

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE BAURU**

RODRIGO THOMAZELLA NETTO

**MAXIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO EM UMA FÁBRICA DE SORVETES
UTILIZANDO UMA ABORDAGEM INTEGRADA DE
DIMENSIONAMENTO E SEQUENCIAMENTO DE LOTES**

BAURU

2018

RODRIGO THOMAZELLA NETTO

**MAXIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO EM UMA FÁBRICA DE SORVETES
UTILIZANDO UMA ABORDAGEM INTEGRADA DE
DIMENSIONAMENTO E SEQUENCIAMENTO DE LOTES**

Dissertação de Mestrado, apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, da Faculdade de Engenharia de Bauru – UNESP como exigência para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Bernardi de Souza

Co-orientadora: Profa. Dra. Sônia Cristina Poltroniere Silva

BAURU

2018

Netto, Rodrigo Thomazella.

Maximização em uma fábrica de sorvetes utilizando uma abordagem integrada de dimensionamento e sequenciamento de lotes / Rodrigo Thomazella Netto, 2018

73 f. : il.

Orientador: Fernando Bernardi de Souza

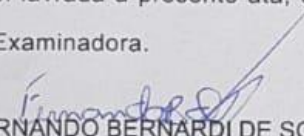
Coorientador: Sônia Cristina Poltroniere Silva

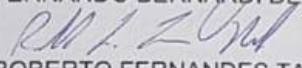
Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2018

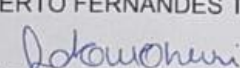
1. Modelo matemático. 2. Otimização. 3. Dimensionamento de lotes. 4. Sequenciamento da produção. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE RODRIGO THOMAZELLA NETTO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 06 dias do mês de dezembro do ano de 2018, às 14:00 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação da FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. FERNANDO BERNARDI DE SOUZA - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia de Produção / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. ROBERTO FERNANDES TAVARES NETO do(a) Departamento de Engenharia de Produção / Universidade Federal de São Carlos, Profa. Dra. ADRIANA CRISTINA CHERRI NICOLA do(a) Departamento de Matemática / Faculdade de Ciências de Bauru - UNESP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de RODRIGO THOMAZELLA NETTO, intitulada **MAXIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO EM UMA FÁBRICA DE SORVETES UTILIZANDO UMA ABORDAGEM INTEGRADA DE DIMENSIONAMENTO E SEQUENCIAMENTO DE LOTES**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.


Prof. Dr. FERNANDO BERNARDI DE SOUZA


Prof. Dr. ROBERTO FERNANDES TAVARES NETO


Profa. Dra. ADRIANA CRISTINA CHERRI NICOLA

*A Deus, Jesus Cristo, Nossa Senhora Aparecida, minha esposa Marina, meu cachorro Bob e
minha filha Helena.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha esposa Marina por todo apoio, carinho e compreensão com o tempo ocupado pelo mestrado em nossas vidas. Por ter tomado conta de tudo que eu não tive tempo de ajudar, pelo incentivo de continuar e por acreditar na minha capacidade.

Agradeço ao meu cachorro Bob, que todos os dias ficou ao meu lado dormindo ou acordado pedindo atenção, sempre junto comigo.

Aos meus pais, Jurandir e Lana, por terem me ensinado viver uma vida simples e honesta, por tudo que me ensinaram e ensinam até hoje, pelas palavras de incentivo e apoio em todas as minhas decisões difíceis.

Aos meus Orientador e Co-Orientadora, respectivamente Professor Dr. Fernando Bernardi de Souza e Professora Dra. Sônia Cristina Poltroniere Silva, por toda orientação dada e por me acolherem e enriquecerem meu trabalho.

Aos meus amigos Augusto e Daisy, que foram importantes durante todo o curso, fundamentalmente no início quando encontrei muitas dificuldades, me auxiliando com aulas particulares, conselhos e orientações sobre o mundo acadêmico.

A fábrica investigada que me atendeu com muita atenção e precisão, me fornecendo os dados e informações para realizar este trabalho.

À CAPES, pela bolsa de mestrado a mim concedida.

A todos os colegas e professores do PPGEP e funcionários da FEB/Unesp, principalmente os da Seção de Pós-Graduação, que sempre me atenderam prontamente com muita qualidade em todas as minhas necessidades.

RESUMO

O presente estudo visa maximizar a produção em uma fábrica de sorvetes, considerando a etapa mais restritiva do processo de produção, a partir de uma adaptação do modelo de otimização matemática GLSPST (*General Lot sizing and Sequence dependent Setup Times*), proposto na literatura. Esse modelo trata da integração de problemas de dimensionamento de lotes e programação da produção, considerando os tempos de preparação de máquina dependentes da sequência. A fábrica investigada enfrenta problemas para atender sua demanda, apresenta altos estoques para determinados sabores de sorvete e nenhum estoque para outros, além de efetuar um número elevado de higienizações, que ocorrem obrigatoriamente entre algumas trocas entre sabores na linha de produção. A modelagem proposta neste trabalho leva em consideração a capacidade instalada e a capacidade de armazenamento total da fábrica, buscando o atendimento da demanda pré-determinada e a manutenção dos estoques dos sabores de sorvete em níveis desejados, respeitando-se as restrições do processo de produção. Foram realizados experimentos computacionais usando o pacote de otimização CPLEX e considerando-se várias classes de instâncias. A análise dos resultados obtidos comprovou a adequação da modelagem proposta para representar o problema, mostrando desempenhos superiores aos atualmente observados na empresa. Além disso, para algumas classes de instâncias, foram obtidas soluções ótimas.

Palavras-chave: modelo matemático, otimização, dimensionamento de lotes, sequenciamento da produção, *setup*.

ABSTRACT

The present study aims to maximize the production in an ice cream factory, considering the general batch size and the sequence dependent configuration times selected in the literature. This model deals with the integration of batch dimensioning problems and production scheduling, considering sequence dependent machine preparation times. Engineering will investigate an issue to meet your demand by submitting high inventories to exclude ice cream flavors and no stock for others, as well as to make a high number of hygienizations, which will be mandatory between some flavors between flavors on the production line. The provided modeling in this work it takes in an installed capacity and a total storage capacity, seeking to meet the predetermined demand and the maintenance of the stocks of the ice cream flavors at desired levels, respecting as restrictions to the production process. Computational experiments were performed using the calibration package and several classes of instances. An analysis of the results showed to be an adequacy of the proposed modeling to represent the problem, showing the current ones for the observers of the company. In addition, for some classes of instances, optimal solutions have been made.

Keywords: mathematical model, optimization, lot sizing, ice cream factory, production scheduling, setup.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Consumo brasileiro em milhões de litros.....	18
Figura 2 – Consumo brasileiro em milhões de litros de massa, picolé e soft.....	18
Figura 3 – Consumo por pessoa em litros por ano no Brasil	19
Figura 4 – Tipos de estrutura de produtos em modelos de múltiplos níveis	25
Figura 5 – Fluxograma de produção da planta do estudo de caso.....	38
Figura 6 – Resultado da função objetivo de cada classe com diferença para possível resultado máximo com apresentação do gap por classe para comparação.....	51
Figura 7 – Exemplos factíveis, exemplos sem solução até o limite de tempo, exemplos ótimos e <i>gaps</i> médios e totais para cada classe.	52
Figura 8 – Estoque inicial e final para cada classe.....	53
Figura 9 – Demanda média diária e produção média diária por classe.....	54
Figura 10 – Estoque inicial e final para demanda base diária de 4.000 unidades.	55
Figura 11 - Demanda média diária e produção média diária para demanda base de 4.000 unidades.....	55
Figura 12 - Produção diária do teste com demanda base de 4.000 unidades.	56
Figura 13 – Total de trocas com e sem higienização por classe.....	56
Figura 14 – Produção e estoque por dia do sabor 1 para um exemplo de cada classe 3.	58
Figura 15 – Produção e estoque por dia do sabor 1 para um exemplo de cada classe 6.	58
Figura 16 – Produção e estoque por dia do sabor 2 para um exemplo de cada classe 3.	59
Figura 17 – Produção e estoque por dia do sabor 2 para um exemplo de cada classe 6.	59
Figura 18 – Produção e estoque por dia do sabor 3 para um exemplo de cada classe 3.	60
Figura 19 – Produção e estoque por dia do sabor 3 para um exemplo de cada classe 6.	60
Figura 20 – Produção e estoque por dia do sabor 4 para um exemplo de cada classe 3.	61
Figura 21 – Produção e estoque por dia do sabor 4 para um exemplo de cada classe 6	61
Figura 22 – Produção e estoque por dia do sabor 5 para um exemplo de cada classe 3.	62
Figura 23 – Produção e estoque por dia do sabor 5 para um exemplo de cada classe 6.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Trocas de produção entre sabores que necessitam ou não de <i>setup</i> (higienização)	40
Tabela 2 – Classes de testes.....	44
Tabela 3 – Percentual de venda de cada sabor para os testes com 10 sabores.	45
Tabela 4 – Percentual de venda de cada sabor para os testes com 5 sabores.	45
Tabela 5 – Intervalo mínimo e máximo de sorteio para cada demanda base para 5 sabores. .	46
Tabela 6 – Intervalo mínimo e máximo de sorteio para cada demanda base para 10 sabores.	46
Tabela 7 – Matriz de tempo de <i>setup</i> para a troca do sabor <i>i</i> para o sabor <i>j</i> utilizada nos testes com 10 sabores	47
Tabela 8 – Matriz de tempo de <i>setup</i> para a troca do sabor <i>i</i> para o sabor <i>j</i> utilizada nos testes com 5 sabores	47
Tabela 9 – Valores de estoque para cada demanda base com a respectiva classe para 5 sabores.	49
Tabela 10 – Valores de estoque para cada demanda base com a respectiva classe para 10 sabores.	49
Tabela 11 – Resultados médios dos 10 exemplos testados por classe.....	50
Tabela 12 – Programação da produção para o período $T = 1$ e subperíodos de 1 a 20	63
Tabela 13 – Programação da produção para o período $T = 2$ e subperíodos de 21 a 40	63
Tabela 14 – Programação da produção para o período $T = 3$ e subperíodos de 41 a 60	63
Tabela 15 – Programação da produção para o período $T = 4$ e subperíodos de 61 a 80	64
Tabela 16 – Programação da produção para o período $T = 5$ e subperíodos de 81 a 100	64
Tabela 17 – Programação da produção para o período $T = 6$ e subperíodos de 101 a 120	64
Tabela 18 – Programação da produção para o período $T = 7$ e subperíodos de 121 a 140	65
Tabela 19 – Programação da produção para o período $T = 8$ e subperíodos de 141 a 160	65
Tabela 20 – Programação da produção para o período $T = 9$ e subperíodos de 161 a 180	65
Tabela 21 – Programação da produção para o período $T = 10$ e subperíodos de 181 a 200 ...	65
Tabela 22 – Programação da produção para o período $T = 11$ e subperíodos de 201 a 220 ...	66
Tabela 23 – Programação da produção para o período $T = 12$ e subperíodos de 221 a 240 ...	66
Tabela 24 – Programação da produção para o período $T = 13$ e subperíodos de 241 a 260 ...	66
Tabela 25 – Programação da produção para o período $T = 14$ e subperíodos de 261 a 280 ...	66

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

PCP	Planejamento e Controle da Produção
LSP	<i>Lot-sizing Problem</i>
PSP	<i>Production Scheduling Problem</i>
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
EOQ	<i>Economic Order Quantity</i>
CLSP	<i>Capacitated Lot Sizing Problem</i>
GLSP	<i>General Lot sizing and Scheduling Problem</i>
GLSPST	<i>General Lot sizing and Scheduling Problem with Sequence-dependent Setup Times</i>
OPL	<i>Optimization Programing Language</i>

