)				Estoque Inicial Junho (ton)			
Artigo 1	0,00	Artigo 17	675,10	Artigo 1	0,00	Artigo 17	6,19	Artigo 1	0,00	Artigo 17	566,71
Artigo 2	0,00	Artigo 18	0,00	Artigo 2	0,00	Artigo 18	0,00	Artigo 2	0,00	Artigo 18	0,00
Artigo 3	24,77	Artigo 19	97,11	Artigo 3	293,42	Artigo 19	97,11	Artigo 3	239,23	Artigo 19	97,11
Artigo 4	944,17	Artigo 20	82,38	Artigo 4	1012,54	Artigo 20	23,36	Artigo 4	582,03	Artigo 20	0,00
Artigo 5	940,53	Artigo 21	0,00	Artigo 5	1811,95	Artigo 21	7,90	Artigo 5	316,84	Artigo 21	0,00
Artigo 6	289,93	Artigo 22	122,25	Artigo 6	348,61	Artigo 22	730,98	Artigo 6	597,32	Artigo 22	380,46
Artigo 7	0,00	Artigo 23	773,39	Artigo 7	0,00	Artigo 23	33,26	Artigo 7	0,00	Artigo 23	500,62
Artigo 8	0,00	Artigo 24	129,11	Artigo 8	298,77	Artigo 24	55,33	Artigo 8	574,14	Artigo 24	54,10
Artigo 9	187,73	Artigo 25	33,42	Artigo 9	187,73	Artigo 25	33,42	Artigo 9	187,73	Artigo 25	33,42
Artigo 10	15,40	Artigo 26	86,70	Artigo 10	0,00	Artigo 26	67,74	Artigo 10	134,03	Artigo 26	50,80
Artigo 11	334,41	Artigo 27	52,90	Artigo 11	333,59	Artigo 27	52,90	Artigo 11	313,00	Artigo 27	52,90
Artigo 12	47,30	Artigo 28	92,02	Artigo 12	47,30	Artigo 28	11,08	Artigo 12	47,30	Artigo 28	11,08
Artigo 13	0,00	Artigo 29	0,00	Artigo 13	0,00	Artigo 29	0,00	Artigo 13	0,00	Artigo 29	0,00
Artigo 14	0,00	Artigo 30	0,00	Artigo 14	0,00	Artigo 30	0,00	Artigo 14	0,00	Artigo 30	1154,31
Artigo 15	629,76	Artigo 31	260,53	Artigo 15	562,04	Artigo 31	483,24	Artigo 15	781,56	Artigo 31	64,63
Artigo 16	1,41	TOTAL =	5820,31	Artigo 16	1,41	TOTAL =	6499,87	Artigo 16	1,41	TOTAL =	6740,72
* OBS: considera-se que, nos diferentes meses, parte-se de um cenário sem atrasos de entrega ou <i>backlogging</i> inicial											

Quadro 23 – Níveis de estoque iniciais da fábrica de janeiro a dezembro
(continuação)

Estoque Inicial Julho (ton)				Estoque Inicial Agosto (ton)				Estoque Inicial Setembro (ton)			
Artigo 1	0,00	Artigo 17	6,19	Artigo 1	0,00	Artigo 17	6,19	Artigo 1	0,00	Artigo 17	6,19
Artigo 2	0,00	Artigo 18	0,00	Artigo 2	0,00	Artigo 18	0,00	Artigo 2	0,00	Artigo 18	0,00
Artigo 3	233,81	Artigo 19	97,11	Artigo 3	164,13	Artigo 19	97,11	Artigo 3	147,87	Artigo 19	97,11
Artigo 4	576,24	Artigo 20	146,32	Artigo 4	1176,99	Artigo 20	40,58	Artigo 4	290,47	Artigo 20	40,58
Artigo 5	672,65	Artigo 21	0,00	Artigo 5	964,96	Artigo 21	310,74	Artigo 5	797,32	Artigo 21	140,89
Artigo 6	296,22	Artigo 22	6,24	Artigo 6	150,90	Artigo 22	6,24	Artigo 6	681,16	Artigo 22	6,24
Artigo 7	0,00	Artigo 23	1,66	Artigo 7	0,00	Artigo 23	0,83	Artigo 7	0,00	Artigo 23	0,83
Artigo 8	971,01	Artigo 24	232,39	Artigo 8	28,38	Artigo 24	103,29	Artigo 8	329,15	Artigo 24	0,00
Artigo 9	187,73	Artigo 25	33,42	Artigo 9	187,73	Artigo 25	33,42	Artigo 9	193,85	Artigo 25	33,42
Artigo 10	106,66	Artigo 26	41,32	Artigo 10	104,94	Artigo 26	12,87	Artigo 10	77,57	Artigo 26	164,60
Artigo 11	289,94	Artigo 27	52,90	Artigo 11	270,17	Artigo 27	10,58	Artigo 11	261,11	Artigo 27	6,17
Artigo 12	23,17	Artigo 28	149,10	Artigo 12	121,62	Artigo 28	148,25	Artigo 12	24,13	Artigo 28	107,35
Artigo 13	0,00	Artigo 29	0,00	Artigo 13	0,00	Artigo 29	0,00	Artigo 13	0,00	Artigo 29	0,00
Artigo 14	0,00	Artigo 30	576,21	Artigo 14	0,00	Artigo 30	273,37	Artigo 14	0,00	Artigo 30	1098,50
Artigo 15	1346,98	Artigo 31	398,78	Artigo 15	829,52	Artigo 31	752,76	Artigo 15	946,33	Artigo 31	731,46
Artigo 16	0,71	TOTAL =	6446,75	Artigo 16	0,71	TOTAL =	5796,28	Artigo 16	0,71	TOTAL =	6183,01
* OBS: considera-se que, nos diferentes meses, parte-se de um cenário sem atrasos de entrega ou <i>backlogging</i> inicial											

Quadro 23 – Níveis de estoque iniciais da fábrica de janeiro a dezembro

(continuação)

Estoque Inicial Outubro (ton)				Estoque Inicial Novembro (ton)				Estoque Inicial Dezembro (ton)			
Artigo 1	0,00	Artigo 17	6,19	Artigo 1	0,00	Artigo 17	6,19	Artigo 1	0,00	Artigo 17	6,19
Artigo 2	0,00	Artigo 18	0,00	Artigo 2	0,00	Artigo 18	0,00	Artigo 2	0,00	Artigo 18	0,00
Artigo 3	127,74	Artigo 19	97,11	Artigo 3	84,39	Artigo 19	97,11	Artigo 3	168,78	Artigo 19	97,11
Artigo 4	288,50	Artigo 20	40,58	Artigo 4	884,99	Artigo 20	99,60	Artigo 4	356,29	Artigo 20	183,82
Artigo 5	2837,93	Artigo 21	17,78	Artigo 5	248,87	Artigo 21	78,34	Artigo 5	507,82	Artigo 21	339,71
Artigo 6	489,04	Artigo 22	6,24	Artigo 6	367,48	Artigo 22	122,25	Artigo 6	55,89	Artigo 22	9,98
Artigo 7	0,00	Artigo 23	0,83	Artigo 7	0,00	Artigo 23	0,83	Artigo 7	0,00	Artigo 23	0,83
Artigo 8	992,92	Artigo 24	0,00	Artigo 8	351,55	Artigo 24	0,00	Artigo 8	114,53	Artigo 24	0,00
Artigo 9	193,85	Artigo 25	33,42	Artigo 9	193,85	Artigo 25	33,42	Artigo 9	48,46	Artigo 25	33,42
Artigo 10	50,19	Artigo 26	126,66	Artigo 10	36,50	Artigo 26	79,25	Artigo 10	22,81	Artigo 26	22,35
Artigo 11	241,34	Artigo 27	99,62	Artigo 11	241,34	Artigo 27	14,99	Artigo 11	210,04	Artigo 27	1,76
Artigo 12	165,06	Artigo 28	107,35	Artigo 12	118,73	Artigo 28	107,35	Artigo 12	95,56	Artigo 28	107,35
Artigo 13	0,00	Artigo 29	0,00	Artigo 13	0,00	Artigo 29	0,00	Artigo 13	0,00	Artigo 29	0,00
Artigo 14	0,00	Artigo 30	36,37	Artigo 14	0,00	Artigo 30	596,90	Artigo 14	0,00	Artigo 30	100,95
Artigo 15	180,01	Artigo 31	295,96	Artigo 15	74,49	Artigo 31	378,77	Artigo 15	237,01	Artigo 31	465,61
Artigo 16	0,71	TOTAL =	6435,39	Artigo 16	0,71	TOTAL =	4217,88	Artigo 16	0,71	TOTAL =	3186,97
* OBS: considera-se que, nos diferentes meses, parte-se de um cenário sem atrasos de entrega ou <i>backlogging</i> inicial											

Quadro 23 – Níveis de estoque iniciais da fábrica de janeiro a dezembro

Fonte: Autoria própria

(conclusão)

[illegible]

[illegible]

[illegible]

Quadro 24 – Demanda de janeiro a dezembro do ano selecionado

(continuação)

Quadro 24 – Demanda de janeiro a dezembro do ano selecionado

(continuação)

[illegible]

[illegible]

Quadro 24 – Demanda de janeiro a dezembro do ano selecionado

(continuação)

**APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO APLICADO AO CHEFE DE PRODUÇÃO E
AO PROGRAMADOR DA PRODUÇÃO PARA AS VALIDAÇÕES DA
LEGITIMIDADE E CONCEITUAL DO MODELO PROPOSTO⁷**

QUESTIONÁRIO - VALIDAÇÃO DA LEGITIMIDADE E VALIDAÇÃO CONCEITUAL								
CARGO:	() CHEFE DE PRODUÇÃO () PROGRAMADOR DA PRODUÇÃO							
ESCOLARIDADE:								
HÁ QUANTO TEMPO TRABALHA NA INDÚSTRIA DE EMBALAGENS DE VIDRO?								
FAVOR, RESPONDER AS QUESTÕES DE ACORDO COM A ESCALA ABAIXO: [1] "NÃO" OU "DISCORDO"; [2] "SIM, COM ALGUMAS OBSERVAÇÕES" OU "CONCORDO PARCIALMENTE"; [3] "SIM, COM CERTEZA" OU "CONCORDO PLENAMENTE". QUANDO POSSÍVEL, FAVOR JUSTIFICAR AS RESPOSTAS ASSINALADAS.								
1) VOCÊ CONSIDERA QUE O DIMENSIONAMENTO DOS LOTES DE PRODUÇÃO, BEM COMO O SEQUENCIAMENTO DOS MESMOS É UMA ATIVIDADE IMPORTANTE PARA O NEGÓCIO DA EMPRESA E QUE PODE IMPACTAR DIRETAMENTE NOS RESULTADOS DA ÁREA PRODUTIVA?								
<table border="1"> <tr> <td>ESCALA</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> </tr> </table>					ESCALA	1	2	3
ESCALA	1	2	3					
JUSTIFICATIVA:								
2) UMA FERRAMENTA AUTOMATIZADA QUE GERASSE PLANOS DE PRODUÇÃO VISANDO AO ATENDIMENTO DA DEMANDA E A MELHOR COMBINAÇÃO/ SEQUENCIAMENTO POSSÍVEIS COM BASE NAS RESTRIÇÕES TÉCNICAS DA FÁBRICA SERIA DE UTILIDADE NO SEU COTIDIANO?								
<table border="1"> <tr> <td>ESCALA</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> </tr> </table>					ESCALA	1	2	3
ESCALA	1	2	3					
JUSTIFICATIVA:								
3) O MODELO CONCEITUAL APRESENTADO, DESCREVE DE MODO VEROSSÍMIL O PROBLEMA DE DIMENSIONAMENTO DE LOTES E SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO PARA A INDÚSTRIA DE EMBALAGENS DE VIDRO, CONSIDERANDO UMA FÁBRICA DE UM FORNO OPERANDO EM UMA ÚNICA COR?								
<table border="1"> <tr> <td>ESCALA</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> </tr> </table>					ESCALA	1	2	3
ESCALA	1	2	3					
JUSTIFICATIVA:								

**Figura 33 – Questionário para validações da legitimidade e conceitual do modelo proposto
(continua)**

⁷ Antes da aplicação do questionário, todo o trabalho foi contextualizado para o chefe de produção e para o programador da produção da fábrica objeto de estudo. O modelo conceitual descrito na Seção 5.1 e o modelo formal descrito na Seção 5.2 foram a eles apresentados. Além disso, todas as instâncias (contidas no Apêndice A) para os testes foram disponibilizadas para a resposta dos questionários, bem como os resultados dos testes computacionais contidos no Capítulo 7.

QUESTIONÁRIO - VALIDAÇÃO DA LEGITIMIDADE E VALIDAÇÃO CONCEITUAL				
4) HOJE O PROBLEMA É TRATADO EMPIRICAMENTE, COM BASE NA EXPERIÊNCIA DAS PESSOAS ENVOLVIDAS?				
ESCALA		1	2	3
JUSTIFICATIVA:				
5) AS FERRAMENTAS HOJE DISPONÍVEIS PARA SUPORTE AO PCP NÃO ABRANGEM TOTALMENTE AS ESPECIFICIDADES DO PROCESSO PRODUTIVO E AINDA DEMANDAM UMA CARGA DE TRABALHO CONSIDERÁVEL DAS PESSOAS ENVOLVIDAS NO PROCESSO DE PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO?				
ESCALA		1	2	3
JUSTIFICATIVA:				
6) VOCÊ ACREDITA QUE UM SISTEMA DE APOIO A DECISÃO QUE SIMULASSE PLANOS DE PRODUÇÃO A PARTIR DE UMA DEMANDA DE ENTRADA E COM BASE NO MODELO CONCEITUAL APRESENTADO ABRANGERIA AS PRINCIPAIS DIFICULDADES ENFRENTADAS PELO PCP EM UMA FÁBRICA COM UM FORNO DEDICADO A UMA ÚNICA COR?				
ESCALA		1	2	3
JUSTIFICATIVA:				
7) OS PLANOS DE PRODUÇÃO GERADOS PELO MODELO PROPOSTO SERIAM DE OPERACIONALIZAÇÃO VIÁVEL NO AMBIENTE FABRIL?				
ESCALA		1	2	3
JUSTIFICATIVA:				
8) COM BASE NOS DADOS DE ENTRADA APRESENTADOS E NAS PREMISSAS ESTABELECIDAS, VOCÊ ACREDITA QUE OS GANHOS APRESENTADOS NA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O PLANO DE PRODUÇÃO REAL E O PLANO OBTIDO COM A SOLUÇÃO DO MODELO PROPOSTO SÃO VÁLIDOS?				
ESCALA		1	2	3
JUSTIFICATIVA:				
9) VOCÊ ACREDITA QUE O GANHO DE TEMPO DE PLANEJAMENTO, COM A POSSILIDADE DA OBTENÇÃO DE PLANOS DE PRODUÇÃO EM ALGUMAS HORAS DE PROCESSAMENTO DE UM SOLVER É UMA VANTAGEM COMPETITIVA INTERESSANTE PARA O NEGÓCIO?				
ESCALA		1	2	3
JUSTIFICATIVA:				
10) VOCÊ CONCORDA QUE O USO DE UM SISTEMA DE APOIO À DECISÃO É INTERESSANTE PARA A EMPRESA TANTO SOB O PONTO DE VISTA DO PLANEJAMENTO QUANTO SOB O PONTO DE VISTA DA OPERAÇÃO, POIS PROPORCIONA A OBTENÇÃO DE PROGRAMAÇÕES ASSERTIVAS ATÉ MESMO POR PROFISSIONAIS MENOS EXPERIENTES, JÁ QUE AS RESTRIÇÕES DO PLANEJAMENTO SÃO OBSERVADAS PELA LÓGICA DO SISTEMA?				
ESCALA		1	2	3
JUSTIFICATIVA:				

Figura 33 – Questionário para validações da legitimidade e conceitual do modelo proposto
(continuação)

APÊNDICE C – QUESTIONÁRIO APLICADO AO PROGRAMADOR DA PRODUÇÃO PARA A VALIDAÇÃO OPERACIONAL DO MODELO PROPOSTO⁸

QUESTIONÁRIO - VALIDAÇÃO OPERACIONAL				
QUESTIONÁRIO APLICADO AO PROGRAMADOR DA PRODUÇÃO				
ESCOLARIDADE:				
HÁ QUANTO TEMPO TRABALHA NA INDÚSTRIA DE EMBALAGENS DE VIDRO?				
FAVOR, RESPONDER AS QUESTÕES DE ACORDO COM A ESCALA ABAIXO:				
[1] "NÃO" OU "DISCORDO" OU "BAIXO (A)";				
[2] "SIM, COM ALGUMAS OBSERVAÇÕES" OU "CONCORDO PARCIALMENTE" OU "MEDIANO (A)";				
[3] "SIM, COM CERTEZA" OU "CONCORDO PLENAMENTE" OU "ALTA".				
QUANDO POSSÍVEL, FAVOR JUSTIFICAR AS RESPOSTAS ASSINALADAS.				
1) VOCÊ CONSIDERA OS PLANOS DE PRODUÇÃO OBTIDOS PELA SOLUÇÃO DO MODELO PROPOSTO MUITO PRÓXIMOS DE PLANOS DE PRODUÇÃO REAIS, PASSÍVEIS DE OPERACIONALIZAÇÃO?				
ESCALA		1	2	3
JUSTIFICATIVA:				
2) VOCÊ CONCORDA QUE A AGILIDADE NA OBTENÇÃO DE PLANOS DE PRODUÇÃO PELA SOLUÇÃO DO MODELO PROPOSTO CONSISTE EM UMA VANTAGEM ESTRATÉGICA PARA O PCP, QUE PASSA A TER A POSSIBILIDADE DE SIMULAR DIVERSOS CENÁRIOS COM UM TEMPO DE RESPOSTA DE APENAS ALGUMAS HORAS?				
ESCALA		1	2	3
JUSTIFICATIVA:				
3) VOCÊ CONSIDERA OS DADOS DE ENTRADA DO MODELO QUANTITATIVO PROPOSTO ADEQUADOS E SUFICIENTES PARA A CRIAÇÃO DE UM PLANO DE PRODUÇÃO?				
ESCALA		1	2	3
JUSTIFICATIVA:				

Figura 34 – Questionário para validação operacional do modelo proposto

(continua)

⁸ Antes da aplicação do questionário, todo o trabalho foi contextualizado para o programador da produção da fábrica objeto de estudo. O modelo formal descrito na Seção 5.2 foi a ele apresentado. Além disso, todas as instâncias (contidas no Apêndice A) para os testes foram disponibilizadas para a resposta do questionário, bem como os resultados dos testes computacionais contidos no Capítulo 7.

QUESTIONÁRIO - VALIDAÇÃO OPERACIONAL				
4) OS CUSTOS CALCULADOS NA SOLUÇÃO DO MODELO SÃO SUFICIENTES PARA EMBASAR A TOMADA DE DECISÃO NO QUE TANGE AO PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO?				
ESCALA		1	2	3
JUSTIFICATIVA:				
5) COM BASE NO MODELO QUANTITATIVO APRESENTADO, QUAL SERIA A FACILIDADE DE SE ALIMENTAR UM SISTEMA DE APOIO À DECISÃO BASEADO NO MODELO COM OS DADOS DISPONÍVEIS NO ERP E EM OUTRAS BASES DA EMPRESA?				
ESCALA		1	2	3
JUSTIFICATIVA:				
6) CASO O MODELO PROPOSTO E UM MÉTODO DE SOLUÇÃO JÁ ESTIVESSEM DISPONÍVEIS EM UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL AMIGÁVEL, QUAL SERIA A FACILIDADE DE INTEGRAR AS SOLUÇÕES OBTIDAS COM O PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO VIA ERP E CONTROLES DO PCP?				
ESCALA		1	2	3
JUSTIFICATIVA:				
7) NO SEU PONTO DE VISTA, SERIA INTERESSANTE O DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE UTILIZANDO O MODELO PROPOSTO ALIADO A UM MÉTODO DE SOLUÇÃO?				
ESCALA		1	2	3
JUSTIFICATIVA:				
8) VOCÊ ACREDITA QUE UM PROJETO PARA IMPLANTAÇÃO DE SOFTWARE PARA SUPORTAR A TOMADA DE DECISÃO NO QUE TANGE AO DIMENSIONAMENTO DE LOTES E SEQUENCIAMENTO DE PRODUÇÃO NAS FÁBRICAS DA EMPRESA SERIA VIÁVEL?				
ESCALA		1	2	3
JUSTIFICATIVA:				

Figura 34 – Questionário para validação operacional do modelo proposto

(continuação)

ANEXO A – CLASSIFICAÇÃO DE POCHET E WOLSEY (2006) PARA OS PROBLEMAS DE DIMENSIONAMENTO DE LOTES

Pochet e Wolsey (2006) apresentam um esquema de classificação dos problemas de dimensionamento de lotes muito abrangente. Os autores dividem os problemas em três grandes grupos: Problemas de Dimensionamento de Lotes para Único Item (*Single-Item Problems*), Problemas de Dimensionamento de Lotes para Vários Itens (*Multi-Item Single-Level Problems*) e, por fim, Problemas de Dimensionamento de Lotes Multiestágio (*Multi-Level Problems*). Tais grupos possuem problemas com complexidade crescente e possuem sistemáticas de classificação construtivas, ou seja, os critérios adotados para classificação dos *Single-Item Problems* também se aplicam aos *Multi-Item Single-Level Problems*, mais complexos, que possuem critérios também aplicáveis aos *Multi-Level Problems* (usualmente, os problemas de estrutura mais complexa). Uma visão geral do esquema de classificação proposto é apresentada no Quadro 25 e, a seguir, é feito um detalhamento dessas possibilidades.