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	15
1.1.1 <i>Objetivo Geral</i>	15
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i>	15
1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	16
1.3 A HISTÓRIA DO SORVETE.....	16
1.4 DADOS DE CONSUMO NACIONAL	17
1.5 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	19
CAPÍTULO 2: MÉTODOS DE PESQUISA.....	20
2.1 ESCOLHA DA EMPRESA	20
2.2 COLETA DE DADOS	20
2.3 FASES DA MODELAGEM E REALIZAÇÃO DE TESTES	20
CAPÍTULO 3: REVISÃO DA LITERATURA	22
3.1 CONCEITOS BÁSICOS E CARACTERÍSTICAS DO PROBLEMA DE DIMENSIONAMENTO DE LOTES.....	22
3.2 FORMULAÇÕES MATEMÁTICAS.....	26
3.2.1 <i>PROBLEMA DE DIMENSIONAMENTO DE LOTES CAPACITADO COM TEMPO DE SETUP</i>	27
3.2.2 <i>PROBLEMA INTEGRADO DE DIMENSIONAMENTO DE LOTES E SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO</i>	29
3.2.3 <i>PROBLEMA INTEGRADO DE DIMENSIONAMENTO E SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO COM TEMPOS DE SETUPS DEPENDENTES DA SEQUÊNCIA</i>	32
3.3 PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO EM FÁBRICAS DE SORVETES NA LITERATURA.....	35
CAPÍTULO 4: DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	36
4.1 APRESENTAÇÃO DA FÁBRICA	36
4.2 PROCESSO PRODUTIVO DO SORVETE DE MASSA.....	36
4.3 ANÁLISE DE CAPACIDADES E DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	37
4.3.1 <i>CAPACIDADE INSTALADA DE CADA PROCESSO</i>	37
4.3.2 <i>HIGIENIZAÇÃO</i>	39
4.3.3 <i>EXPEDIENTE DE TRABALHO</i>	40
CAPÍTULO 5: MODELAGEM MATEMÁTICA	41
CAPÍTULO 6: EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS	44
6.1 DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS UTILIZADOS.....	44
6.2 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	49
6.3 DESCRIÇÃO DETALHADA DA PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO	57

CAPÍTULO 7: CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

O ambiente competitivo das fábricas está se tornando cada vez mais disputado, fazendo com que a busca por melhorias no processo de gestão da produção se dê em várias iniciativas (YU; WRIGHT, 1997). A principal atividade do processo de gestão da produção é o Planejamento e Controle da Produção (PCP) (CORRÊA; GIANESI; CAON, 1997). O PCP é o setor responsável por garantir a continuidade da produção em uma fábrica, coordenar e administrar os recursos que estão disponíveis e que serão utilizados durante o processo produtivo, tomando decisões da maneira mais eficiente e eficaz possível (SLACK et al., 2002). A integração das funções de planejamento e controle têm grandes impactos na forma como uma fábrica atende seus clientes e ganha uma posição competitiva no mercado (VOLLMANN; BERRY; WHYBARK, 1993).

Segundo Anthony (1965), o PCP está dividido em três níveis de planejamento distintos: estratégico, tático e operacional. O Planejamento Estratégico trata da identificação e implementação de políticas adequadas para a realização das metas estratégicas de longo prazo. O Planejamento Tático é responsável pela utilização de forma eficiente dos recursos disponíveis, buscando satisfazer as estratégias definidas no nível superior (Planejamento Estratégico). Nesta etapa devem ser tomadas as decisões a médio prazo para satisfazer a demanda, levando-se em conta os custos envolvidos. Já o Planejamento Operacional trata das decisões do dia-a-dia da produção da fábrica, ou seja, são tomadas as decisões de curto prazo tendo como objetivo a implementação dos planos táticos elaborados no nível de Planejamento Tático.

É no Planejamento Tático/Operacional que são tomadas as decisões de quanto produzir de cada produto, a sequência e a programação em que os lotes de diferentes tipos de produtos serão produzidos em cada período. Antes do início da produção de um lote de determinado item, máquinas precisam ser preparadas (*setup*). O custo e o tempo de preparo das máquinas normalmente independem do tamanho do lote a ser produzido. Com isto, pode ser vantajoso produzir quantidades maiores que a demanda e estocar, ao invés de produzir um mesmo item por diversas vezes durante o horizonte de planejamento. Há também processos produtivos em que o preparo de máquina pode ser influenciado pela sequência da produção. Quando se tem *setups* dependentes da sequência produzida, a capacidade instalada verdadeiramente disponível para a produção dependerá tanto do

tamanho quanto do sequenciamento dos lotes de produção. O Problema de Dimensionamento de Lotes (*Lot-sizing Problem - LSP*) é uma importante ferramenta para auxiliar no processo decisório de quanto produzir em cada período.

O LSP consiste em um problema de otimização que defini a estratégia de utilização de uma determinada estrutura fabril para atendimento da demanda. As decisões envolvem quais itens serão produzidos, em quais quantidades e em quais períodos (ARAUJO; RANGEL, 2014).

Johnson e Montgomery (1974) descrevem que a constante variação da demanda de mercado e a criação de novos produtos criam a necessidade de se realizar continuamente o planejamento do sequenciamento da produção que, juntamente com o planejamento do dimensionamento dos lotes a serem produzidos, podem ter como objetivo minimizar os tempos de preparação e de ociosidade dos recursos, aumentando assim a produtividade. Desta forma, as fábricas que realizam um bom sequenciamento da produção conseguem alcançar resultados como: redução de custos com hora/homens, redução de atrasos de entrega de produtos, aumento da capacidade de produção, entre outros. O modelo GLSP, Problema de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes Geral (*General Lot-sizing and Scheduling Problem*) é comumente encontrado em processos industriais e estende o uso adicionando decisões de sequenciamento e programação. Entre os trabalhos que abordaram o problema integrado em ambientes industriais destacam-se Araujo et al. (2007), que abordaram o GLSP em fundições, Almada-Lobo et al. (2008), que investigaram o GLSP na produção de recipientes de vidro, Toso et al. (2008), que estudaram o GLSP em fábricas de suplementos para nutrição animal, Figueira et al. (2013), que investigaram o GLSP em fábrica papelreira, Toledo et al. (2012), que propuseram o GLSP em uma fábrica de refrigerantes e Baldo et al. (2014), que abordaram o GLSP em uma fábrica de cerveja.

O presente estudo tem como objetivo maximizar a produção do processo mais restritivo em uma fábrica de sorvetes, através da aplicação de uma adaptação do modelo matemático de otimização GLSPST (*General Lot sizing and Scheduling Problem with Sequence dependent Setup Times*) para uma máquina e múltiplos itens proposto por Meyr (2000). Assim como o modelo GLSP, este modelo trata da integração do problema de dimensionamento de lotes com o problema de sequenciamento da produção, porém com a diferença de que o tempo de *setup* passa a depender da sequência de produção dos

produtos, aumentando o desafio de desenvolvimento de acordo com as especificidades de cada fábrica. A empresa investigada apresenta as características pertinentes para aplicação do modelo GLSPST.

Zhu e Wilhelm (2006) revisam na literatura publicações que abordam problemas considerando o *setup* dependente da sequência, onde, mesmo ainda em quantidade inferior ao número de publicações quando comparado com o modelo GLSP, apontam um aumento de trabalhos recentes sobre o tema GLSPST, não sendo nenhum deles aplicado em fábricas de sorvete. Para modelagem com *setup* dependente da sequência, experimentos computacionais iniciais mostram que o modelo leva muito tempo para achar a solução ótima por métodos exatos.

A fábrica investigada neste trabalho enfrenta problemas para atender sua demanda, apresenta altos estoques para determinados produtos e nenhum estoque para outros, além de efetuar muitas higienizações que ocorrem obrigatoriamente entre algumas trocas entre sabores na linha de produção. O modelo adaptado explora o recurso com restrição de capacidade da fábrica em um horizonte de planejamento finito, dimensionando e sequenciando a produção de cada item de tal forma que o estoque permaneça entre os níveis mínimos e máximos desejados, e as demandas sejam atendidas. O estudo também leva em consideração a capacidade instalada e a capacidade de armazenamento total, caracterizando-se, dessa forma, como um problema capacitado envolvendo múltiplos itens.

1.1 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

1.1.1 Objetivo Geral

O Objetivo geral deste trabalho é propor uma abordagem de modelagem e solução para o problema de planejamento da produção de sorvetes, baseado na literatura, considerando a etapa mais restritiva do processo e visando a maximização da produção e o atendimento da demanda, respeitando-se as restrições do processo de produção.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- identificar a etapa mais restritiva do processo de produção da fábrica de sorvetes;

- propor uma modelagem matemática para o planejamento e programação da produção, a partir da adaptação do modelo GLSPST proposto na literatura, visando a maximização da produção e considerando as particularidades da fábrica investigada;
- validar o modelo proposto a partir de testes computacionais.

1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Embora o sorvete seja um produto de alto consumo, em pesquisa realizada na base de dados Scopus e Web of Science utilizando como palavras chave “*GLSPST*” e “*ice cream*”, verificou-se que não há relatos de estudos referentes ao planejamento e controle da produção em indústrias de sorvetes que utilizam o modelo GLSPST. Além disso, este trabalho traz o objetivo de aplicar uma adaptação do modelo GLSPST com o propósito de maximizar a produção do processo mais restritivo. Ademais, existe um aumento no número de publicações recentes tratando este modelo

1.3 A HISTÓRIA DO SORVETE

Muitos autores citam vários mitos sobre a história do sorvete relacionados a bebidas congeladas e gelo, que foram populares na Europa durante tempos medievais (MARSHALL; ARBUCKLE, 1996; SAWYER, 1969; TURNBOW et al., 1947). Entretanto, não existe uma descrição precisa, exceto que neve e gelo eram usados para resfriar e possibilitar o congelamento de sobremesas.

O sorvete chegou ao Brasil em 1834, quando dois comerciantes do Rio de Janeiro compraram gelo vindo dos Estados Unidos e fabricaram sorvetes com frutas tropicais. Atualmente, o mercado brasileiro de sorvetes está dividido entre os produtos industrializados e os fabricados em escala artesanal (SILVA; BOLINI, 2006).

Segundo a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), resolução RDC n. 266, o sorvete ou gelado comestível é “um produto alimentício obtido a partir de uma emulsão de gordura e proteínas, com ou sem adição de outros ingredientes e substâncias, ou de uma mistura de água, açúcares e outros ingredientes e substâncias que tenham sido submetidas ao congelamento, em condições tais que garantam a conservação do produto no estado congelado ou parcialmente congelado, durante a armazenagem, o transporte e a entrega ao consumo”.

Também segundo a ANVISA, portaria nº 379, de 26 de abril de 1999, os gelados comestíveis podem ser classificados em:

a) Sorvetes de massa ou cremosos: compostos basicamente de leite e derivados lácteos e/ou outras matérias primas alimentares, nos quais os teores de gordura e/ou proteína são totalmente ou parcialmente de origem não láctea, contendo no mínimo 3% de gordura e 2,5% de proteínas, podendo ser adicionados outros ingredientes alimentares em sua composição.

b) *Sherbets* - são os produtos elaborados basicamente com leite e ou derivados lácteos ou outras matérias-primas alimentares e que contêm uma pequena porção de proteína e gordura, as quais podem ser totais ou parcialmente de origem não láctea, contendo no mínimo 1% de gordura e 1% de proteína;

c) *Sorbets* - produto elaborado basicamente com polpa de fruta, sucos ou pedaços de frutas e açúcares;

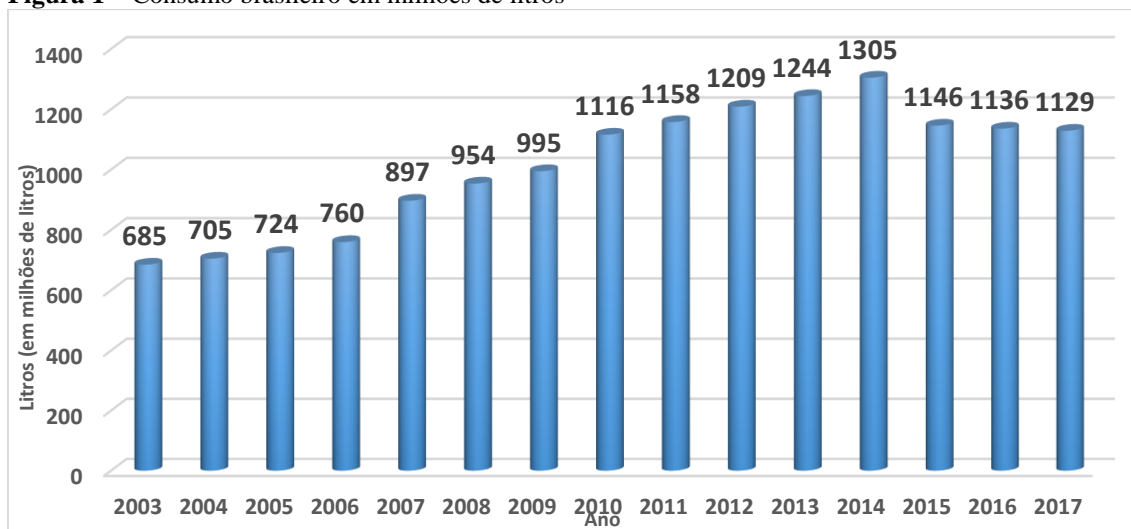
d) Picolés - são porções individuais de gelados comestíveis de várias composições, geralmente suportadas por uma haste, obtida por resfriamento até o congelamento da mistura homogênea ou não, de ingredientes alimentares, com ou sem batimento.