SINGLE-ITEM PROBLEMS	VERSÃO DO PROBLEMA (PROB)	CAPACIDADE (CAP)	EXTENSÕES (VAR)	MODO DE PRODUÇÃO (PM)	MULTI-ITEM PROBLEMS QUANTIDADE DE PRODUÇÃO (PQ)
	LOT SIZING (LS) WAGNER-WHITIN (WW) DISCRETE LOT-SIZING WITH VARIABLE INITIAL STOCK (DLSI) DISCRETE LOT-SIZING (DLS)	CAPACITATED (C)	BACKLOGGING (B)	1 SETUP POR PERÍODO (M1)	RETRIÇÕES DE LIMITE DE CAPACIDADE (PC)
			START-UP COSTS (SC)	1 SETUP E START-UP (M1-SC)	LIMITE DE CAPACIDADE E SETUP IMPACTANDO NA DISPONIBILIDADE DAS MÁQUINAS (PC-SU)
		CONSTANT CAPACITY (CC) UNCAPACITATED (U)	START-UP TIMES (ST)	1 SETUP E START-UP DEPENDENTE DA SEQUÊNCIA (M1-SQ)	LIMITE DE CAPACIDADE E START-UP IMPACTANDO NA DISPONIBILIDADE DAS MÁQUINAS (PC-ST)
			MINIMUM PRODUCTION LEVELS (LB)	K SETUPS POR PERÍODO (MK)	LIMITE DE CAPACIDADE E PREPARAÇÃO DEPENDENTE DA SEQUÊNCIA IMPACTANDO NA DISPONIBILIDADE DAS MÁQUINAS (PC-SQ)
			SALES AND LOST SALES (SL)	K SETUPS E START-UP (MK-SC)	SEM RETRIÇÕES DE LIMITE DE CAPACIDADE (PC-U)
			SAFETY STOCKS (SS)	K SETUPS, START-UP E VARIÁVEIS DE PREPARAÇÃO DEPENDENTE DA SEQUÊNCIA (MK-SQ)	LIMITE DE CAPACIDADE E COM SETUPS ENTRE PRODUTOS DE FAMÍLIAS DISTINTAS (PC-FAM)
	MULTIESTÁGIO EM SÉRIE (ML-S)				
	MULTIESTÁGIO COM ESTRUTURA DE MONTAGEM (ML-A)				
	MULTIESTÁGIO GERAL (ML-G)				
MULTIESTÁGIO COM ESTRUTURA DE DISTRIBUIÇÃO (ML-D)					
MULTI-LEVEL PROBLEMS					

Quadro 25 – Classificação dos Problemas de *Lot Sizing* de acordo com Pochet e Wolsey (2006)
Fonte: Autoria própria

A.1 PROBLEMAS DE DIMENSIONAMENTO DE LOTES PARA ÚNICO ITEM (*SINGLE-ITEM PROBLEMS*)

Nos casos de menor complexidade, busca-se otimizar o dimensionamento de lotes considerando a produção de um único item, ou seja, está sendo abordado um Problema de Dimensionamento de Lotes para Único Item. Pochet e Wolsey (2006) classificam esses problemas utilizando três critérios: a versão do problema tratado (PROB); os limites ou capacidade de produção (CAP); e a extensão ou variação contida no problema (VAR). Combinando os campos PROB-CAP-VAR, os autores traçam um mapa abrangente dos problemas de *Lot Sizing* para um único produto na indústria.

O campo PROB pode assumir quatro versões possíveis:

a) LS (Problema de Dimensionamento de Lotes Clássico ou *Lot Sizing*): problema de encontrar o plano de produção para um item, satisfazendo a demanda em todo período e as restrições de capacidade, minimizando o inventário e os custos de produção. Esse problema é representado pelos parâmetros:

- d_t : a demanda a ser satisfeita no período t , que é a demanda prevista ou o montante de ordens de compra dos fornecedores;
- p'_t : o custo unitário de produção no período t ;
- h'_t : o custo unitário para estocar uma unidade de inventário no final do período t ;
- q_t : o custo fixo de *setup* que tem de ser pago caso haja produção no período t ;
- C_t : o limitante superior da produção no período t , ou seja, a capacidade de produção nesse período.

Além disso, o problema contém as seguintes variáveis de decisão:

- x_t : quantidade produzida no período t ;
- s_t : estoque no término do período t ;
- y_t : variável binária que assume o valor “1” se há um *setup* no início do período t e assume o valor “0” caso contrário.

Observa-se que o custo total de produção em um determinado período t é caracterizado pelo custo de *setup* q_t e o custo de produção unitário p'_t . Além disso, no primeiro período do horizonte de planejamento, um parâmetro que representa o custo unitário do inventário inicial, h'_0 , pode ser utilizado.

- b) WW (Wagner-Whitin Problem): esse problema consiste no LS com uma condição adicional de que é sempre mais vantajoso pagar para produzir o mais tarde possível. Para representar tal condição matematicamente, se define um novo parâmetro para o custo de estoque – h_t – sendo que esse parâmetro obedece à igualdade $h_t = h'_t + p'_t - p'_{t+1}$ para $0 \leq t \leq n$, onde $p'_0 = p'_{n+1} = 0$. A definição de tal parâmetro indica que, se ocorre *setup* em ambos os períodos t e $t + 1$, então é mais custoso produzir no período t e estocar até o período $t + 1$, que produzir diretamente no período $t + 1$. Essa condição é denominada falta de motivação especulativa para produção antecipada.
- c) DLSI (Problema de Dimensionamento de Lotes Discreto com Estoque Inicial ou Discrete Lot Sizing with Variable Initial Stock): consiste no problema de LS com uma restrição adicionada à produção dos itens que faz com que o modelo permita apenas duas possibilidades – há produção no período t , com capacidade total C_t , ou não há produção nesse período. Essa versão é popularmente conhecida como produção “tudo ou nada”.
- d) DLS (Problema de Dimensionamento de Lotes Discreto ou Discrete Lot Sizing): consiste no problema de DLSI sem a consideração do estoque inicial como parâmetro.

Os problemas de dimensionamento de lotes para um item podem ser classificados segundo os limites ou capacidade de produção (CAP), de três maneiras:

- a) C (Capacitado ou Capacitated): problema nos quais a capacidade C_t varia ao longo dos períodos t que compõem o horizonte de planejamento.
- b) CC (Capacidade Constante ou Constant Capacity): esse é o caso onde há uma capacidade constante $C_t = C$, para todos os períodos t considerados.
- c) U (Sem limite de capacidade ou Uncapacitated): quando não há limite de quantidade de itens produzidos por período.

O campo VAR determina extensões de alguma das doze possibilidades de modelos PROB-CAP para modelar um problema de dimensionamento de lotes de um único produto. Esse campo pode assumir diversos valores:

- a) B (Backlogging): a demanda deve ser satisfeita, mas a inserção do *Backlogging* torna possível atendê-la com um determinado atraso. Usualmente, há uma penalização por esse atraso por meio de um custo de *Backlogging* proporcional à quantidade de itens em atraso e à duração do mesmo.

- b) SC (Start-Up Costs): são modelos que abordam os *setups* do dimensionamento de lotes de forma simplificada, nos quais apenas se penaliza a função objetivo com um custo g_t quando em um determinado período t ocorre *setup* no mesmo.
- c) ST (Start-Up Time): é necessário modelar a utilização da capacidade de uma planta industrial com acurácia para que se obtenha planos de produção factíveis, logo, o conjunto de restrições de um problema deve considerar a perda de capacidade produtiva por conta do *start-up* da produção de um *batch* ou de uma troca de produto por outro. Os modelos ST, ao contrário dos SC, consideram essa perda de capacidade – se há troca de fabricação no período t , a capacidade C_t apresenta um decréscimo de ST_t . Se o tempo de *start-up* é constante, o que pode ser representado pela notação $ST(C)$, então $ST_t = ST$ para qualquer t .
- d) LB (Minimum Production Levels): em alguns problemas, para garantir um nível mínimo de produtividade, limitantes inferiores de volume de produção são impostos à manufatura. Por exemplo, esse recurso é usualmente utilizado combinado com os custos de *start-up* para evitar pequenos *batches* de produção nas soluções. Essa restrição pode ser decorrente de aspectos tecnológicos intrínsecos às linhas de produção. Nesses casos, quando há produção no período t , no mínimo uma quantidade LB_t deve ser produzida. A notação $LB(C)$ pode ser utilizada em alusão a um lote mínimo de produção constante no horizonte de tempo, ou seja, $LB_t = LB$ para qualquer t .
- e) SL (Sales and Lost Sales): em alguns casos, a demanda a ser atendida não é previamente fixada como um parâmetro do modelo. Isso pode ocorrer quando a capacidade é demasiadamente pequena para satisfazer a demanda potencial ou quando o preço de venda não cobre os custos marginais de produção. Nesses casos, o problema de dimensionamento se torna um problema de maximização de lucro e adicionalmente à demanda d_t , considera-se uma quantidade v_t que pode ser vendida a um preço unitário c_t . É importante observar a diferenciação entre as extensões B e ST, neste último caso é possível não atender parte da demanda, já em um problema com *Backlogging*, no máximo, se posterga o atendimento de uma demanda.
- f) SS (Safety Stocks): a última possibilidade considerada e presente na maioria das aplicações práticas são os estoques de segurança, que são considerados para proteger as vendas de uma organização dos riscos e das incertezas contidos nas previsões de demanda. Entretanto, estoques de segurança não são normalmente considerados nas publicações científicas.

A seguir são apresentados alguns dos modelos descritos para o Problema de Dimensionamento de Lotes para Único Item.

A.1.1 MODELO LS-C

Um modelo LS-C contém os parâmetros já mencionados para o problema clássico de LS:

- d_t : a demanda a ser satisfeita no período t , que é a demanda prevista ou o montante de ordens de compra dos fornecedores;
- p'_t : o custo de produção no período t ;
- h'_t : o custo unitário para estocar uma unidade de inventário no final do período t ;
- q_t : o custo fixo de *setup* que tem de ser pago caso haja produção no período t ;
- C_t : o limitante superior da produção no período t , ou seja, a capacidade de produção nesse período.

Além disso, contém as variáveis:

- x_t : quantidade produzida no período t para $1 \leq t \leq n$;
- s_t : estoque no término do período t para $0 \leq t \leq n$;
- y_t : variável binária que assume o valor “1” se há um *setup* no início do período t para $1 \leq t \leq n$ e assume o valor “0” caso contrário.

O problema pode ser formulado da seguinte maneira:

Minimizar:

$$\sum_{t=1}^n p'_t x_t + \sum_{t=0}^n h'_t s_t + \sum_{t=1}^n q_t y_t \quad (\text{A. 1})$$

Sujeito à:

$$s_{t-1} + x_t = d_t + s_t \quad 1 \leq t \leq n \quad (\text{A. 2})$$

$$x_t \leq C_t y_t \quad 1 \leq t \leq n \quad (\text{A. 3})$$

$$x \in R_+^n, s \in R_+^{n+1}, y \in \{0,1\}^n \quad (\text{A. 4})$$

A função objetivo (A.1) visa a minimizar os custos de produção, de estoque e de *setup*. As restrições (A.2) representam o balanço do fluxo de produção para cada período t e as restrições (A.3) representam as restrições de capacidade e também fixam as variáveis de *setup*

y_t em “1” sempre que há produção. Por fim, em (A.4), define-se o domínio das variáveis do problema.

A.1.2 MODELO WW-C

O modelo Wagner-Whitin com restrição de capacidade é representado por:

Minimizar:

$$\sum_{t=0}^n h_t s_t + \sum_{t=1}^n q_t y_t \quad (\text{A.5})$$

Sujeito à:

$$s_{k-1} + \sum_{u=k}^t C_u y_u \geq d_{kt} \quad 1 \leq k \leq t \leq n \quad (\text{A.6})$$

$$\mathbf{s} \in R_+^{n+1}, \mathbf{y} \in \{0,1\}^n \quad (\text{A.7})$$

Nesse caso foi utilizada a notação $d_{kt} \equiv \sum_{u=k}^t d_u$.