De acordo com a normas da ANVISA, o sorvete deve ser mantido a uma temperatura máxima de armazenamento de -18°C , a qual deve ser medida no produto. Quando o produto é exposto à venda, é tolerada a temperatura de -12°C no produto.

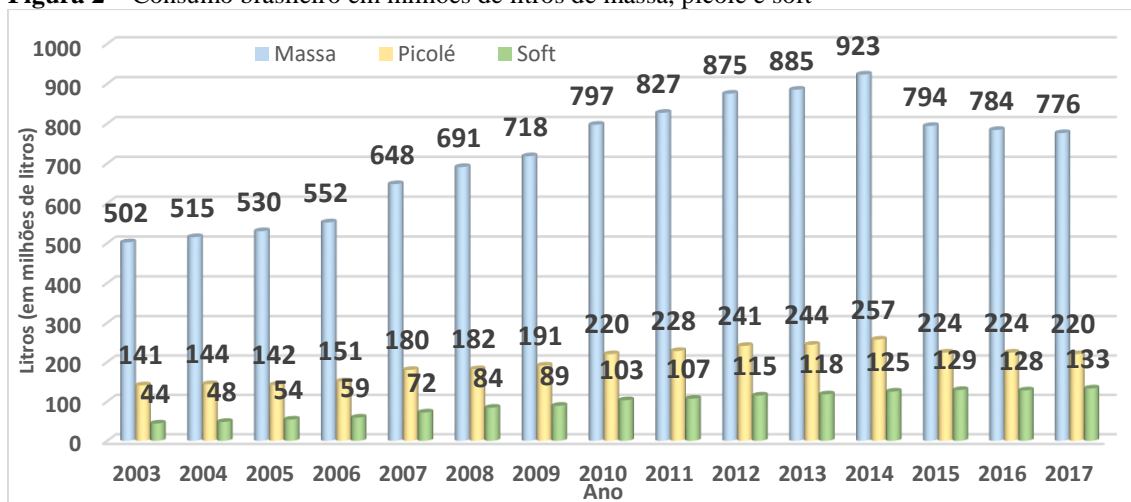
1.4 DADOS DE CONSUMO NACIONAL

A Figura 1 apresenta o consumo do mercado em milhões de litros, a Figura 2 apresenta o consumo por pessoa em litros por ano e a Figura 3 apresenta o consumo em milhões de litros, divididos em massa, picolé e *soft* (sorvete de máquina). Os dados são referentes ao mercado brasileiro.

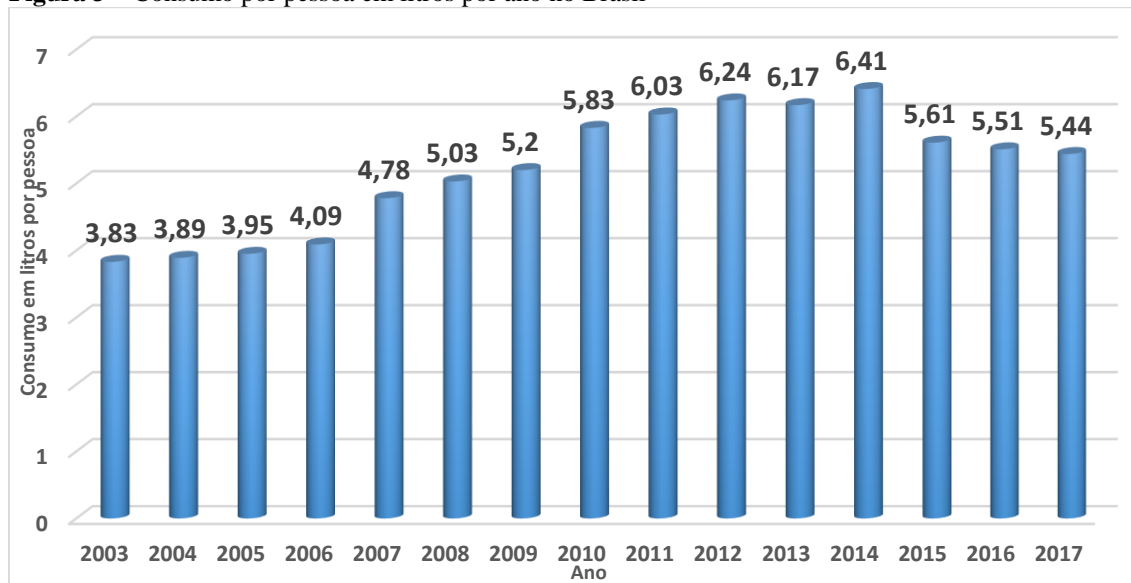
Nota-se, pelos gráficos, que o consumo cresceu por 11 anos seguidos, porém, em 2014 começou a diminuir. Além disso, os gráficos também mostram que o sorvete de massa é o mais consumido.

Figura 1 – Consumo brasileiro em milhões de litros

Fonte: Elaborado pelo autor com dados extraídos da Associação Brasileira das Indústrias e do Setor de Sorvete (ABIS).

Figura 2 – Consumo brasileiro em milhões de litros de massa, picolé e soft

Fonte: Elaborado pelo autor com dados extraídos da Associação Brasileira das Indústrias e do Setor de Sorvete (ABIS).

Figura 3 – Consumo por pessoa em litros por ano no Brasil

Fonte: Elaborado pelo autor com dados extraídos da Associação Brasileira das Indústrias e do Setor de Sorvete (ABIS).

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Esta dissertação foi organizada em 7 capítulos, como descrito a seguir.

No Capítulo 2 é apresentado o método de pesquisa, escolha da empresa, coleta de dados e fases da modelagem. No capítulo 3 é apresentado uma revisão literatura. No Capítulo 4 é apresentado a definição do problema, a empresa investigada, além de ser demonstrando o processo produtivo do sorvete e das capacidades instaladas para cada processo produtivo para definição do mais restritivo. No Capítulo 5 é apresentado a modelagem matemática com a proposta de adaptação do modelo GLSPST. No capítulo 6 é apresentado a definição das classes, os dados de entrada e os resultados numéricos obtidos. Por fim, no Capítulo 7 são apresentadas as conclusões.

CAPÍTULO 2: MÉTODOS DE PESQUISA

A estratégia de pesquisa utilizada para condução do trabalho foi o estudo de caso. As fases envolvidas neste processo são:

2.1 ESCOLHA DA EMPRESA

A escolha da empresa foi definida pela proximidade geográfica do pesquisador, além de ter pessoas conhecidas trabalhando na mesma, o que facilitou na abordagem. A abordagem inicial foi feita através de uma reunião pré-agendada, com o intuito de explicar a direção da empresa os objetivos do trabalho bem como os ganhos que poderiam trazer para a organização.

2.2 COLETA DE DADOS

Para coletar os dados, foram realizadas visitas na empresa. As entrevistas foram realizadas com o Diretor Industrial e com o Diretor Comercial em suas respectivas salas. Dúvidas após as entrevistas foram tiradas por um aplicativo de comunicação.

Visitas ao ambiente produtivo também foram realizadas, todavia, nenhum dado pôde ser capturado diretamente, sendo todos eles fornecidos pelos próprios diretores. Estes dados são apresentados e discutidos, onde os valores de cada um são explicados detalhadamente analisando a sua veracidade e compatibilidade.

2.3 FASES DA MODELAGEM E REALIZAÇÃO DE TESTES

O modelo utilizado como base foi o GLSPST proposto por Meyr (2000), sendo inicialmente implementado em sua originalidade utilizando o solver CPLEX 12.6. Testes foram realizados utilizando os mesmos dados de entrada que seriam posteriormente utilizados no modelo adaptado, analisando os resultados para validar a implementação. Em seguida o modelo recebeu as adaptações propostas, incluindo as restrições de estoque e de capacidade de armazenamento, bem como restrições de lotes mínimos de produção. A função objetivo também foi alterada, para, ao invés de minimizar custos, maximizar a produção no processo mais restritivo da fábrica investigada.

Já com o modelo devidamente adaptado, foram realizados testes com 5 e 10 sabores e variação dos dados de entrada conforme a definição das classes que são apresentadas no Capítulo 6. Os resultados são apresentados na Seção 6.1 e uma programação detalhada é apresentada na Seção 6.2

Previamente pode-se concluir que o modelo atinge o objetivo de maximizar a produção do processo mais restritivo, e, além disso, apresenta uma condição de programação da produção dentro de um horizonte de planejamento bastante organizada, certamente gerando grandes ganhos para a fábrica investigada.

CAPÍTULO 3: REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os conceitos básicos de modelagem matemática, modelos clássicos da literatura utilizados para desenvolver o modelo proposto neste trabalho que abordam os problemas de dimensionamento de lotes e de sequenciamento da produção, e a integração entre eles. Por fim, será apresentada também uma revisão de trabalhos que abordaram planejamento e programação da produção propostas em fábricas de sorvetes.

3.1 CONCEITOS BÁSICOS E CARACTERÍSTICAS DO PROBLEMA DE DIMENSIONAMENTO DE LOTES

De modo geral, a partir dos vários artigos presentes na literatura, tanto os que a revisam, quanto os que tratam sobre um problema em específico, podem-se diferenciar os vários tipos de formulações e abordagens, principalmente pelos objetos e seus dados, envolvidos na modelagem. Karimi, Fatemi e Wilson (2003) sintetizam tais objetos e dados e citam que suas características influenciam a complexidade de resolução do problema e, por consequência, o tempo para obtenção de uma solução ótima. Os objetos e dados abordados pelos autores estão enumerados e descritos a seguir. Além disso, são descritas características que cada objeto pode assumir dependendo do problema que se quer tratar.

1) Produtos: são os itens finais que se deseja determinar quanto, onde e quando deve ser produzido. Normalmente são referenciados como famílias de produtos:

- Quantidade: as atividades de uma fábrica podem se organizar para produzir apenas um item final, ou diversos itens. Karimi, Fatemi e Wilson (2003) ressaltam que os modelos com vários itens são mais complexos que os modelos com apenas um item. Os trabalhos presentes na literatura abrangem vastamente ambos os modelos.

- Perecibilidade: quando os produtos envolvidos no problema possuem prazo de validade relativamente curto, ou se deterioram com o passar do tempo a formulação deve envolver restrições que estipulem um período máximo de armazenagem. Respeitar os prazos de validade são de extrema importância, tanto para produção quanto para venda. A produção deve saber coordenar o período de

armazenagem com precisão para que não perca seus ativos de estoque nem disponibilize produtos vencidos ao mercado.