A função objetivo (A.5) minimiza os custos de estoque e de preparação de máquina ou *setup*. Lembrar que para o modelo Wagner-Whitin (WW), minimizar o custo de estoque h_t consiste em, indiretamente, minimizar os custos de produção já que $h_t = h'_t + p'_t - p'_{t+1}$ para $0 \leq t \leq n$, onde $p'_0 = p'_{n+1} = 0$. As restrições (A.6) asseguram que os níveis de estoque existentes somada à capacidade produtiva disponível sejam suficientes para o atendimento da demanda e, em (A.7), define-se o domínio das variáveis do problema.

A.1.3 MODELO DLSI-C

Basicamente, é possível obter esse modelo a partir da formulação LS-C com a substituição das variáveis x_t e s_t . Para o caso da variável x_t , basta substituí-la por $x_t = C_t y_t$; já no caso da variável s_t é necessária alguma manipulação matemática: é possível somar todas as restrições de (A.2) da formulação LS-C, obtendo-se a igualdade $s_t = s_0 + \sum_{u=1}^t x_u - d_{1t}$ e, a partir daí, torna-se possível eliminar a variável $s_t > 0$ por substituições, chegando-se à formulação a seguir.

Minimizar:

$$h_0 s_0 + \sum_{t=1}^n q'_t y_t \quad (\text{A. 8})$$

Sujeito à:

$$s_0 + \sum_{u=1}^t c_u y_u \geq d_{1t} \quad 1 \leq t \leq n \quad (\text{A. 9})$$

$$s_0 \in R_+^1, \mathbf{y} \in \{0,1\}^n \quad (\text{A. 10})$$

A função objetivo (A.8) tem o intuito de minimizar os custos de estoque e de *setup*. As restrições (A.9) asseguram o atendimento da demanda e, em (A.10), o domínio das variáveis problema é definido.

A.1.4 MODELO DLS-C

O DLS consiste no problema de DLSI sem a consideração do estoque inicial como parâmetro. Logo, sua formulação, apresentada na sequência, consiste no problema DLSI com a variável s_0 fixada em “0”.

Minimizar:

$$\sum_{t=1}^n q'_t y_t \quad (\text{A. 11})$$

Sujeito à:

$$\sum_{u=1}^t c_u y_u \geq d_{1t} \quad 1 \leq t \leq n \quad (\text{A. 12})$$

$$\mathbf{y} \in \{0,1\}^n \quad (\text{A. 13})$$

A função objetivo (A.11) tem o intuito de minimizar os custos de *setup*. As restrições (A.12) asseguram o atendimento da demanda e, em (A.13), o domínio das variáveis do problema é definido.

A.1.5 MODELOS PROB-CAP-B

Para que os modelos PROB-CAP passem a contemplar a possibilidade de *backlogging* basta que se adicionem à sua formulação:

- b'_t : parâmetro que quantifica um custo de *backlogging* por unidade de produto não entregue no período;
- r_t : o *backlog* no final do período t .

Aplicando o raciocínio anteriormente exposto aos modelos apresentados de 2.1.1.3 a 2.1.1.4, têm-se os modelos:

a) LS-C-B (problema de dimensionamento de lotes capacitado com *backlogging*)

Minimizar:

$$\sum_{t=0}^n h'_t s_t + \sum_{t=1}^n b'_t r_t + \sum_{t=1}^n p'_t x_t + \sum_{t=1}^n q_t y_t \quad (\text{A. 14})$$

Sujeito à:

$$s_{t-1} - r_{t-1} + x_t = d_t + s_t - r_t \quad 1 \leq t \leq n \quad (\text{A. 15})$$

$$x_t \leq C_t y_t \quad 1 \leq t \leq n \quad (\text{A. 16})$$

$$\mathbf{x}, \mathbf{r} \in R_+^n, \mathbf{s} \in R_+^{n+1}, \mathbf{y} \in \{0,1\}^n \quad (\text{A. 17})$$

b) WW-C-B (problema de Wagner-Whitin capacitado com *backlogging*)

Minimizar:

$$\sum_{t=0}^n h'_t s_t + \sum_{t=1}^n b'_t r_t + \sum_{t=1}^n q_t y_t \quad (\text{A. 18})$$

Sujeito à:

$$s_{k-1} + r_l + \sum_{u=k}^l C_u y_u \geq d_{kl} \quad 1 \leq k \leq l \leq n \quad (\text{A. 19})$$

$$\mathbf{s} \in R_+^{n+1}, \mathbf{r} \in R_+^n, \mathbf{y} \in \{0,1\}^n \quad (\text{A. 20})$$

c) DLSI-C-B (problema de dimensionamento de lotes discreto com estoque inicial, capacitado e com *backlogging*)

Minimizar:

$$h_0 s_0 + \sum_{t=1}^n b'_t r_t + \sum_{t=1}^n q'_t y_t \quad (\text{A. 21})$$

Sujeito à:

$$s_0 + r_t + \sum_{u=1}^t C_u y_u \geq d_{1t} \quad 1 \leq t \leq n \quad (\text{A. 22})$$

$$s_0 \in R_+^1, \mathbf{r} \in R_+^n, \mathbf{y} \in \{0,1\}^n \quad (\text{A. 23})$$

d) DLS-C-B (problema de dimensionamento de lotes discreto, capacitado e com *backlogging*)

Minimizar:

$$\sum_{t=1}^n b'_t r_t + \sum_{t=1}^n q'_t y_t \quad (\text{A. 24})$$

Sujeito à:

$$r_t + \sum_{u=1}^t C_u y_u \geq d_{1t} \quad 1 \leq t \leq n \quad (\text{A. 25})$$

$$\mathbf{r} \in R_+^n, \mathbf{y} \in \{0,1\}^n \quad (\text{A. 26})$$

A.1.6 MODELOS PROB-CAP-SC

A formulação básica para os problemas de dimensionamento de lotes capacitados que consideram custos de *setup* (LS-C-SC) requer inclusões nas formulações LS-C:

- g_t : parâmetro que quantifica a penalização da função objetivo para os períodos nos quais há a necessidade de um processo de *start-up*;
- z_t : variável binária que assume o valor “1” se há um *setup* no período t , ou seja, se há uma preparação de máquina no período t , mas não houve tal preparação no período $t - 1$, e assume o valor “0” caso contrário.

Por exemplo, a formulação resultante para o problema LS-C-SC, é a seguinte:

Minimizar:

$$\sum_{t=1}^n p'_t x_t + \sum_{t=0}^n h'_t s_t + \sum_{t=1}^n q_t y_t + \sum_{t=1}^n g_t z_t \quad (\text{A. 27})$$

Sujeito à:

$$s_{t-1} + x_t = d_t + s_t \quad 1 \leq t \leq n \quad (\text{A. 28})$$

$$x_t \leq C_t y_t \quad 1 \leq t \leq n \quad (\text{A. 29})$$

$$z_t \geq y_t - y_{t-1} \quad 1 \leq t \leq n \quad (\text{A. 30})$$

$$z_t \leq y_t \quad 1 \leq t \leq n \quad (\text{A. 31})$$

$$z_t \leq 1 - y_{t-1} \quad 1 \leq t \leq n \quad (\text{A. 32})$$

$$\mathbf{x} \in R_+^n, \mathbf{s} \in R_+^{n+1}, \mathbf{y}, \mathbf{z} \in \{0,1\}^n \quad (\text{A. 33})$$

Nesse caso, considera-se y_0 como um parâmetro que indica a configuração das máquinas no período $t = 0$. As restrições adicionais (A.30) – (A.32) definem os valores das variáveis adicionais de *start-up*. De forma geral, consistem em uma linearização das restrições $z_t = y_t (1 - y_{t-1})$ e indicam que só há *start-up* em um período t , se há *setup* em um período t e não houve essa mesma preparação do equipamento no período $t - 1$.

As formulações WW-C-SC, DLSI-C-SC e DLS-C-SC podem ser obtidas rapidamente com a adição das restrições (A.30) – (A.32) e a restrição de integralidade $\mathbf{z} \in \{0,1\}^n$ às formulações WW-C, DLSI-C e DLS-C, respectivamente.

A.1.7 MODELOS PROB-CAP-ST

Os modelos que consideram o *start-up time*, ST, são uma evolução dos modelos SC apresentados em 2.1.1.6. Para os modelos ST, há uma penalização da capacidade produtiva no caso de *setup*, substituindo-se as restrições (A.29) dos modelos SC pelas restrições:

$$x_t \leq C_t y_t - ST_t z_t \quad 1 \leq t \leq n \quad (\text{A. 34})$$

A.1.8 MODELOS PROB-CAP-LB

A formulação geral dos problemas de dimensionamento de lotes que requerem nível mínimo de produtividade (PROB-CAP-LB) não exige variáveis adicionais. Em geral, para esses casos se mantém a modelagem PROB-CAP com adição das restrições:

$$x_t \geq LB_t y_t \quad 1 \leq t \leq n \quad (\text{A.35})$$

A.1.9 MODELOS PROB-CAP-SL

A formulação básica para os problemas de dimensionamento de lotes que consideram perdas de vendas (PROB-CAP-SL) requer inclusões nas formulações PROB-CAP:

- v_t : variável que indica quantidade de produtos vendidos no período t , além da demanda d_t fixada, para $0 \leq t \leq n$;
- c_t : parâmetro que quantifica o faturamento por unidade de produtos v_t vendida;
- u_t : parâmetro que consiste em um limitante superior de v_t para um período t .

Com tais inserções torna-se possível considerar uma análise de vendas *versus* vendas perdidas. A seguir é apresentado o modelo LS-C-SL:

Maximizar:

$$\sum_{t=1}^n (c_t v_t - p_t x_t) - \sum_{t=0}^n h'_t s_t - \sum_{t=1}^n q_t y_t \quad (\text{A.36})$$

Sujeito à:

$$s_{t-1} + x_t = d_t + v_t + s_t \quad 1 \leq t \leq n \quad (\text{A.37})$$

$$x_t \leq C_t y_t \quad 1 \leq t \leq n \quad (\text{A.38})$$

$$v_t \leq u_t \quad 1 \leq t \leq n \quad (\text{A.39})$$

$$\mathbf{x}, \mathbf{v} \in R_+^n, \mathbf{s} \in R_+^{n+1}, \mathbf{y} \in \{0,1\}^n \quad (\text{A.40})$$

Note que nesse caso, é modelado um problema de maximização, com a função objetivo (A.36) visando a lucros máximos. Além disso, as restrições de balanço de fluxo de produção foram adaptadas em (A.37) e, por fim, as restrições (A.39) impõem limitantes superiores às vendas.

A.1.10 MODELOS PROB-CAP-SS

Para incorporar os estoques de segurança, basta adicionar limitantes inferiores SS_t ao nível de estoque s_t no final do período t , ou seja, basta adicionar desigualdades $s_t \geq SS_t$ para $1 \leq t \leq n$.

A.2 PROBLEMAS DE DIMENSIONAMENTO DE LOTES PARA VÁRIOS ITENS (MULTI-ITEM SINGLE-LEVEL PROBLEMS)

Prosseguindo com a apresentação de seu esquema de classificação, Pochet e Wolsey (2006), abordam problemas mais complexos que envolvem o dimensionamento de lotes para a produção de vários produtos ou itens, estendendo a classificação de produção de único item apresentada em A.1.