2) Máquinas: com relação aos tipos de máquinas as seguintes características podem ser extraídas dos problemas da literatura:

- Quantidade: os trabalhos presentes na literatura tratam tanto de problemas envolvendo apenas uma máquina, conforme presente em Toso e Morabito (2005), como casos de várias máquinas, presente em Meyr (2002).

- Característica: as máquinas podem ser idênticas, como em Quadt e Kuhn (2009), ou distintas, como em Meyr (2002), que implica taxas de produção diferentes.

3) Demanda: segundo Karimi, Fatemi e Wilson (2003), a demanda é considerada um dado de entrada para o modelo do problema. A demanda estática significa que seu valor não muda com o tempo, é estacionário ou mesmo constante, enquanto a demanda dinâmica significa que seu valor muda com o tempo. Se o valor da demanda é conhecido antecipadamente (estático ou dinâmico), é denominado determinístico, mas se não é conhecido exatamente e os valores de demanda que ocorrem são baseados em algumas probabilidades, então é denominado probabilístico.

A maioria dos trabalhos presentes na literatura tratam de problemas que consideram a demanda dinâmica e determinística. Karimi, Fatemi e Wilson (2003) deixam claro que a resolução de problemas envolvendo demandas dinâmicas ou dependentes são mais complexos que demandas estacionárias ou independentes. O mesmo acontece com a complexidade de problemas com demanda probabilística em relação aos de demanda determinística.

4) Não atendimento de pedidos: diz respeito a indisponibilidade de produtos para atender certa quantidade de demanda. Quando é permitido que tal parcela da demanda seja atendida posteriormente a data estipulada, diz que há um *backorder*, caso a demanda não seja atendida há uma venda perdida. Para ambos os casos tais ocorrências são representadas por penalizações na função objetivo.

Karimi, Fatemi e Wilson (2003) consideram que a permissão dessa indisponibilidade de produtos afeta a complexidade da resolução do modelo. Ferreira, Morabito e Rangel (2008), Kawamura e Ronconi (2010), Mateus et al. (2009), Quadt e

Kuhn (2009) são trabalhos que versam sobre a permissão de atrasos de entrega ou de não atendimento de parcela da demanda.

5) Horizonte de planejamento: o horizonte de planejamento pode ser finito ou infinito. Modelos com um horizonte de planejamento infinito geralmente assumem uma taxa de demanda constante, como o clássico *Economic Order Quantity* (EOQ). Exemplos de trabalhos que utilizam o horizonte de planejamento finito aparecem em Wagner & Whitin (1958) e Trigeiro et al. (1989).

De acordo com Suerie (2005), o horizonte de planejamento pode ser grande (*big-bucket*) ou pequeno (*small-bucket*). A distinção entre problemas *big-bucket* e *small-bucket* está relacionada ao tamanho do período e ao lote de produção dos itens. Nos problemas *small-bucket* é geralmente assumido que em cada período somente um, ou no máximo dois lotes de produtos podem ser produzidos, sendo assim, no máximo um *setup* é permitido. Logo, os problemas *small-bucket* integram decisões de dimensionamento de lotes e programação da produção, ou seja, não somente determinam o tamanho dos lotes, mas também a sequência em que a produção ocorre. Por conseguinte, os problemas *big-bucket* permitem produção de vários lotes de produtos em cada período de tempo, podendo (ou não) fazer asserção a respeito da sequência da produção dentro do período.

6) Capacidade: diz respeito a todo recurso, desde horas de mão-de-obra, equipamentos, máquinas, capital entre outros. Quando limitada, ou escassa, o problema é chamado de capacitado. Quando tais recursos não apresentam nenhum tipo de limitação, o problema é classificado como não capacitado. Pochet e Wolsey (2006) explicam que o problema pode ser capacitado, mas pode haver flexibilidade dos recursos para aumento incremental de capacidade conforme a necessidade e a qualquer momento. Neste caso é mais adequado considerar o problema como não capacitado.

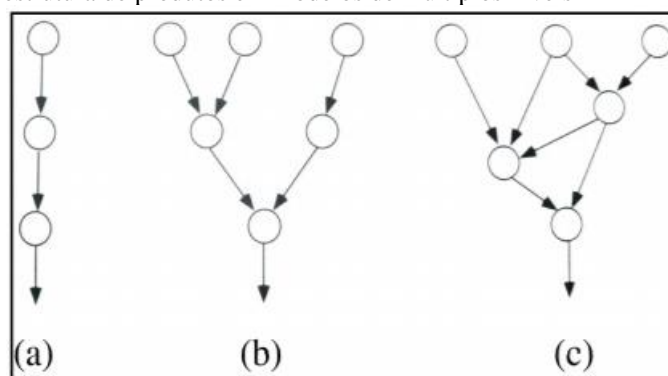
A maioria dos trabalhos acadêmicos trata de problemas capacitados. Geralmente a capacidade limitada em questão é relacionada com a disponibilidade de máquina. No entanto, alguns trabalhos envolvem a capacidade de tempo disponível para que a força de trabalho realize suas atividades, como nos problemas de Toso e Morabito (2005), e conforme presente em Hax e Candea (1983) e Arenales et al. (2007).

Karimi, Fatemi e Wilson (2003) ressaltam que a resolução de problemas envolvendo capacidades limitadas são mais complexas que os problemas que não lidam com tal restrição.

7) Níveis de produção: são classificados como sistemas de único nível os sistemas de produção que envolvem a transformação direta da matéria-prima em produtos acabados, sem haver etapas intermediárias de montagem de componentes ou produtos semiacabados e, neste caso, tem-se demanda independente. Quando o sistema de produção é de múltiplos níveis, os dados de entrada para um nível dependem dos valores de saída do nível anterior, dessa forma a demanda é dependente (POCHET; WOLSEY, 2006).

A dependência entre itens é modelada pela estrutura de produto ou árvore de material. Pochet e Wolsey (2006) pontuam que tal estrutura pode ser classificada em sequencial (a), montagem (b) ou geral (c), conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Tipos de estrutura de produtos em modelos de múltiplos níveis



Fonte: Adaptado de Pochet e Wolsey (2006))

Karimi, Fatemi e Wilson (2003) enfatizam que a resolução de problemas com múltiplos níveis de produção (Figura 4 (b) e (c)) é mais difícil computacionalmente do que os problemas com apenas um nível (Figura 4 (a)).

8) Estrutura de *setup*: normalmente, a troca de produção entre produtos diferentes pode resultar em tempo de configuração e custo de configuração ou, *setup*. O *setup* é outra característica importante que afeta a complexidade do problema. Existem dois tipos de estrutura de *setup*: estrutura de *setup* simples e estrutura de *setup* complexa. Se o tempo de preparação e o custo em um período forem independentes da sequência e das decisões em períodos anteriores, ele será denominado uma estrutura de configuração simples, mas quando depender da sequência ou dos períodos anteriores, será denominado uma configuração complexa (KARIMI; FATEMI; WILSON, 2003)

Karimi, Fatemi e Wilson (2003) explicam que considerar tempos de *setup* inclui variáveis binárias na formulação matemática do problema. Estas variáveis indicam a troca de produção entre dois produtos diferentes. A introdução dessas variáveis binárias no problema torna o modelo matemático mais custoso computacionalmente.

De acordo com Drexl e Kimms (1997) e Karimi, Fatemi e Wilson (2003), os primeiros estudos de problemas de dimensionamento de lotes ocorreram com o *Economic Order Quantity* (EOQ), que determina a quantidade de produção para um item individual, sem restrições de capacidade, e demanda constante ao longo de um horizonte de planejamento infinito. Como tais suposições eram muito restritivas, face aos problemas da realidade, outros modelos foram desenvolvidos incluindo as restrições de capacidade para a produção de vários itens. Mesmo com apenas essas mudanças o problema já era considerado NP-difícil, ou seja, não se pode esperar encontrar um algoritmo que gere uma solução ótima a tempos computacionais razoáveis (QUADT; KUHN, 2009).

A próxima mudança considerada foi a suposição de demanda dinâmica e horizonte finito do modelo de Wagner e Whitin (1958), mas que voltava a considerar a capacidade ilimitada. Dessa forma, as abordagens de demanda dinâmica com restrições de capacidade continuavam a instigar a comunidade acadêmica.

3.2 FORMULAÇÕES MATEMÁTICAS

Os sistemas de planejamento da produção se inserem em um contexto de crescente sofisticação, a fim de aumentar tanto a produtividade, quanto a flexibilidade das operações, conforme tratado em Pochet e Wolsey (2006).

No que tange ao problema integrado de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção, pode-se dizer que as formulações matemáticas também estão acompanhando tal evolução em termos de sofisticação, cada vez mais tentando inserir nos modelos matemáticos as características e restrições dos problemas reais encontrados na indústria.

Os problemas abordados pela pesquisa operacional devem ser inicialmente modelados para posterior resolução. Pochet e Wolsey (2006) citam que a fase de modelagem tem o objetivo de descrever matematicamente o problema a ser resolvido. Os elementos constituintes do modelo são: objetos manipulados (produtos, máquinas, equipes, etc.), dados associados aos objetos (demanda, capacidade, etc.), decisões

(elemento expresso pelas variáveis de decisão), restrições (que devem ser respeitadas pelas decisões) e a função objetivo (que avalia as soluções disponíveis).

Estão apresentados nas seções a seguir as características do problema de dimensionamento de lotes seguidos das formulações dos modelos presentes na literatura que serão utilizados para desenvolvimento do modelo proposto neste trabalho.

3.2.1 PROBLEMA DE DIMENSIONAMENTO DE LOTES CAPACITADO COM TEMPO DE SETUP

O problema de dimensionamento de lotes pode ser definido como um problema de programação da produção que consiste em determinar o tamanho dos lotes de produção de cada produto a ser produzido em uma ou mais máquinas, em cada período ao longo do horizonte de planejamento finito, de forma que se atenda a demanda com o menor custo possível.

Em geral os modelos de dimensionamento de lotes podem ser classificados quanto ao número de itens (único item como ou múltiplos itens), máquinas (única máquina ou várias máquinas), estágios (mono estágio ou múltiplos estágios).

Trigeiro et al., (1989) apresenta o problema conhecido na língua inglesa por *Capacitated Lot Sizing Problem* (CLSP). Os autores pontuam que esta formulação é uma extensão do modelo de Wagner e Whitin (1958), mas que considera a capacidade disponível da máquina. No entanto, as decisões de sequenciamento não estão integradas a este modelo. Este modelo é apresentado a seguir e é caracterizado por ser de múltiplos itens, mono estágio, capacitado e com *setups*.

Conjuntos

J : produtos;

T : número de períodos do horizonte de planejamento;

Parâmetros

d_{jt} : demanda do produto j no período t ;

h_{jt} : custo de manter uma unidade em estoque do produto j no período t ;

p_{jt} : custo de produção do produto j no período t ;

- c_{jt} : custo de *setup* do produto j no período t ;
 a_j : capacidade necessária para produzir uma unidade do produto j ;
 s_j : tempo de *setup* de máquina para o produto j ;
 K_t : Capacidade de produção no período t ;
 B : número suficientemente grande;

Variáveis de decisão

- x_{jt} : quantidade do produto j produzida no período t ;
 I_{jt} : estoque do produto j no fim do período t ;
 y_{jt} : $\begin{cases} 1, & \text{se ocorre } \textit{setup} \text{ do produto } j \text{ do período } t, \\ 0, & \text{caso contrário;} \end{cases}$

O modelo matemático

$$\text{Minimizar} \quad \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} h_{jt} I_{jt} + \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} p_{jt} x_{jt} + \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} c_{jt} y_{jt} \quad (2.1)$$

Sujeito a:

$$x_{jt} + I_{j,t-1} - I_{jt} = d_{jt}, \forall j \in J, \quad \forall t \in T \quad (2.2)$$

$$\sum_{j \in J} a_j x_{jt} + \sum_{j \in J} s_j y_{jt} \leq K_t, \quad \forall t \in T \quad (2.3)$$

$$x_{jt} \leq B y_{jt}, \forall j \in J, \quad \forall t \in T \quad (2.4)$$

$$I_{jt}, x_{jt} \geq 0; y_{jt} \in \{0, 1\}, \forall j \in J, \quad \forall t \in T \quad (2.5)$$

A função objetivo (2.1) minimiza os custos de produção e *setup* e estoque. O conjunto de restrições (2.2) fazem o balanceamento de estoques. O conjunto de restrições (2.3) são restrições de capacidade que garante que a soma dos tempos de produção dos

produtos no período t , mais os tempos de *setup*, será menor que a capacidade disponível no período t . O conjunto de restrições (2.4) garantem que se a máquina não estiver preparada para produzir o item j no período t , a produção será nula. As restrições (2.5) impõe a não negatividade das variáveis e define y_{jt} como variável binária.