De forma geral, esses problemas têm um conjunto de soluções factíveis da forma $Z^{MI^9} = \left(\prod_{i=1}^{NI^{10}} X_i^{LS-C} \right) \cap Y^L$, onde X_i^{LS-C} representa o conjunto de soluções do problema de dimensionamento de lotes para o item i e Y^L é o conjunto de restrições que lidam com as interações entre os diferentes itens, seja porque esses compartilham os recursos de produção ou pelo fato de apresentarem tempos e custos de *setup* influenciados por sua ordem no sequenciamento da produção.

Os autores mencionam que, em geral, o conjunto Y^L pode ser considerado como a intersecção dos conjuntos Y^{PM} (*production mode set*), que contém restrições que contemplam o modo de produção, ou seja, que representam as particularidades do *setup* e *start-up* em um ambiente de produção de itens diversos, e Y^{PQ} (*production quantity set*), que tem foco na quantidade produzida, logo, contém restrições que limitam o volume de produção. Dessa forma, para os problemas *Multi-Item Single-Level*, o que ocorre é uma expansão da classificação

⁹ Atribui-se o nome Z^{MI} ao conjunto de soluções factíveis de um problema de dimensionamento de lotes com múltiplos itens. A nomenclatura *MI* vem da expressão em inglês, *Multi-Item*.

¹⁰ Neste caso utiliza-se *NI* para denotar o valor máximo que o índice i pode assumir. Para essa situação específica, seria possível definir o índice i , que representa os itens produzidos, como $i = 1, \dots, N$.

PROB-CAP-VAR proposta aos modelos *Single-Item*, abrangendo os campos adicionais PM (modo de produção) e PQ (quantidade de produção). Além disso, os problemas passam a incorporar o índice m , que representa o número de produtos ou itens considerados.

O campo PM pode assumir seis valores possíveis:

- a) $\underline{M}_1$: trata-se do caso mais simples, no qual há, no máximo, um *setup* por período.

Nesse caso, basta que se adicionem a um problema de único item as restrições:

$$\sum_{i=1}^m y_t^i \leq 1 \quad 1 \leq t \leq n \quad (\text{A.41})$$

- b) $\underline{M}_1\text{-SC}$: análogo ao modelo $\underline{M}_1$, porém considera os custos de *setup* (SC). Apresenta a inclusão das variáveis binárias:

- z_t^i : variável de *start-up* ou de ativação, assume o valor “1” se há a máquina está preparada para o artigo i no período t , mas não estava preparada no período $t - 1$, ou seja, se $y_t^i = 1$ e $y_{t-1}^i = 0$. A variável binária assume o valor “0” caso contrário;
- w_t^i : variável de *switch-off* ou de desativação, assume o valor “1” se a máquina está preparada para o artigo i no período t , mas não estará preparada no período $t + 1$, ou seja, se $y_t^i = 1$ e $y_{t+1}^i = 0$. A variável binária assume o valor “0” caso contrário.

- c) $\underline{M}_1\text{-SQ}$: consiste no problema $\underline{M}_1\text{-SC}$ com a adição das variáveis de preparação dependente da sequência, que indicam que houve a mudança de preparação ou *setup* do artigo i no período $t - 1$ para uma preparação para o artigo j no período t . Matematicamente, formula-se esse ponto por meio da variável θ_t^{ij} .

- θ_t^{ij} : variável binária que assume o valor “1” se há preparação para o artigo i no período $t - 1$ e uma preparação ou *setup* para o artigo j no período t , ou seja, se $y_{t-1}^i = 1$ e $y_t^j = 0$. A variável binária assume o valor “0” caso contrário.

- d) $\underline{M}_k$: é o caso para o qual $k \geq 2$ itens podem ser preparados em um único período t . Nesse caso, as restrições (A.41) é modificada, obtendo-se a desigualdade $\sum_{i=1}^m y_t^i \leq k$.

- e) $\underline{M}_k\text{-SC}$: trata-se do problema com variáveis de *start-up* presentes.

Quando mais de um item pode ser produzido por período, é necessário definir de modo preciso o conceito de *start-up*. Pochet e Wolsey (2006) assumem que apenas um item é preparado em qualquer momento durante um período e, logicamente, que um item somente pode ser produzido se a máquina está preparada para a sua produção, ou seja, houve um *setup* para esse item. A partir daí, os autores definem que há *start-up* de um item i no período t , se

houve *setup* desse item no mesmo período e se o item i não vem sendo produzido continuamente desde antes do término do período $t - 1$. Por exemplo, na Figura 35, pode-se afirmar que há um *start-up* para a produção do item “1” no período “2”, mas não há *start-up* para a produção do item “4” no mesmo período.

Figura 35 – Representação gráfica de diferentes planos de produção
Fonte: Pochet e Wolsey (2006)

- f) M_k-SQ: trata-se do problema M_k-SC com a adição das variáveis de preparação dependente da sequência. Em sua modelagem, define-se a mesma variável binária θ_t^{ij} utilizada para os problemas M₁-SQ.

Já o campo PQ pode apresentar os valores:

- a) PC: é o caso mais simples onde somente a capacidade produtiva é limitada, adicionando-se as restrições:

$$\sum_{i=1}^m a^i x_t^i \leq L_t \quad 1 \leq t \leq n \quad (\text{A.42})$$

Considera-se a^i um parâmetro que quantifica o consumo de capacidade por unidade do item i produzido. Essa capacidade pode ser dada em unidades diversas, usualmente tempo de produção. Define-se L_t como o limitante superior da quantidade produzida por período t .

- b) PC-SU: similar ao caso anterior, porém contém a adição de tempos de *setup* que reduzem a disponibilidade das máquinas para a produção. É possível equacionar tal perda:

$$\sum_{i=1}^m a^i x_t^i + \sum_{i=1}^m b^i z_t^i \leq L_t \quad 1 \leq t \leq n \quad (\text{A.43})$$

Em (A.43), b^i é o parâmetro que representa o quanto de capacidade produtiva se perde por *setup* do item i .

- c) PC-ST: semelhante ao problema PC-SU, exceto pela substituição dos tempos de *setup* pelos tempos de *start-up*:

$$\sum_{i=1}^m a^i x_t^i + \sum_{i=1}^m c^i z_t^i \leq L_t \quad 1 \leq t \leq n \quad (\text{A. 44})$$

Em (A.44), c^i é o parâmetro que representa o quanto de capacidade produtiva se perde por *start-up* do item i . Nota-se que para que se obtenham modelos coerentes, o modo de produção M_k -SC também tem de compor a formulação.

- d) PC-SQ: análogo ao problema PC-ST, exceto pela substituição das variáveis de *start-up* pelas variáveis de preparação dependente da sequência:

$$\sum_{i=1}^m a^i x_t^i + \sum_{i,j=1}^m c^{ij} \theta_t^{ij} \leq L_t \quad 1 \leq t \leq n \quad (\text{A. 45})$$

Em (A.45), c^{ij} é o parâmetro que representa o quanto de capacidade produtiva se perde em uma preparação do item i para o item j .

- e) PC-U: indica ausência de limitação na capacidade produtiva.
f) PC-FAM: indica que há um *setup* entre produtos de famílias distintas. Esses problemas necessitam da definição de uma nova variável:
- Y_t : variável binária que assume o valor “1” se há um *setup* entre itens de famílias distintas no período t , e assume o valor “0” caso contrário.

Essa variável é incorporada ao modelo por meio das restrições:

$$\sum_{i=1}^m a^i x_t^i \leq L_t Y_t \quad 1 \leq t \leq n \quad (\text{A. 46})$$

A seguir, são apresentados alguns modelos possíveis para o Problema de Dimensionamento de Lotes para Vários Itens de acordo com a classificação proposta, a fim de ilustrar de forma mais concreta a formulação desses problemas.

A.2.1 MODELO LS-C-B/ M_1

Consiste no modelo matemático para problema de dimensionamento de lotes capacitado, com *backlogging* e um único *setup* por período. Sua representação formal é:

Minimizar:

$$\sum_{i,t} p_t^i x_t^i + \sum_{i,t} h_t^i s_t^i + \sum_{i,t} b_t^i r_t^i + \sum_{i,t} q_t^i y_t^i \quad (\text{A. 47})$$

Sujeito à:

$$s_{t-1}^i - r_{t-1}^i + x_t^i = d_t^i + s_t^i - r_t^i \quad \forall i, t \quad (\text{A. 48})$$

$$x_t^i \leq C_t^i y_t^i \quad \forall i, t \quad (\text{A. 49})$$

$$\sum_i y_t^i \leq 1 \quad \forall t \quad (\text{A. 50})$$

$$\mathbf{s} \in R_+^{m(n+1)}, \mathbf{r}, \mathbf{x} \in R_+^{mn}, \mathbf{y} \in \{0,1\}^{mn} \quad (\text{A. 51})$$

A.2.2 MODELO LS-C-B/M₁-SC

Consiste no modelo matemático para problema de dimensionamento de lotes capacitado, com *backlogging*, um único *setup* por período e custos de *setup* e *start-up*. Sua representação formal é:

Minimizar:

$$\sum_{i,t} p_t^i x_t^i + \sum_{i,t} h_t^i s_t^i + \sum_{i,t} b_t^i r_t^i + \sum_{i,t} q_t^i y_t^i + \sum_{i,t} g_t^i z_t^i \quad (\text{A. 52})$$

Sujeito à:

$$s_{t-1}^i - r_{t-1}^i + x_t^i = d_t^i + s_t^i - r_t^i \quad \forall i, t \quad (\text{A. 53})$$

$$x_t^i \leq C_t^i y_t^i \quad \forall i, t \quad (\text{A. 54})$$

$$\sum_i y_t^i \leq 1 \quad \forall t \quad (\text{A. 55})$$

$$z_t^i \geq y_t^i - y_{t-1}^i \quad \forall i, t \quad (\text{A. 56})$$

$$z_t^i \leq y_t^i \quad \forall i, t \quad (\text{A. 57})$$

$$z_t^i \leq 1 - y_{t-1}^i \quad \forall i, t \quad (\text{A. 58})$$

$$\mathbf{s} \in R_+^{m(n+1)}, \mathbf{r}, \mathbf{x} \in R_+^{mn}, \mathbf{y}, \mathbf{z} \in \{0,1\}^{mn} \quad (\text{A. 59})$$

A.2.3 MODELO LS-C-B/M₁-SQ

Consiste no modelo matemático para problema de dimensionamento de lotes capacitado, com *backlogging*, um único *setup* por período e custos de *setup* e *start-up* dependente da sequência de produção. Sua representação formal é:

Minimizar:

$$\sum_{i,t} p'_t{}^i x_t^i + \sum_{i,t} h'_t{}^i s_t^i + \sum_{i,t} b'_t{}^i r_t^i + \sum_{i,t} q_t^i y_t^i + \sum_{i,j,t} \alpha_t^{ij} \theta_t^{ij} \quad (\text{A.60})$$

Sujeito à:

$$s_{t-1}^i - r_{t-1}^i + x_t^i = d_t^i + s_t^i - r_t^i \quad \forall i, t \quad (\text{A.61})$$

$$x_t^i \leq C_t^i y_t^i \quad \forall i, t \quad (\text{A.62})$$

$$\sum_i y_t^i \leq 1 \quad \forall t \quad (\text{A.63})$$

$$\theta_t^{ij} \geq y_{t-1}^i + y_t^j - 1 \quad \forall i, j, t \quad (\text{A.64})$$

$$\theta_t^{ij} \leq y_{t-1}^i \quad \forall i, j, t \quad (\text{A.65})$$

$$\theta_t^{ij} \leq y_t^j \quad \forall i, j, t \quad (\text{A.66})$$

$$\mathbf{s} \in R_+^{m(n+1)}, \mathbf{r}, \mathbf{x} \in R_+^{mn}, \mathbf{y} \in \{0,1\}^{mn}, \boldsymbol{\theta} \in \{0,1\}^{m^2n} \quad (\text{A.67})$$

A.2.4 MODELO LS-C-B/M_K

Consiste no modelo matemático para problema de dimensionamento de lotes capacitado, com *backlogging* e múltiplos *setups* por período. Sua representação formal é:

Minimizar:

$$\sum_{i,t} p'_t{}^i x_t^i + \sum_{i,t} h'_t{}^i s_t^i + \sum_{i,t} b'_t{}^i r_t^i + \sum_{i,t} q_t^i y_t^i \quad (\text{A.68})$$

Sujeito à:

$$s_{t-1}^i - r_{t-1}^i + x_t^i = d_t^i + s_t^i - r_t^i \quad \forall i, t \quad (\text{A.69})$$

$$x_t^i \leq C_t^i y_t^i \quad \forall i, t \quad (\text{A. 70})$$

$$\sum_i y_t^i \leq k \quad \forall t \quad (\text{A. 71})$$

$$\mathbf{s} \in R_+^{m(n+1)}, \mathbf{r}, \mathbf{x} \in R_+^{mn}, \mathbf{y} \in \{0,1\}^{mn} \quad (\text{A. 72})$$

A.2.5 MODELO LS-C, PC-FAM

Consiste no modelo matemático para problema de dimensionamento de lotes capacitado, com restrições de capacidade produtiva e *setups* de produtos de diferentes famílias. Sua representação formal é:

Minimizar:

$$\sum_{i,t} p_t^i x_t^i + \sum_{i,t} h_t^i s_t^i + \sum_{i,t} q_t^i y_t^i + \sum_t Q_t Y_t \quad (\text{A. 73})$$

Sujeito à:

$$s_{t-1}^i + x_t^i = d_t^i + s_t^i \quad \forall i, t \quad (\text{A. 74})$$

$$\sum_i x_t^i \leq L_t Y_t \quad \forall t \quad (\text{A. 75})$$

$$x_t^i \leq C_t^i y_t^i \quad \forall i, t \quad (\text{A. 76})$$

$$\mathbf{s} \in R_+^{m(n+1)}, \mathbf{x} \in R_+^{mn}, \mathbf{y} \in \{0,1\}^{mn}, \mathbf{Y} \in \{0,1\}^n \quad (\text{A. 77})$$

A.3 PROBLEMAS DE DIMENSIONAMENTO DE LOTES MULTISTÁGIO (*MULTI-LEVEL PROBLEMS*)

Pochet e Wolsey (2006) definem uma classificação para os problemas de dimensionamento multistágio, no qual dois ou mais itens são produzidos e, pelo menos um item é necessário como componente ou subcomponente para outro. A estrutura de produto ou lista de materiais, também conhecida como BOM (*Bill of Materials*), é representada pelos

autores como grafos acíclicos dirigidos, sendo que os nós V representam os itens e os arcos $(i, j) \in A$ associados aos valores $r^{i,j} > 0$ indicam as $r^{i,j}$ unidades do item i necessárias para a produção de cada unidade do item j . Com base em tais grafos: $D(i) = \{ j: (i, j) \in A \}$, representa o conjunto de sucessores diretos de $i \in V$, $S(i)$ o conjunto de todos os sucessores e $P(i)$ o conjunto de predecessores.

Figura 36 – Representação gráfica de estruturas de produto
Fonte: Pochet e Wolsey (2006)

O esquema de classificação, representado na Figura 36, é bastante simples e se resume na adição de quatro possibilidades de classes que complementam algum dos problemas PROB-CAP-VAR/PM-PQ previamente estudados:

- i) ML-S: trata-se do problema multiestágio em série;
- ii) ML-A: problema multiestágio com estrutura de montagem. Nesse caso, o conjunto de sucessores diretos de um determinado item intermediário i somente pode apresentar uma cardinalidade $|D(i)| = 1$ e o conjunto $S(i)$ constitui um caminho dos subconjuntos $D(i)$ para o único produto contendo i ;
- iii) ML-G: problema multiestágio para estrutura de produto geral. Nesse caso, ao contrário de um modelo ML-A, é possível que um item intermediário tenha um conjunto de sucessores com cardinalidade $|D(i)| > 1$, logo um único item intermediário i pode ser subcomponente de dois componentes j e k , por exemplo;
- iv) ML-D: problema multiestágio de distribuição ou arborescência.

A seguir são apresentadas modelagens simplificadas, desconsiderando os *lead times* dos itens envolvidos na produção para os problemas ML-S/LS-C, ML-A/LS-C, ML-G/LS-C e ML-D/LS-C, a fim de ilustrar cada uma dessas classes explicadas.

A.3.1 MODELO ML-S/LS-C

Trata-se do modelo para um problema de dimensionamento de lotes capacitado, multiestágio e em série. Em um problema ML-S, considera-se o planejamento com m itens, em que um grafo dirigido $G = (V, A)$ representa a estrutura de produto, sendo $V = \{1, \dots, m\}$ e $A = \{(2,1), (3,2), \dots, (m, m-1)\}$. Logo, $D(i) = i-1$ e $S(i) = \{1, \dots, i-1\}$ para $i \geq 2$, $D(1) = S(1) = \emptyset$, e $P(i) = \{i+1, \dots, m\}$ para $i < m$. Nesse caso, é possível redefinir os itens fazendo $r^{i,j} = 1$ para todos os arcos do grafo.

É importante definir a variável x_t^{i-1} que representa a demanda dependente no modelo formal desses problemas:

- x_t^{i-1} : variável real que consiste na demanda do item predecessor para a produção de x_t^i .

Com base nessas informações e no conhecimento prévio de um problema LS-C, pode-se definir o modelo básico ML-S/LS-C:

Minimizar:

$$\sum_{i,t} p'_t{}^i x_t^i + \sum_{i,t} h'_t{}^i s_t^i + \sum_{i,t} q_t^i y_t^i \quad (\text{A. 78})$$

Sujeito à:

$$s_{t-1}^i + x_t^i = x_t^{i-1} + s_t^i \quad 2 \leq i \leq m, \quad 1 \leq t \leq n \quad (\text{A. 79})$$

$$s_{t-1}^1 + x_t^1 = d_t^1 + s_t^1 \quad 1 \leq t \leq n \quad (\text{A. 80})$$

$$x_t^i \leq C_t^i y_t^i \quad 1 \leq i \leq m, \quad 1 \leq t \leq n \quad (\text{A. 81})$$

$$\mathbf{s} \in R_+^{m(n+1)}, \mathbf{x} \in R_+^{mn}, \mathbf{y} \in \{0,1\}^{mn} \quad (\text{A. 82})$$

Nessa formulação, a função objetivo (A.78) visa a minimizar os custos de produção, estoque e *setup*. As restrições (A.79) contêm as variáveis x_t^{i-1} anteriormente definidas para a conservação de fluxo das demandas dependentes entre os itens e seus predecessores. Já as restrições de conservação de fluxo (A.80), assumem a forma clássica com base na demanda independente ou externa, representada pelo parâmetro d_t^1 . Em (A.81) assegura-se o respeito ao limite máximo da capacidade produtiva e, em (A.82), tem-se o domínio das variáveis do problema.

A.3.2 MODELO ML-A/LS-C

Trata-se do modelo para um problema de dimensionamento de lotes capacitado, multiestágio com estrutura de montagem. Para tais sistemas, os arcos $(i, D(i)) = 1$ da estrutura de produto formam um grafo dirigido. Para esse problema, também há a possibilidade de redefinição dos itens, obtendo $r^{i,j} = 1$ para todo $j \in D(i)$. O modelo geral dos problemas ML-A/LS-C é descrito a seguir.

Minimizar:

$$\sum_{i,t} p'_t x_t^i + \sum_{i,t} h'_t s_t^i + \sum_{i,t} q_t y_t^i \quad (\text{A.83})$$

Sujeito à:

$$s_{t-1}^i + x_t^i = x_t^{D(i)} + s_t^i \quad 2 \leq i \leq m, \quad 1 \leq t \leq n \quad (\text{A.84})$$

$$s_{t-1}^1 + x_t^1 = d_t^1 + s_t^1 \quad 1 \leq t \leq n \quad (\text{A.85})$$

$$x_t^i \leq C_t^i y_t^i \quad 1 \leq i \leq m, \quad 1 \leq t \leq n \quad (\text{A.86})$$

$$\mathbf{s} \in R_+^{m(n+1)}, \mathbf{x} \in R_+^{mn}, \mathbf{y} \in \{0,1\}^{mn} \quad (\text{A.87})$$

A.3.3 MODELO ML-G/LS-C

Trata-se do modelo para um problema de dimensionamento de lotes capacitado, multiestágio geral. Os modelos ML-G não permitem que sejam fixados os valores de $r^{i,j}$ em “1”, logo, esses valores têm de ser levados em consideração. O modelo ML-G/LS-C pode ser descrito por:

Minimizar:

$$\sum_{i,t} p'_t x_t^i + \sum_{i,t} h'_t s_t^i + \sum_{i,t} q_t y_t^i \quad (\text{A.88})$$

Sujeito à:

$$s_{t-1}^i + x_t^i = \sum_{j \in D(i)} r^{i,j} x_t^j + s_t^i \quad 2 \leq i \leq m, \quad 1 \leq t \leq n \quad (\text{A.89})$$

$$s_{t-1}^1 + x_t^1 = d_t^1 + s_t^1 \quad 1 \leq t \leq n \quad (\text{A. 90})$$

$$x_t^i \leq C_t^i y_t^i \quad 1 \leq i \leq m, \quad 1 \leq t \leq n \quad (\text{A. 91})$$

$$s \in R_+^{m(n+1)}, x \in R_+^{mn}, y \in \{0,1\}^{mn} \quad (\text{A. 92})$$

A.3.4 MODELO ML-D/LS-C

Trata-se do modelo para um problema de dimensionamento de lotes capacitado, multiestágio com estrutura de distribuição. Nesses casos, os problemas multiestágio englobam a distribuição de itens, além de sua produção, considerando-se centros de produção p e áreas de vendas c . A Figura 37 ilustra uma rede com dois centros de produção e duas áreas de vendas.

Figura 37 – Representação esquemática de uma rede ML-D
Fonte: Adaptado de Pochet e Wolsey (2006)

Para modelagem desse problema, fazem-se necessários os parâmetros:

- d_t^c : demanda da área de vendas c no período t ;
- h_t^p : custo de armazenagem no centro de produção p no período t ;
- h_t^c : custo de armazenagem na área de vendas c no período t ;
- $k_t^{p,c}$: custo de transporte por unidade do centro de produção p para a área de vendas c no período t .
- Além disso, é necessária a definição das variáveis:

- s_t^p : estoque do centro de produção p no período t ;
- σ_t^c : estoque da área de vendas c no período t ;
- $v_t^{p,c}$: quantidade de itens transportados do centro de produção p para a área de vendas c no período t .