3.2.2 PROBLEMA INTEGRADO DE DIMENSIONAMENTO DE LOTES E SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO

Conforme já mencionado anteriormente, o problema de dimensionamento de lotes consiste em dimensionar quais itens serão produzidos em cada período e suas quantidades. Dimensionar os lotes incorretamente pode acarretar pedidos não atendidos e excesso de produto acabado em estoque, por exemplo.

Já o problema de sequenciamento destes lotes tem por objetivo determinar em que ordem os lotes devem ser produzidos e em quais máquinas, alocando da melhor maneira os recursos por vezes escassos. Sequenciar as tarefas tende a garantir o atendimento dos pedidos no prazo correto e balancear os estoques, além de melhorar a gestão dos recursos envolvidos na produção, conforme ressalta Pinedo (2002).

O problema integrado de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção consiste em determinar simultaneamente a quantidade a ser produzida, em qual máquina, em qual momento e em cada período. Essas três decisões devem ser tomadas simultaneamente.

De forma geral, o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes envolve decisões por vezes contrárias. Pochet e Wolsey (2006) ressaltam que decidir produzir um grande lote para que haja uma diluição dos custos de *setup*, afeta os custos relacionados à armazenagem destes produtos. Por outro lado, decidir produzir lotes menores para incorrer menores custos de estocagem, faz o custo de *setup* ser maior por unidade de produto.

O problema integrado de dimensionamento e sequenciamento tem sido alvo de vários estudos, como por exemplo os de Fleischmann e Meyr (1997), Salomon et al. (1997), Luche et al. (2009), Toledo et al. (2009), Lang e Shen, (2011), Meyr e Mann (2013), Santos e Almada-Lobo (2012), Seeanner et al. (2013).

Outros trabalhos envolvem a adaptação de modelos presentes na literatura a problemas reais, buscando obter a melhor solução possível, seja por métodos exatos de

resolução, seja pela aplicação de heurísticas e meta-heurísticas. Toso e Morabito (2005), Ferreira, Morabito e Rangel (2008), Meyr (2000), Meyr (2002), Beraldi et al. (2008) são alguns trabalhos.

A seguir é apresentado o modelo GLSP, Problema de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes Geral (*General Lot-sizing and Scheduling Problem*) proposto por Fleishmann e Meyr (1997) caracterizado como um modelo *big bucket* onde os períodos (macro períodos) são divididos em períodos menores (subperíodos ou número de preparos do período), e nos subperíodos apenas um item pode ser produzido por vez.

Conjuntos

J : produtos;

T : número de períodos do horizonte de planejamento;

S_t : conjunto dos subperíodos do período t ;

Parâmetros

d_{jt} : demanda do produto j no período t ;

h_{jt} : custo de manter uma unidade em estoque do produto j no período t ;

c_{ij} : custo de troca do produto i para o produto j ;

a_j : capacidade necessária para produzir uma unidade do produto j ;

min_j : lote mínimo de produção do item j ;

K_t : Capacidade de produção no período t ;

B : número suficientemente grande;

Variáveis de decisão

x_{js} : quantidade do produto j produzida no subperíodo s ;

I_{jt} : estoque do produto j no fim do período t ;

y_{js} : $\left\{ \begin{array}{l} 1, \text{ se ocorre } \textit{setup} \text{ do produto } j \text{ do subperíodo } s, \\ 0, \text{ caso contrário;} \end{array} \right.$

z_{ijs} : $\left\{ \begin{array}{l} 1, \text{ se há troca do produto } i \text{ para o } j \text{ no subperíodo } s, \\ 0, \text{ caso contrário;} \end{array} \right.$

O modelo matemático

$$\text{Minimizar} \quad \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} h_{jt} I_{jt} + \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} c_{ij} z_{ijs} \quad (2.6)$$

Sujeito a:

$$\sum_{s \in S_t} x_{js} + I_{j,t-1} - I_{jt} = d_{jt}, \forall j \in J, \quad \forall t \in T \quad (2.7)$$

$$\sum_{j \in J, s \in S_t} a_j x_{js} \leq K_t, \quad \forall t \in T \quad (2.8)$$

$$x_{js} \leq B y_{js}, \forall j \in J, \quad \forall s \in S \quad (2.9)$$

$$x_{js} \geq \min_j (y_{js} - y_{j,s-1}), \forall j \in J, \quad \forall s \in S \quad (2.10)$$

$$\sum_{j \in J} y_{js} = 1, \quad \forall s \in S \quad (2.11)$$

$$z_{ijs} \geq y_{i,s-1} + y_{js} - 1, \forall j \in J, \quad \forall s \in S \quad (2.12)$$

$$I_{jt}, x_{js}, z_{ijs} \geq 0; y_{js} \in \{0, 1\}, \forall j \in J, \quad \forall t \in T, s \in S_t \quad (2.13)$$

A função objetivo (2.6) minimiza os custos de estoque e troca de itens. O conjunto de restrições de balanceamento de estoques dado por (2.7). Observe que a produção do período é a soma da produção de cada subperíodo. O conjunto de restrições (2.8) são as restrições de capacidade e (2.9) são as restrições de preparo de máquina. O conjunto de restrições (2.10) são as restrições de produção de lotes mínimos. Neste modelo é exigido que a máquina esteja preparada para um e apenas um item em cada subperíodo, o que é garantido pelo conjunto de restrições (2.11). O conjunto de restrições (2.12) garantem que

as trocas de itens entre os subperíodos serão contadas. O conjunto de restrições (2.13) é a restrição de não negatividade das variáveis, e define y_{js} como variável binária.

Observe que a variável z_{ijs} de troca não foi definida como binária, isto porque a restrição de troca e o fato dela estar na função objetivo implicam que esta variável assumirá valor 1 apenas se houve troca do item i para j , ou seja, se as duas variáveis de preparo forem iguais a 1, caso contrário ela assume valor 0.

3.2.3 PROBLEMA INTEGRADO DE DIMENSIONAMENTO E SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO COM TEMPOS DE *SETUPS* DEPENDENTES DA SEQUÊNCIA

Foram apresentados anteriormente o modelo *Capacitated Lot Sizing Problem* (CLSP) de Trigeiro et al., (1989) que trata apenas do problema de dimensionamento de lotes, e o modelo *General Lot-sizing and Scheduling Problem* (GLSP) proposto por Fleishmann e Meyr (1997) que trata da integração do problema de dimensionamento de lotes com o problema de sequenciamento da produção, ambos para uma máquina e múltiplos itens.

Meyr (2000) apresenta o GLSPST (*General Lot sizing and Scheduling Problem with Sequence dependent Setup Times*) para uma máquina e múltiplos itens. Este modelo trata da integração do problema de dimensionamento de lotes com o problema de sequenciamento da produção com tempo de *setup* dependendo da sequência. Toso, Morabito e Clark (2009) apresentam um problema proposto na indústria de ração animal considerando tempos de *setup* dependentes da sequência. O modelo de Meyr (2000) é apresentado a seguir.

Conjuntos

J : produtos;

T : número de períodos do horizonte de planejamento;

S_t : conjunto dos subperíodos do período t ;

Parâmetros

d_{jt} : demanda do produto j no período t ;

- h_{jt} : custo de manter uma unidade em estoque do produto j no período t (por unidade e por macro período);
 c_{ij} : custo de troca do produto i para o produto j ;
 s_{ij} : tempo de *setup* da máquina para troca do produto i para o produto j ;
 a_j : capacidade necessária para produzir uma unidade do produto j (tempo);
 min_j : lote mínimo de produção do item j (unidades);
 K_t : capacidade de produção no período t (tempo);
 I_{j0} : estoque inicial do produto j no início do horizonte de planejamento (unidades);
 B : número suficientemente grande;

Variáveis de decisão

x_{js} : quantidade do produto j produzida no subperíodo s ;

I_{jt} : estoque do produto j no fim do período t ;

y_{js} : $\begin{cases} 1, & \text{se ocorre } \textit{setup} \text{ do produto } j \text{ do subperíodo } s, \\ 0, & \text{caso contrário;} \end{cases}$

z_{ijs} : $\begin{cases} 1, & \text{se há troca do produto } i \text{ para o } j \text{ no subperíodo } s, \\ 0, & \text{caso contrário;} \end{cases}$

O modelo matemático

$$\text{minimizar} \quad \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} h_{jt} I_{jt} + \sum_{j \in J} \sum_{s \in S_t} c_{ij} z_{ijs} \quad (2.14)$$

Sujeito a:

$$\sum_{s \in S_t} x_{js} + I_{j,t-1} - I_{jt} = d_{jt}, \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (2.15)$$

$$\sum_{j \in J, s \in S_t} a_j x_{js} + \sum_{i \in I, j \in J, s \in S_t} s_{ij} z_{ijs} \leq K_t, \forall t \in T \quad (2.16)$$

$$x_{js} \leq B y_{js}, \quad \forall j \in J, \forall s \in S \quad (2.17)$$

$$x_{js} \geq \min_j (y_{js} - y_{j,s-1}), \quad \forall j \in J, \forall s \in S \quad (2.18)$$

$$\sum_{j \in J} y_{js} = 1, \quad \forall s \in S \quad (2.19)$$

$$z_{ijs} \geq y_{i,s-1} + y_{js} - 1, \quad \forall j \in J, \forall s \in S \quad (2.20)$$

$$I_{jt}, x_{js}, z_{ijs} \geq 0; y_{js} \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in J, \forall t \in T, s \in S_t \quad (2.21)$$

A função objetivo (2.14) minimiza a somatória do custo de estoque mais o custo de *setups* dependentes da sequência. As restrições de balanceamento de estoque (2.15) junto com $I_{jt} \geq 0$ garantem que a demanda seja atendida. O conjunto de restrições (2.16) são as restrições de capacidade (tempo) e (2.17) são as restrições de preparo de máquina, que juntamente com (2.19) garantem que apenas um item é produzido em um subperíodo e que o item é produzido apenas quando a máquina está configurada para o respectivo produto. O conjunto de restrições (2.18) garantem a produção de lotes mínimos. O conjunto de restrições (2.20) garantem que as trocas de itens entre os subperíodos serão contadas. O conjunto de restrições (2.21) é a restrição de não negatividade das variáveis, e define y_{js} como variável binária.

A principal diferença entre os modelos GLSP e GLSPST consiste na inclusão da matriz de dados s_{ij} que demonstra o tempo necessário para a preparação de máquina para

trocar a produção do produto i para o produto (tempo de *setup*). No modelo GLSPST esta matriz é multiplicada no conjunto de restrições (2.16) pela variável z_{ijs} .

3.3 PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO EM FÁBRICAS DE SORVETES NA LITERATURA

No que tange a fábricas de sorvetes, Bongers et al. (2006) utilizam um *software* chamado INFOR para propor a programação da produção em uma fábrica de sorvetes para uma semana. Wari et al (2016) utilizaram o modelo de Bongers et al. (2006) e transformaram para múltiplas semanas.

Kopanos et al. (2011) desenvolveram um modelo de programação inteira mista para solucionar problemas de agendamento de produção em indústrias alimentares de multiproduto. O modelo foi testado em uma fábrica de sorvetes com o objetivo de redução de custos.

Gunn et al. (2014) trabalharam com modelos de médio, curto e longo prazo para um planejamento de produção hierárquica em um processo contínuo de produção em lote.

CAPÍTULO 4: DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Neste capítulo serão apresentadas informações sobre a fábrica investigada seguidos pela descrição do processo produtivo do sorvete de massa e por uma análise das capacidades da fábrica para identificação da etapa de produção mais restritiva (gargalo).

4.1 APRESENTAÇÃO DA FÁBRICA

A fábrica estudada, fundada em 1986, possui instalações que contemplam uma ampla câmara frigorífica para o armazenamento de sorvetes, além de modernos equipamentos para todos os processos de produção.

Está localizada no interior do estado de São Paulo, e, em termos de produção, envasa mais de 2 milhões de litros de sorvetes de massa por ano.

4.2 PROCESSO PRODUTIVO DO SORVETE DE MASSA

O sorvete de massa é basicamente composto por uma calda base comum para todos os sabores. Essa calda base é homogeneizada e resfriada através de trocadores de calor e posteriormente são colocadas em tanques de maturação (saborização). Na fábrica estudada existem diversos tanques de maturação. Após maturada, a calda base já saborizada entra na linha de produção de produtora contínua, incorporadora e envase. Todas as etapas são descritas a seguir e suas respectivas capacidades serão apresentadas na Seção 4.3.1.

- Pasteurização

O processo produtivo se inicia com a separação dos ingredientes, sendo leite gelado, açúcar e matérias-primas nobres. Estes ingredientes são inseridos nos tanques de pasteurização e formam a calda base. A calda base é obtida após a mistura atingir a temperatura de 80°C.

- Homogeneização

A calda base produzida nos tanques de pasteurização é homogeneizada através de uma bomba homogeneizadora. A etapa de homogeneização consiste em aplicar uma pressão na calda, quebrando, por exemplo, um grão de açúcar em 2.000 partículas.

- Resfriamento e troca de calor

Esta etapa consiste em realizar a troca de calor entre a calda base e o leite gelado, sem contato direto. A temperatura inicial da calda base pronta é 80°C e do leite gelado é de 4°C. Ou seja, após a primeira calda ser produzida e homogeneizada, o segundo tanque de pasteurização entra em funcionamento já com o leite a aproximadamente 35°C. Portanto, a primeira pasteurização do dia demora mais que as demais.

- Maturação

A etapa de maturação consiste em saborizar a calda base. Neste processo, o volume da mistura aumenta em 80%.

- Produtora Contínua

Nesta etapa, a calda depois de maturada (saborizada), é transformada em sorvete, adquirindo uma consistência firme.

- Incorporadora

Esta etapa consiste em adicionar os recheios sólidos no sorvete. Por exemplo, se o sorvete é de maracujá, é adicionado polpa de maracujá. Nesta etapa, o sorvete não aumenta de volume, aumentando apenas o seu peso. Como o sorvete de massa é comercializado pelo volume na fábrica investigada, esta informação não será levada em consideração.

- Envase

O envase é a etapa final do processo de produção, no qual o sorvete pronto é colocado dentro do pote de 2 litros.

4.3 ANÁLISE DE CAPACIDADES E DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

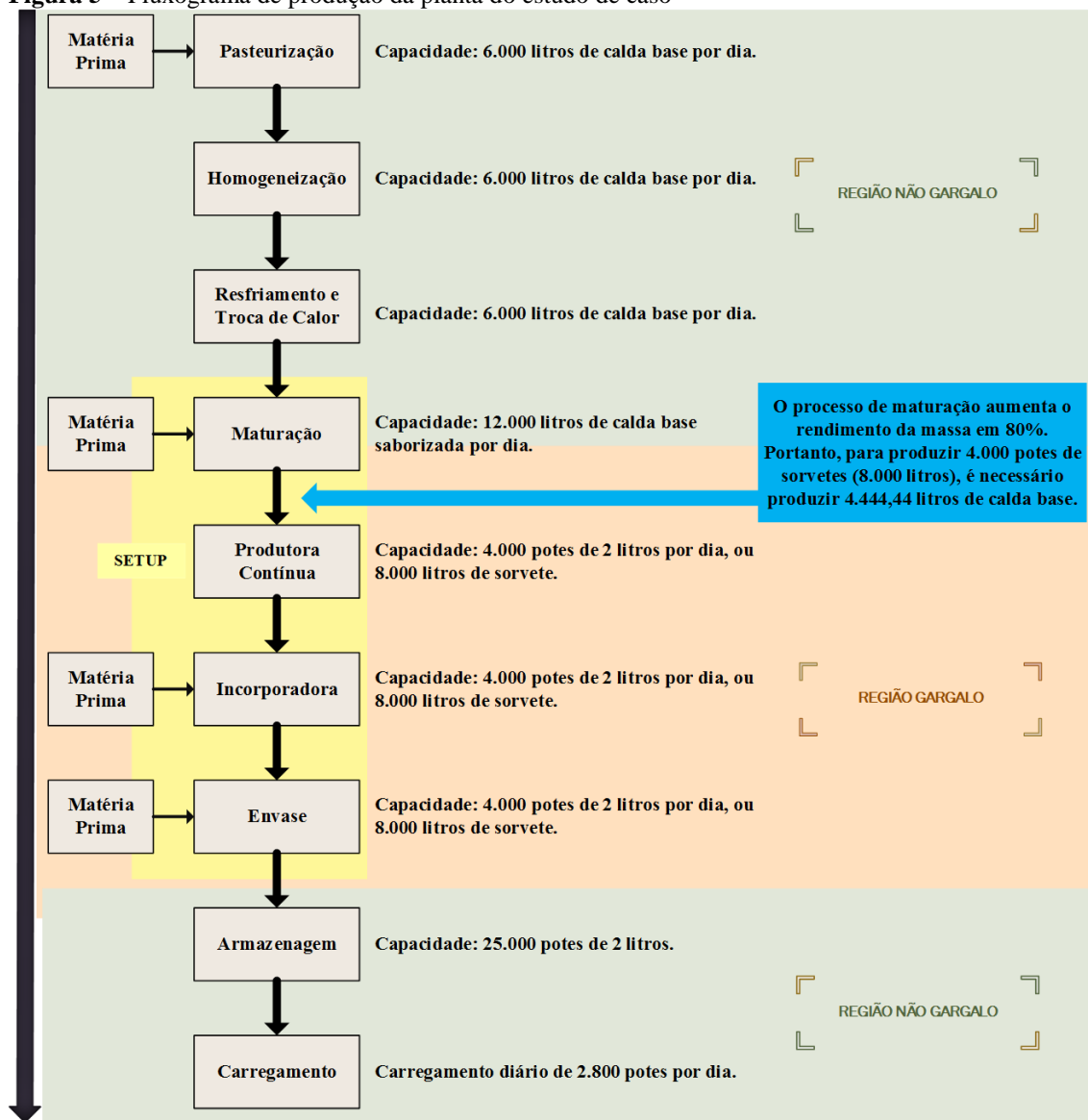
Nesta seção foi analisada a capacidade instalada e outras informações da fábrica investigada, com o objetivo de identificar o processo gargalo para realizar a programação do mesmo utilizando o modelo GLSPST.

4.3.1 CAPACIDADE INSTALADA DE CADA PROCESSO

A fábrica produz 10 sabores diferentes de sorvetes de massa, e apresenta uma produção média diária de 2.800 potes. Além disso, sabe-se que a fábrica não atende todos os seus pedidos e apresenta falta de estoque de alguns produtos e excesso de outros.

Para uma análise das capacidades, a Figura 5 permite identificar quais processos atualmente impedem a fábrica de produzir mais, ou seja, quais recursos apresentam as menores capacidades e são tidos como a principal restrição de todo o sistema produtivo em questão.

Figura 5 – Fluxograma de produção da planta do estudo de caso



Fonte: Elaborado pelo autor com dados extraídos da fábrica.

Utilizando as informações da Figura 5, pode-se calcular a capacidade, em potes de 2 litros, de cada processo.

Os processos de pasteurização, homogeneização e resfriamento/troca de calor, produzem 6.000 litros de calda base por dia, e, após o processo de maturação, o volume aumenta em 80%, portanto, com 6.000 litros de calda base, produz-se 10.800 litros de sorvete, ou 5.400 potes de 2 litros por dia.

O processo de maturação, tem a capacidade de processar 12.000 litros de calda base saborizada por dia, ou 6.000 potes de 2 litros.

Os processos de produtora contínua, incorporadora e envase, tem uma capacidade de 8.000 litros de sorvete por dia, ou 4.000 potes de 2 litros.

A capacidade de armazenamento em câmara frigorífica é de 25.000 potes de 2 litros, e a fábrica não apresenta problemas e restrições com carregamento, já que utiliza frota própria e terceirizada.

Desta forma, evidencia-se que a linha de produção que envolve os processos de produtora contínua, incorporadora e envase, são os que apresentam a menor capacidade instalada, sendo desta forma os processos mais restritivos.

4.3.2 HIGIENIZAÇÃO

Em uma fábrica de sorvestes o *setup* é a higienização de máquina para produção entre um sabor e outro.

Os processos que devem ser higienizados são: maturação, produtora contínua, incorporadora e envase, onde, com exceção da maturação, são justamente os processos que definimos como restrições na Seção 4.3.1. O tempo total de higienização para cada processo é de 30 minutos, e pode ser realizada em todos os processos ao mesmo tempo.

Existe ainda uma sequência de produção entre sabores que não necessitam de higienização. Por exemplo, a troca entre o sabor de creme para o sabor de chocolate não necessita de higienização, pois o sabor de chocolate é predominante sobre o sabor de creme. Vale ressaltar que a recíproca não é verdadeira, ou seja, na troca do sabor de chocolate para o sabor de creme, precisa ser realizada a higienização.

Os sabores de sorvetes de massa produzidos pela fábrica investigada serão denominados neste trabalho de SABOR_1, SABOR_2, SABOR_3, SABOR_4, SABOR_5, SABOR_6, SABOR_7, SABOR_8, SABOR_9 e SABOR_10. A Tabela 1 mostra em quais casos de trocas de sabores é necessário realizar a higienização.

Tabela 1 – Trocas de produção entre sabores que necessitam ou não de *setup* (higienização)

	SABOR_1	SABOR_2	SABOR_3	SABOR_4	SABOR_5	SABOR_6	SABOR_7	SABOR_8	SABOR_9	SABOR_10
SABOR_1	NÃO	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
SABOR_2	SIM	NÃO	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
SABOR_3	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM
SABOR_4	SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
SABOR_5	SIM	SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
SABOR_6	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM	SIM	SIM
SABOR_7	SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM	SIM
SABOR_8	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	NÃO	NÃO	SIM
SABOR_9	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM	NÃO	SIM
SABOR_10	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	NÃO

Fonte: Elaborado pelo autor com dados extraídos da planta do estudo de caso.

Neste ponto pode-se entender que a necessidade de higienização é o motivo pelo qual a produção atual da fábrica é de 2.800 potes de 2 litros por dia, sendo menor que a capacidade instalada dos processos mais restritivos, que é de 4.000 potes de 2 litros por dia.

Portanto, evidencia-se que quanto menos *setup* a fábrica fizer, mais potes serão produzidos. Atualmente a fábrica faz em média 28 higienizações por semana (7 dias).

4.3.3 EXPEDIENTE DE TRABALHO

A fábrica opera das 7:30 as 17:30 todos os dias da semana, sendo, portanto, um total de 10 horas de trabalho por dia. É realizada uma higienização todos os dias após a décima hora de trabalho para que no outro dia, logo na primeira hora de trabalho, a produção se inicie.

CAPÍTULO 5: MODELAGEM MATEMÁTICA

Neste capítulo, é apresentada a modelagem matemática proposta para o planejamento e programação da produção de sorvetes, que teve como base o modelo proposto por Meyr (2000). Foi considerada uma alteração na função objetivo e acrescentadas restrições conforme as particularidades da fábrica investigada e os objetivos do trabalho.