A seguir é apresentada, como exemplo, a formulação do problema ML-D/ LS-C.

Minimizar:

$$\sum_{p,t} [h_t^p s_t^p + q_t^p y_t^p] + \sum_{c,t} h_t^c \sigma_t^c + \sum_{p,c,t} k_t^{p,c} v_t^{p,c} \quad (\text{A.93})$$

Sujeito à:

$$s_{t-1}^p + x_t^p = \sum_c v_t^{p,c} + s_t^p \quad \forall p, t \quad (\text{A.94})$$

$$x_t^p \leq C^p y_t^p \quad \forall p, t \quad (\text{A.95})$$

$$\sigma_{t-1}^c + \sum_p v_t^{p,c} = d_t^c + \sigma_t^c \quad \forall c, t \quad (\text{A.96})$$

$$x_t^p, s_t^p, \sigma_t^c, v_t^{p,c} \in R_+, y_t^p \in \{0,1\} \quad \forall p, c, t \quad (\text{A.97})$$

A função objetivo (A.93) visa a minimizar os custos de estoque (tanto nos centros de produção, quanto nos centros de vendas), os custos de *setup* e os custos de transporte. As restrições (A.94) asseguram o balanço do fluxo de produção, as restrições (A.95) garantem que se respeite a capacidade produtiva dos centros de produção e as restrições (A.96) estabelecem o balanço do fluxo de vendas. Em (A.97), o domínio das variáveis de decisão é estabelecido.

ANEXO B – RESPOSTAS DO QUESTIONÁRIO APLICADO AO CHEFE DE PRODUÇÃO E AO PROGRAMADOR DA PRODUÇÃO PARA AS VALIDAÇÕES DA LEGITIMIDADE E CONCEITUAL DO MODELO PROPOSTO

QUESTIONÁRIO - VALIDAÇÃO DA LEGITIMIDADE E VALIDAÇÃO CONCEITUAL									
CARGO:	(x) CHEFE DE PRODUÇÃO () PROGRAMADOR DA PRODUÇÃO								
ESCOLARIDADE:	Engenheiro Mecânico								
HÁ QUANTO TEMPO TRABALHA NA INDÚSTRIA DE EMBALAGENS DE VIDRO?				15 Anos					
FAVOR, RESPONDER AS QUESTÕES DE ACORDO COM A ESCALA ABAIXO: [1] "NÃO" OU "DISCORDO"; [2] "SIM, COM ALGUMAS OBSERVAÇÕES" OU "CONCORDO PARCIALMENTE"; [3] "SIM, COM CERTEZA" OU "CONCORDO PLENAMENTE". QUANDO POSSÍVEL, FAVOR JUSTIFICAR AS RESPOSTAS ASSINALADAS.									
1) VOCÊ CONSIDERA QUE O DIMENSIONAMENTO DOS LOTES DE PRODUÇÃO, BEM COMO O SEQUENCIAMENTO DOS MESMOS É UMA ATIVIDADE IMPORTANTE PARA O NEGÓCIO DA EMPRESA E QUE PODE IMPACTAR DIRETAMENTE NOS RESULTADOS DA ÁREA PRODUTIVA?									
<table border="1"> <tr> <td>ESCALA</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>3</td> </tr> </table>					ESCALA	1	2	3	3
ESCALA	1	2	3	3					
<u>JUSTIFICATIVA:</u>	Um mal sequenciamento e dimensionamento pode impactar no resultado do negócio.								
2) UMA FERRAMENTA AUTOMATIZADA QUE GERASSE PLANOS DE PRODUÇÃO VISANDO AO ATENDIMENTO DA DEMANDA E A MELHOR COMBINAÇÃO/ SEQUENCIAMENTO POSSÍVEIS COM BASE NAS RESTRIÇÕES TÉCNICAS DA FÁBRICA SERIA DE UTILIDADE NO SEU COTIDIANO?									
<table border="1"> <tr> <td>ESCALA</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>3</td> </tr> </table>					ESCALA	1	2	3	3
ESCALA	1	2	3	3					
<u>JUSTIFICATIVA:</u>									
3) O MODELO CONCEITUAL APRESENTADO, DESCREVE DE MODO VEROSSÍMIL O PROBLEMA DE DIMENSIONAMENTO DE LOTES E SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO PARA A INDÚSTRIA DE EMBALAGENS DE VIDRO, CONSIDERANDO UMA FÁBRICA DE UM FORNO OPERANDO EM UMA ÚNICA COR?									
<table border="1"> <tr> <td>ESCALA</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>3</td> </tr> </table>					ESCALA	1	2	3	3
ESCALA	1	2	3	3					
<u>JUSTIFICATIVA:</u>									
4) HOJE O PROBLEMA É TRATADO EMPIRICAMENTE, COM BASE NA EXPERIÊNCIA DAS PESSOAS ENVOLVIDAS?									
<table border="1"> <tr> <td>ESCALA</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>3</td> </tr> </table>					ESCALA	1	2	3	3
ESCALA	1	2	3	3					
<u>JUSTIFICATIVA:</u>									

Figura 38 – Respostas do questionário para validações da legitimidade e conceitual aplicado ao chefe de produção

(continua)

QUESTIONÁRIO - VALIDAÇÃO DA LEGITIMIDADE E VALIDAÇÃO CONCEITUAL				
5) AS FERRAMENTAS HOJE DISPONÍVEIS PARA SUPORTE AO PCP NÃO ABRANGEM TOTALMENTE AS ESPECIFICIDADES DO PROCESSO PRODUTIVO E AINDA DEMANDAM UMA CARGA DE TRABALHO CONSIDERÁVEL DAS PESSOAS ENVOLVIDAS NO PROCESSO DE PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO?				
ESCALA		1	2	3
				2
JUSTIFICATIVA:	Além de ser empírica, a análise é feita sobre a necessidade momentânea do mercado.			
6) VOCÊ ACREDITA QUE UM SISTEMA DE APOIO A DECISÃO QUE SIMULASSE PLANOS DE PRODUÇÃO A PARTIR DE UMA DEMANDA DE ENTRADA E COM BASE NO MODELO CONCEITUAL APRESENTADO ABRANGERIA AS PRINCIPAIS DIFICULDADES ENFRENTADAS PELO PCP EM UMA FÁBRICA COM UM FORNO DEDICADO A UMA ÚNICA COR?				
ESCALA		1	2	3
				2
JUSTIFICATIVA:	Atualmente o mercado exige alta flexibilidade e urgência.			
7) OS PLANOS DE PRODUÇÃO GERADOS PELO MODELO PROPOSTO SERIAM DE OPERACIONALIZAÇÃO VIÁVEL NO AMBIENTE FABRIL?				
ESCALA		1	2	3
				2
JUSTIFICATIVA:	Levando-se em conta as limitações técnicas e o impacto causado pelas trocas de fabricação. Acredito que só ajudaria a fábrica, porém, a operacionalização deveria ser do PCP.			
8) COM BASE NOS DADOS DE ENTRADA APRESENTADOS E NAS PREMISSAS ESTABELECIDAS, VOCÊ ACREDITA QUE OS GANHOS APRESENTADOS NA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O PLANO DE PRODUÇÃO REAL E O PLANO OBTIDO COM A SOLUÇÃO DO MODELO PROPOSTO SÃO VÁLIDOS?				
ESCALA		1	2	3
				3
JUSTIFICATIVA:	Ao final, deve-se alcançar as metas de resultados da fábrica.			
9) VOCÊ ACREDITA QUE O GANHO DE TEMPO DE PLANEJAMENTO, COM A POSSILIDADE DA OBTENÇÃO DE PLANOS DE PRODUÇÃO EM ALGUMAS HORAS DE PROCESSAMENTO DE UM SOLVER É UMA VANTAGEM COMPETITIVA INTERESSANTE PARA O NEGÓCIO?				
ESCALA		1	2	3
				2
JUSTIFICATIVA:	Visando à margem obtida através da redução das perdas causadas por mal dimensionamento.			
10) VOCÊ CONCORDA QUE O USO DE UM SISTEMA DE APOIO À DECISÃO É INTERESSANTE PARA A EMPRESA TANTO SOB O PONTO DE VISTA DO PLANEJAMENTO QUANTO SOB O PONTO DE VISTA DA OPERAÇÃO, POIS PROPORCIONA A OBTENÇÃO DE PROGRAMAÇÕES ASSERTIVAS ATÉ MESMO POR PROFISSIONAIS MENOS EXPERIENTES, JÁ QUE AS RESTRIÇÕES DO PLANEJAMENTO SÃO OBSERVADAS PELA LÓGICA DO SISTEMA?				
ESCALA		1	2	3
				2
JUSTIFICATIVA:				

Figura 38 – Respostas do questionário para validações da legitimidade e conceitual aplicado ao chefe de produção

(continuação)

QUESTIONÁRIO - VALIDAÇÃO DA LEGITIMIDADE E VALIDAÇÃO CONCEITUAL				
CARGO:	() CHEFE DE PRODUÇÃO (x) PROGRAMADOR DA PRODUÇÃO			
ESCOLARIDADE:	Engenheiro de Produção			
HÁ QUANTO TEMPO TRABALHA NA INDÚSTRIA DE EMBALAGENS DE VIDRO?				2 anos
FAVOR, RESPONDER AS QUESTÕES DE ACORDO COM A ESCALA ABAIXO: [1] "NÃO" OU "DISCORDO"; [2] "SIM, COM ALGUMAS OBSERVAÇÕES" OU "CONCORDO PARCIALMENTE"; [3] "SIM, COM CERTEZA" OU "CONCORDO PLENAMENTE". QUANDO POSSÍVEL, FAVOR JUSTIFICAR AS RESPOSTAS ASSINALADAS.				
1) VOCÊ CONSIDERA QUE O DIMENSIONAMENTO DOS LOTES DE PRODUÇÃO, BEM COMO O SEQUENCIAMENTO DOS MESMOS É UMA ATIVIDADE IMPORTANTE PARA O NEGÓCIO DA EMPRESA E QUE PODE IMPACTAR DIRETAMENTE NOS RESULTADOS DA ÁREA PRODUTIVA?				
ESCALA 1 2 3 3				
JUSTIFICATIVA:	O lote ideal para cada produto e o sequenciamento otimizado destes são um dos pontos críticos para um bom resultado operacional e consequentemente para negócio.			
2) UMA FERRAMENTA AUTOMATIZADA QUE GERASSE PLANOS DE PRODUÇÃO VISANDO AO ATENDIMENTO DA DEMANDA E A MELHOR COMBINAÇÃO/ SEQUENCIAMENTO POSSÍVEIS COM BASE NAS RESTRIÇÕES TÉCNICAS DA FÁBRICA SERIA DE UTILIDADE NO SEU COTIDIANO?				
ESCALA 1 2 3 3				
JUSTIFICATIVA:	O programador faz inúmeros sequenciamentos para chegar em uma solução que não leva em consideração todos os indicadores, portanto, se houvesse uma ferramenta automática, mesmo que não gerasse soluções ótimas, possibilitaria uma análise mais crítica de todos os KPI's e, após a estratégia definida, o programador faria os pequenos ajustes no plano.			
3) O MODELO CONCEITUAL APRESENTADO, DESCREVE DE MODO VEROSSÍMIL O PROBLEMA DE DIMENSIONAMENTO DE LOTES E SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO PARA A INDÚSTRIA DE EMBALAGENS DE VIDRO, CONSIDERANDO UMA FÁBRICA DE UM FORNO OPERANDO EM UMA ÚNICA COR?				
ESCALA 1 2 3 3				
JUSTIFICATIVA:				
4) HOJE O PROBLEMA É TRATADO EMPIRICAMENTE, COM BASE NA EXPERIÊNCIA DAS PESSOAS ENVOLVIDAS?				
ESCALA 1 2 3 3				
JUSTIFICATIVA:	O dimensionamento dos lotes é definido a partir dos valores de <i>forecast</i> e capacidade de máquina, gerando um sequenciamento "possível", de acordo com a experiência do programador, levando em consideração algumas restrições técnicas previstas pelo Chefe de Produção.			