Para o modelo matemático, considere os seguintes conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão:

Conjuntos

- J : conjunto de sabores de sorvete;
- T : conjunto de períodos do horizonte de planejamento;
- S_t : conjunto de subperíodos do período t ;

Parâmetros

- d_{jt} : demanda do sabor j no período t ;
- st_{ij} : tempo de *setup* de máquina para troca de produção do sabor i para o sabor j ;
- a_j : capacidade (em unidade de tempo) necessária para produzir uma unidade do sabor j ;
- min_j : lote mínimo de produção do sabor j (em unidades);
- K_t : capacidade de produção no período t (em unidade de tempo);
- CLP : capacidade da linha de produção por subperíodo (em unidade);
- CAT : capacidade de armazenamento total da câmara frigorífica (em unidades);
- B : número suficientemente grande;
- I_j^{min} : estoque mínimo do sabor j ;
- I_j^{max} : estoque máximo do sabor j ;
- I_{j0} : estoque do sabor j no início do horizonte de planejamento.

Variáveis de decisão

- x_{js} : quantidade do sabor j produzida no subperíodo s ;

I_{jt} : quantidade do sabor j estocada no final do período t ;

y_{js} : $\begin{cases} 1, & \text{se ocorre } \textit{setup} \text{ para produção do sabor } j \text{ no subperíodo } s, \\ 0, & \text{caso contrário;} \end{cases}$

z_{ijs} : $\begin{cases} 1, & \text{se há troca de produção do sabor } i \text{ para o sabor } j \text{ no subperíodo } s, \\ 0, & \text{caso contrário;} \end{cases}$

O modelo matemático

$$\text{Maximizar} \quad \sum_{j \in J} \sum_{s \in S_t} x_{js} \quad (5.1.1)$$

sujeito a:

$$\sum_{s \in S_t} x_{js} + I_{j,t-1} - I_{jt} = d_{jt}, \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (5.1.2)$$

$$\sum_{j \in J, s \in S_t} a_j x_{js} + \sum_{i \in I, j \in J, s \in S_t} st_{ij} z_{ijs} \leq K_t, \forall t \in T \quad (5.1.3)$$

$$x_{js} \leq B y_{js}, \quad \forall j \in J, \forall s \in S \quad (5.1.4)$$

$$x_{js} \geq \min_j y_{js}, \quad \forall j \in J, \forall s \in S \quad (5.1.5)$$

$$z_{ijs} \geq y_{i,s-1} + y_{js} - 1, \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall s \in S \quad (5.1.6)$$

$$I_j^{\min} \leq I_{jt} \leq I_j^{\max} \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (5.1.7)$$

$$\sum_{j \in J} x_{js} \leq CLP, \quad \forall s \in S \quad (5.1.8)$$

$$\sum_{j \in J} I_{jt} \leq CAT, \quad \forall t \in T \quad (5.1.9)$$

$$\begin{aligned} I_{jt} \geq 0; z_{ijs}, y_{js} \in \{0, 1\}; x_{js} \geq 0 \text{ e inteiros,} \\ \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T, \forall s \in S_t \end{aligned} \quad (5.1.10)$$

A função objetivo (5.1.1) maximiza a produção de sabores de sorvete. As restrições de balanceamento de estoque (5.1.2) junto com $I_{jt} \geq 0$ garantem que a demanda seja atendida. O conjunto de restrições (5.1.3) são as restrições de capacidade (tempo) e (5.1.4) são as restrições de preparo de máquina que identificam se a máquina está preparada para produzir um determinado sabor. O conjunto de restrições (5.1.5) garante a produção de lotes mínimos para que um sabor não seja produzido em quantidade inferior ao desejável. O conjunto de restrições (5.1.6) garante que as trocas de produção de sabores entre os subperíodos serão estabelecidas.

O conjunto de restrições (5.1.7) refere-se ao estoque de segurança, pois limita o estoque de cada sabor de sorvete entre uma quantidade mínima e máxima. O conjunto de restrições (5.1.8) limita a quantidade produzida de sorvete por subperíodo, de acordo com a capacidade da linha de produção por subperíodo (CLP).

O conjunto de restrições (5.1.9) exige que o estoque total de todos os sabores seja menor que a capacidade de armazenamento total no período (CAT). O conjunto de restrições (5.1.10) define o domínio das variáveis de decisão.

Um conjunto de testes computacionais foi realizado para validação do modelo, como descrito no Capítulo 6. Os resultados são apresentados e discutidos.

CAPÍTULO 6: EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os testes computacionais realizados para validação do modelo matemático proposto no Capítulo 5. O modelo foi implementado usando o pacote de otimização OPL/CPLEX 12.6 utilizando um microcomputador com 8GB de memória RAM e processador Intel I7. A Seção 6.1 traz a descrição dos parâmetros utilizados nos testes.

6.1 DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS UTILIZADOS

A fábrica investigada produz em média 2.800 potes de sorvete por dia, o que não permite atender todos os seus pedidos. Além disso, o objetivo é aumentar a produção do processo mais restritivo, visando maximizar o atendimento da demanda. Por não se saber ao certo qual a capacidade máxima de produção diária de acordo com as necessidades de realizar as higienizações, foram realizados testes em três faixas de demanda base média, sendo 2.800, 3200 e 3600 unidades por dia. Para cada faixa, a demanda variou entre 80% a 120%, gerando-se nesta faixa as demandas diárias de cada sabor. A geração foi realizada de forma aleatória, utilizando o programa Microsoft Excel 2016.

Além da variação das demandas base e diárias, variou-se também o número de períodos e o número de sabores, obtendo-se as classes demonstrada na Tabela 2.

Tabela 2 – Classes de testes.

Classe	Sabores	Dias	Demanda Média (unidades)
Classe 1	5	7	2.800
Classe 2	5	7	3.200
Classe 3	5	7	3.600
Classe 4	5	14	2.800
Classe 5	5	14	3.200
Classe 6	5	14	3.600
Classe 7	10	7	2.800
Classe 8	10	7	3.200
Classe 9	10	7	3.600
Classe 10	10	14	2.800
Classe 11	10	14	3.200
Classe 12	10	14	3.600

Fonte: Elaborado pelo autor com dados extraídos da planta do estudo de caso.

Para cada classe foram gerados 10 testes, resultando em 120 testes no total. Os resultados são apresentados na Seção 6.1. A seguir, vamos apresentar os dados de entrada que foram utilizados para os testes.

- d_{jt} : demanda do sabor j no período t ;

A Tabela 3 apresenta o percentual de venda que foi utilizado para cada sabor para os testes com 10 sabores (dados reais), e a Tabela 4 apresenta o percentual de venda para os testes com 5 sabores (dados alterados). Esses percentuais foram utilizados para calcular a demanda base em unidades para cada sabor em cada uma das três faixas de demanda já definidas, que são 2.800, 3.200 e 3.600 unidades.

Tabela 3 – Percentual de venda de cada sabor para os testes com 10 sabores.

Sabor	Percentual de venda (%)
Sabor_1	24,00
Sabor_2	18,00
Sabor_3	14,00
Sabor_4	9,00
Sabor_5	7,00
Sabor_6	6,50
Sabor_7	6,00
Sabor_8	6,00
Sabor_9	5,50
Sabor_10	4,00
Total	100,00

Fonte: Elaborado pelo autor com dados extraídos da planta do estudo de caso.

Tabela 4 – Percentual de venda de cada sabor para os testes com 5 sabores.

Sabor	Percentual de venda (%)
Sabor_1	29,00
Sabor_2	24,00
Sabor_3	19,00
Sabor_4	15,00
Sabor_5	13,00
Total	100,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 5 apresenta o intervalo de valores em que foram sorteados aleatoriamente os valores das demandas diárias para 5 sabores e a Tabela 6 apresenta o intervalo para 10 sabores, ambas para cada faixa de demanda base.

Tabela 5 – Intervalo mínimo e máximo de sorteio para cada demanda base para 5 sabores.

Demanda Base	Intervalo	Sabor_1	Sabor_2	Sabor_3	Sabor_4	Sabor_5
2.800	Mínimo	650	538	426	336	291
	Máximo	974	806	638	504	437
3.200	Mínimo	742	614	486	384	333
	Máximo	1.114	922	730	576	499
3.600	Mínimo	835	691	547	432	374
	Máximo	1.253	1.037	821	648	562

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6 – Intervalo mínimo e máximo de sorteio para cada demanda base para 10 sabores.

Demanda Base	Intervalo	Sabor_1	Sabor_2	Sabor_3	Sabor_4	Sabor_5	Sabor_6	Sabor_7	Sabor_8	Sabor_9	Sabor_10
2.800	Mínimo	538	403	314	202	157	146	134	134	123	90
	Máximo	806	605	470	302	235	218	202	202	185	134
3.200	Mínimo	614	461	358	230	179	166	154	154	141	102
	Máximo	922	691	538	346	269	250	230	230	211	154
3.600	Mínimo	691	518	403	259	202	187	173	173	158	115
	Máximo	1.037	778	605	389	302	281	259	259	238	173

Fonte: Elaborado pelo autor.

- st_{ij} : tempo de *setup* de máquina para troca de produção do sabor i para o sabor j ;

Foi considerado $st_{ij} = 30$ minutos para quando houver troca com necessidade de *setup*.

O tempo de 30 minutos para realizar a higienização é um dado real fornecido pelos diretores da empresa. Não foi permitido que o pesquisador fizesse a medição, porém, os diretores afirmaram que este é o tempo necessário para higienização quando existe a necessidade da mesma. A Tabela 7 apresenta as necessidades de higienização ou não para os testes com 10 sabores, e a Tabela 8 apresenta para os testes com 5 sabores.

Tabela 7 – Matriz de tempo de *setup* para a troca do sabor *i* para o sabor *j* utilizada nos testes com 10 sabores

	SABOR_1	SABOR_2	SABOR_3	SABOR_4	SABOR_5	SABOR_6	SABOR_7	SABOR_8	SABOR_9	SABOR_10
SABOR_1	0	30	30	30	30	30	30	30	30	30
SABOR_2	30	0	30	30	30	30	30	30	30	30
SABOR_3	30	30	0	30	30	30	30	0	30	30
SABOR_4	30	30	30	0	30	30	30	30	30	30
SABOR_5	30	30	30	30	0	30	30	30	30	30
SABOR_6	30	30	30	30	30	0	30	30	30	30
SABOR_7	30	30	30	0	30	30	0	30	30	30
SABOR_8	30	30	30	30	30	30	30	0	0	30
SABOR_9	30	30	30	30	30	30	0	30	0	30
SABOR_10	30	30	30	30	30	30	30	30	30	0

Fonte: Elaborado pelo autor com dados extraídos da planta do estudo de caso.

Tabela 8 – Matriz de tempo de *setup* para a troca do sabor *i* para o sabor *j* utilizada nos testes com 5 sabores

	SABOR_1	SABOR_2	SABOR_3	SABOR_4	SABOR_5
SABOR_1	0	30	30	30	30
SABOR_2	30	0	30	0	30
SABOR_3	30	30	0	30	30
SABOR_4	30	30	30	0	30
SABOR_5	30	0	30	30	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

- a_j : capacidade (em unidade de tempo) necessária para produzir uma unidade do sabor *j*;

Foi definido o valor de $a_j = 0,15$ minutos para todos os sabores, pois, sabe-se que, na ausência de higienizações, a capacidade de produção por dia é 4.000 potes de 2 litros e que o dia de trabalho tem 10 horas, ou então, 600 minutos. Assim, o tempo em minutos para produzir 1 pote de 2 litros é 0,15 minutos.

- min_j : lote mínimo de produção do sabor *j* (em unidades);

Foi considerada 200 unidades como lote mínimo de produção de cada sabor. Este dado define que quando um sabor for produzido, que seja produzido no mínimo 200 unidades. Esse valor foi definido de acordo com o subperíodo S_t .

- K_t : capacidade de produção no período *t* (tempo);

$$K_t = 600 \text{ minutos por dia.}$$

Este dado refere-se à capacidade de produção de um período T em minutos, lembrando que o período T equivale a um dia, sendo 10 horas no total.

- CLP : capacidade da linha de produção por subperíodo;

$CLP = 200$ unidades para todos os sabores.