Figura 39 – Respostas do questionário para validações da legitimidade e conceitual aplicado ao programador da produção

(continua)

QUESTIONÁRIO - VALIDAÇÃO DA LEGITIMIDADE E VALIDAÇÃO CONCEITUAL				
5) AS FERRAMENTAS HOJE DISPONÍVEIS PARA SUPORTE AO PCP NÃO ABRANGEM TOTALMENTE AS ESPECIFICIDADES DO PROCESSO PRODUTIVO E AINDA DEMANDAM UMA CARGA DE TRABALHO CONSIDERÁVEL DAS PESSOAS ENVOLVIDAS NO PROCESSO DE PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO?				
ESCALA		1	2	3
				3
JUSTIFICATIVA:				
6) VOCÊ ACREDITA QUE UM SISTEMA DE APOIO A DECISÃO QUE SIMULASSE PLANOS DE PRODUÇÃO A PARTIR DE UMA DEMANDA DE ENTRADA E COM BASE NO MODELO CONCEITUAL APRESENTADO ABRANGERIA AS PRINCIPAIS DIFICULDADES ENFRENTADAS PELO PCP EM UMA FÁBRICA COM UM FORNO DEDICADO A UMA ÚNICA COR?				
ESCALA		1	2	3
				3
JUSTIFICATIVA:	Sim, mesmo que não seja uma solução 100% ótima, teríamos como analisar os indicadores e apoiar diversas decisões que são tomadas com base na experiência de pessoas do processo.			
7) OS PLANOS DE PRODUÇÃO GERADOS PELO MODELO PROPOSTO SERIAM DE OPERACIONALIZAÇÃO VIÁVEL NO AMBIENTE FABRIL?				
ESCALA		1	2	3
				2
JUSTIFICATIVA:	Levando em consideração o número de trocas, o modelo apresenta um número menor o que o viabiliza com certeza. Entretanto, algumas sequências de produção não seriam propostas pelo programador, pois existe uma alta variabilidade de extração com uma complexidade de troca também de alto nível, de acordo com as restrições técnicas.			
8) COM BASE NOS DADOS DE ENTRADA APRESENTADOS E NAS PREMISSAS ESTABELECIDAS, VOCÊ ACREDITA QUE OS GANHOS APRESENTADOS NA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O PLANO DE PRODUÇÃO REAL E O PLANO OBTIDO COM A SOLUÇÃO DO MODELO PROPOSTO SÃO VÁLIDOS?				
ESCALA		1	2	3
				3
JUSTIFICATIVA:	Sim, o programa proposto fez sequências dimensionando os lotes de produção de forma que tivesse produções mais extensas, com um menor número de trocas, o que permite a estabilização do processo consequentemente um resultado melhor.			
9) VOCÊ ACREDITA QUE O GANHO DE TEMPO DE PLANEJAMENTO, COM A POSSILIDADE DA OBTENÇÃO DE PLANOS DE PRODUÇÃO EM ALGUMAS HORAS DE PROCESSAMENTO DE UM SOLVER É UMA VANTAGEM COMPETITIVA INTERESSANTE PARA O NEGÓCIO?				
ESCALA		1	2	3
				3
JUSTIFICATIVA:	Gera a possibilidade de executar várias propostas de sequenciamento e uma análise criteriosa dos indicadores críticos do processo.			
10) VOCÊ CONCORDA QUE O USO DE UM SISTEMA DE APOIO À DECISÃO É INTERESSANTE PARA A EMPRESA TANTO SOB O PONTO DE VISTA DO PLANEJAMENTO QUANTO SOB O PONTO DE VISTA DA OPERAÇÃO, POIS PROPORCIONA A OBTENÇÃO DE PROGRAMAÇÕES ASSERTIVAS ATÉ MESMO POR PROFISSIONAIS MENOS EXPERIENTES, JÁ QUE AS RESTRIÇÕES DO PLANEJAMENTO SÃO OBSERVADAS PELA LÓGICA DO SISTEMA?				
ESCALA		1	2	3
				3
JUSTIFICATIVA:	Sem dúvida, proporcionaria ao programador uma visão holística do processo, permitindo maior atenção aos indicadores que não fazem parte de sua rotina de programação.			

Figura 39 – Respostas do questionário para validações da legitimidade e conceitual aplicado ao programador da produção

(continuação)

<u>QUESTIONÁRIO - VALIDAÇÃO DA LEGITIMIDADE E VALIDAÇÃO CONCEITUAL</u>
ESPAÇO ABERTO PARA CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS ADICIONAIS À RESPEITO DO MODELO CONCEITUAL APRESENTADO, DOS DADOS DE ENTRADA E PREMISSAS UTILIZADOS E DA QUALIDADE DOS PLANOS DE PRODUÇÃO OBTIDOS:
<p>O modelo proposto é funcional para a realidade do PCP, entretanto, o programador deve fazer pequenos ajustes de acordo com a estratégia definida na reunião de S&OP.</p>

Figura 39 – Respostas do questionário para validações da legitimidade e conceitual aplicado ao programador da produção

(conclusão)

ANEXO C – RESPOSTAS DO QUESTIONÁRIO APLICADO AO PROGRAMADOR
DA PRODUÇÃO PARA A VALIDAÇÃO OPERACIONAL DO MODELO
PROPOSTO

<u>QUESTIONÁRIO - VALIDAÇÃO OPERACIONAL</u>				
QUESTIONÁRIO APLICADO AO PROGRAMADOR DA PRODUÇÃO				
ESCOLARIDADE:	Engenheiro de Produção			
HÁ QUANTO TEMPO TRABALHA NA INDÚSTRIA DE EMBALAGENS DE VIDRO?				2 anos
FAVOR, RESPONDER AS QUESTÕES DE ACORDO COM A ESCALA ABAIXO: [1] "NÃO" OU "DISCORDO" OU "BAIXO (A)"; [2] "SIM, COM ALGUMAS OBSERVAÇÕES" OU "CONCORDO PARCIALMENTE" OU "MEDIANO (A)"; [3] "SIM, COM CERTEZA" OU "CONCORDO PLENAMENTE" OU "ALTA". QUANDO POSSÍVEL, FAVOR JUSTIFICAR AS RESPOSTAS ASSINALADAS.				
1) VOCÊ CONSIDERA OS PLANOS DE PRODUÇÃO OBTIDOS PELA SOLUÇÃO DO MODELO PROPOSTO MUITO PRÓXIMOS DE PLANOS DE PRODUÇÃO REAIS, PASSÍVEIS DE OPERACIONALIZAÇÃO?				
ESCALA		1	2	3
<u>JUSTIFICATIVA:</u>	Apenas com alguns ajustes com base nas estratégias definidas nas reuniões de S&OP.			
2) VOCÊ CONCORDA QUE A AGILIDADE NA OBTENÇÃO DE PLANOS DE PRODUÇÃO PELA SOLUÇÃO DO MODELO PROPOSTO CONSISTE EM UMA VANTAGEM ESTRATÉGICA PARA O PCP, QUE PASSA A TER A POSSIBILIDADE DE SIMULAR DIVERSOS CENÁRIOS COM UM TEMPO DE RESPOSTA DE APENAS ALGUMAS HORAS?				
ESCALA		1	2	3
<u>JUSTIFICATIVA:</u>	Uma ótima ferramenta para gerar várias propostas de programação e apoiar as decisões.			
3) VOCÊ CONSIDERA OS DADOS DE ENTRADA DO MODELO QUANTITATIVO PROPOSTO ADEQUADOS E SUFICIENTES PARA A CRIAÇÃO DE UM PLANO DE PRODUÇÃO?				
ESCALA		1	2	3
<u>JUSTIFICATIVA:</u>				

Figura 40 – Respostas do questionário para validação operacional aplicado ao programador de produção
 (continua)

QUESTIONÁRIO - VALIDAÇÃO OPERACIONAL				
4) OS CUSTOS CALCULADOS NA SOLUÇÃO DO MODELO SÃO SUFICIENTES PARA EMBASAR A TOMADA DE DECISÃO NO QUE TANGE AO PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO?				
ESCALA		1	2	3
JUSTIFICATIVA:				
5) COM BASE NO MODELO QUANTITATIVO APRESENTADO, QUAL SERIA A FACILIDADE DE SE ALIMENTAR UM SISTEMA DE APOIO À DECISÃO BASEADO NO MODELO COM OS DADOS DISPONÍVEIS NO ERP E EM OUTRAS BASES DA EMPRESA?				
ESCALA		1	2	3
JUSTIFICATIVA:				
6) CASO O MODELO PROPOSTO E UM MÉTODO DE SOLUÇÃO JÁ ESTIVESSEM DISPONÍVEIS EM UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL AMIGÁVEL, QUAL SERIA A FACILIDADE DE INTEGRAR AS SOLUÇÕES OBTIDAS COM O PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO VIA ERP E CONTROLES DO PCP?				
ESCALA		1	2	3
JUSTIFICATIVA:	Seria fácil a implementação do modelo proposto nas rotinas dos programadores.			
7) NO SEU PONTO DE VISTA, SERIA INTERESSANTE O DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE UTILIZANDO O MODELO PROPOSTO ALIADO A UM MÉTODO DE SOLUÇÃO?				
ESCALA		1	2	3
JUSTIFICATIVA:				
8) VOCÊ ACREDITA QUE UM PROJETO PARA IMPLANTAÇÃO DE SOFTWARE PARA SUPORTAR A TOMADA DE DECISÃO NO QUE TANGE AO DIMENSIONAMENTO DE LOTES E SEQUENCIAMENTO DE PRODUÇÃO NAS FÁBRICAS DA EMPRESA SERIA VIÁVEL?				
ESCALA		1	2	3
JUSTIFICATIVA:				

Figura 40 – Respostas do questionário para validação operacional aplicado ao programador de produção (continuação)

<u>QUESTIONÁRIO - VALIDAÇÃO OPERACIONAL</u>
ESPAÇO ABERTO PARA CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS ADICIONAIS À RESPEITO DA POSSIBILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DO MODELO QUANTITATIVO PROPOSTO ALIADO A UM MÉTODO DE SOLUÇÃO NA FORMA DE UM SISTEMA DE APOIO À DECISÃO PARA O PCP DA EMPRESA:
Permite ao programador considerar outras variáveis que não estão em sua rotina de programação, desta forma, ele é capaz de elaborar um plano que permite um bom resultado operacional.