Este dado define a capacidade da linha de produção por subperíodo, que é igual a min_j .

- CAT : capacidade de armazenamento total da câmara frigorífica;

Definido em 25.000 unidades, este dado refere-se à capacidade de armazenamento total da câmara frigorífica. Ele é utilizado nas restrições para que a somatória total de estoque de todos os sabores não ultrapasse a capacidade de armazenamento.

- B : número suficientemente grande, definido como 201.

Por fim, temos a definição dos dados de estoque, sendo eles:

- I_j^{min} : estoque mínimo do sabor j ;
- I_j^{max} estoque máximo do sabor j ;
- I_{j0} estoque do sabor j no início do horizonte de planejamento.

Para o estoque mínimo, foi utilizado três dias de demanda diária média, que é a prática atual da empresa.

O estoque inicial foi definido como sendo duas vezes o estoque mínimo e o estoque máximo foi definido como sendo o equivalente a 10 dias de demanda. O estoque inicial foi definido desta forma devido à impossibilidade de se obter a informação do inventário atual da empresa. O estoque máximo foi definido de acordo com a prática da empresa, onde não deve ultrapassar 10 dias de demanda diária média.

Vale ressaltar que os estoques mínimo, máximo e inicial variam de acordo com cada faixa de demanda definidas para os testes (2.800, 3.200 e 3.600 unidades). A Tabela 9 apresenta os valores de estoque para cada demanda base, bem como sua respectiva classe para 5 sabores, e a Tabela 10 apresenta os mesmos dados para 10 sabores.

Tabela 9 – Valores de estoque para cada demanda base com a respectiva classe para 5 sabores.

Estoque	Sabor_1	Sabor_2	Sabor_3	Sabor_4	Sabor_5
Demanda Base 2.800 (classes 1 e 4)					
Inicial	4.872	4.032	3.192	2.520	2.184
Mínimo	2.436	2.016	1.596	1.260	1.092
Máximo	8.120	6.720	5.320	4.200	3.640
Demanda Base 3.200 (classes 2 e 5)					
Inicial	5.568	4.608	3.648	2.880	2.496
Mínimo	2.784	2.304	1.824	1.440	1.248
Máximo	9.280	7.680	6.080	4.800	4.160
Demanda Base 3.600 (classes 3 e 6)					
Inicial	6.264	5.184	4.104	3.240	2.808
Mínimo	3.132	2.592	2.052	1.620	1.404
Máximo	10.440	8.640	6.840	5.400	4.680

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10 – Valores de estoque para cada demanda base com a respectiva classe para 10 sabores.

Estoque	Sabor_1	Sabor_2	Sabor_3	Sabor_4	Sabor_5	Sabor_6	Sabor_7	Sabor_8	Sabor_9	Sabor_10
Demanda Base 2.800 (classes 7 e 10)										
Inicial	4.032	3.024	2.352	1.512	1.176	1.092	1.008	1.008	924	672
Mínimo	2.016	1.512	1.176	756	588	546	504	504	462	336
Máximo	6.720	5.040	3.920	2.520	1.960	1.820	1.680	1.680	1.540	1.120
Demanda Base 3.200 (classes 8 e 11)										
Inicial	4.608	3.456	2.688	1.728	1.344	1.248	1.152	1.152	1.056	768
Mínimo	2.304	1.728	1.344	864	672	624	576	576	528	384
Máximo	7.680	5.760	4.480	2.880	2.240	2.080	1.920	1.920	1.760	1.280
Demanda Base 3.600 (classes 9 e 12)										
Inicial	5.184	3.888	3.024	1.944	1.512	1.404	1.296	1.296	1.188	864
Mínimo	2.592	1.944	1.512	972	756	702	648	648	594	432
Máximo	8.640	6.480	5.040	3.240	2.520	2.340	2.160	2.160	1.980	1.440

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.2 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

O modelo GLSPST foi implementado utilizando a linguagem de programação *Optimization Programming Language* (OPL) e resolvido com o solver CPLEX 12.6. Os testes foram realizados em um computador com processador Intel I7 com 8GB de memória RAM.

Os resultados são apresentados em forma de tabelas e gráficos. A Tabela 11 apresenta os resultados médios dos 10 exemplos gerados para cada classe. Para os testes com 5 sabores, o tempo total de cada teste foi limitado em 10 minutos, pois, antes de definir este tempo limite, foi realizado um teste sem limite de tempo. O modelo rodou 2

horas e 56 minutos até o hardware apresentar falta de memória, e, o *gap* no momento da falta de memória era igual ao *gap* com 10 minutos para os mesmos dados de entrada. Para os testes com 10 sabores, o tempo máximo de cada teste foi limitado em 30 minutos, sendo uma análise igual a de 5 sabores para definição deste tempo, ou seja, verificou-se o tempo que o modelo apresentou falta de memória e comparou-se com um tempo em que o *gap* era similar e constante, no caso, 30 minutos.

Tabela 11 – Resultados médios dos 10 exemplos testados por classe

Classes	Função Objetivo	Produção Diária	Exemplos Factiveis	Exemplos sem solução até o limite de tempo.	Exemplos Ótimos	Estoque no Último Período	Total de trocas com Higienização	Total de Trocas sem Higienização	GAP %	Tempo médio soluções ótimas (mm:ss)
1	26.980	3.854	10	0	0	24.073	5	8	2,82	-
2	27.160	3.880	10	0	0	23.940	4	6	3,04	-
3	27.160	3.880	10	0	0	23.429	4	6	3,09	-
4	47.080	3.363	10	0	10	24.879	45	22	-	00:23
5	50.480	3.606	10	0	10	24.853	27	22	-	01:31
6	53.300	3.807	10	0	1	23.718	15	17	2,71	04:44
7	25.760	3.680	10	0	0	22.926	11	12	7,95	-
8	26.080	3.726	10	0	0	23.116	10	12	6,92	-
9	26.200	3.743	10	0	0	22.657	9	12	6,76	-
10	47.280	3.377	10	0	7	24.792	44	22	0,83	17:26
11	48.600	3.471	10	0	0	22.952	37	24	4,23	-
12	48.400	3.457	3	7	0	19.682	38	24	11,12	-

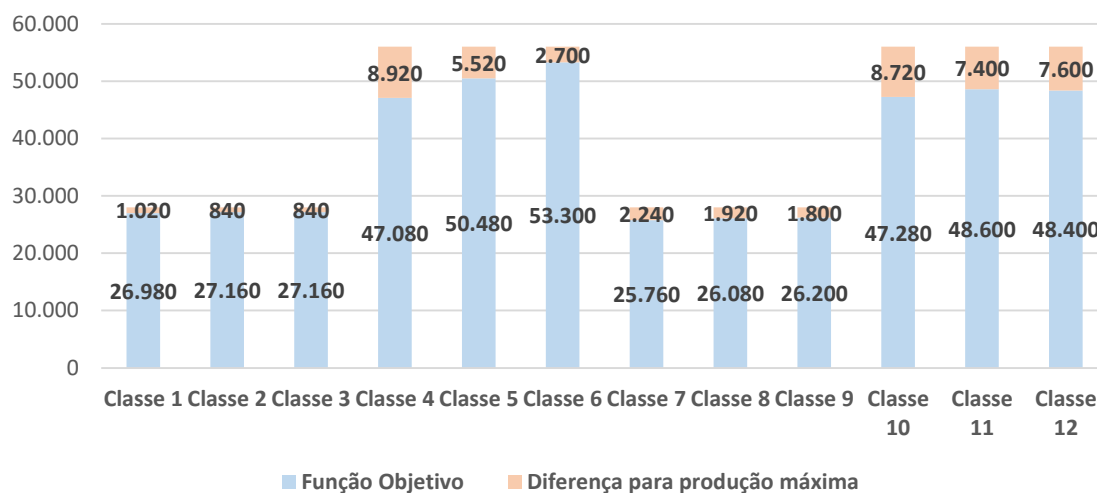
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para melhor análise e entendimento da Tabela 11, vamos apresentar abaixo gráficos de relacionamentos entres os resultados, explicando cada um deles de forma comparativa entre as classes.

A Figura 6 apresenta os resultados médios da função objetivo para os 10 testes de cada classe juntamente com a diferença do resultado máximo possível e seguido do *gap* médio para cada classe. O resultado máximo possível é calculado de acordo com o número de períodos que está sendo testado, sendo assim, para 7 períodos, como sabemos que a produção máxima diária é de 4.000 unidades (caso nenhuma higienização seja feita), multiplicando este valor por 7 obtemos o total máximo de produção possível no valor de 28.000 unidades. Logicamente isso é pouco provável que aconteça, pois, em 7 dias, de acordo com os estoques iniciais, máximo e mínimos, por mais que haja a possibilidade de realizar determinadas trocas sem necessidade de higienização, em determinados períodos a higienização será inevitável. Para testes com 14 dias, o máximo

possível de ser obtido como resultado da função objetivo é de 56.000 unidades, que nada mais é do que a multiplicação de 4.000 unidades diárias vezes 14 dias.

Figura 6 – Resultado da função objetivo de cada classe com diferença para possível resultado máximo com apresentação do gap por classe para comparação.



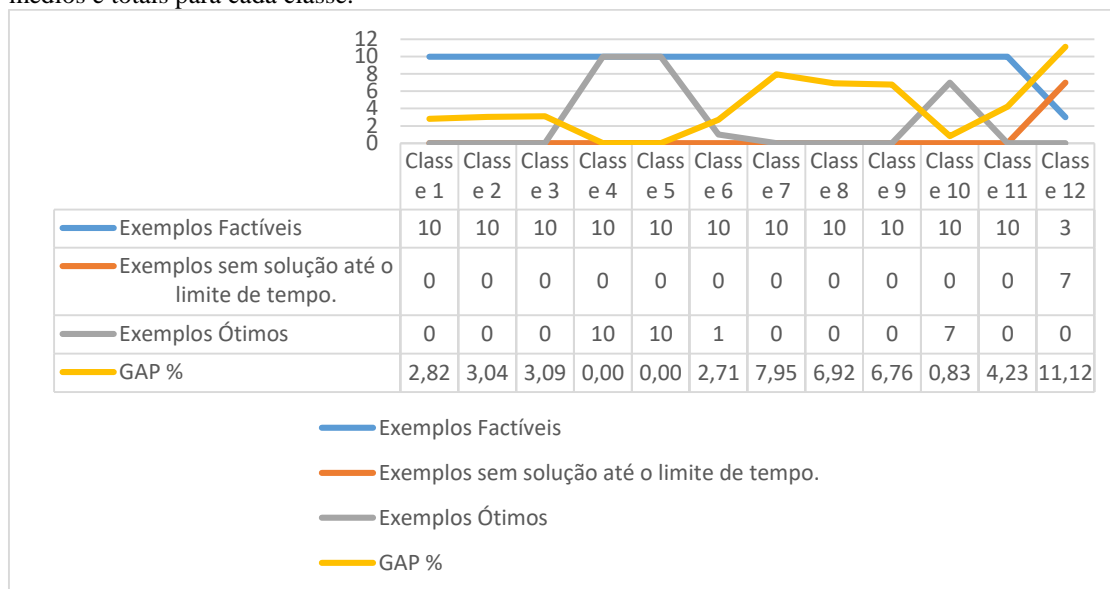
Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se, observando a Figura 6, que o modelo para 7 dias de horizonte de planejamento apresentou uma regularidade no resultado na função objetivo, porém com um *gap* maior. Já quando se compara com os resultados para 14 dias de horizonte de planejamento, nota-se uma mesma regularidade no resultado da função objetivo, porém, com uma facilidade de resolução, obtendo-se inclusive resultados ótimos ou *gaps* baixos quando comparados com o *gap* para 7 dias.

É interessante destacar que a classe 12, mesmo provendo de resultados bons das classes 10 e 11, que possuem também 10 sabores e 14 dias, porém com demandas base menores, apresentou dificuldade para encontrar soluções factíveis dentro do tempo limite de 30 minutos de execução do modelo, conforme mostra a Figura 7. Essa dificuldade ocorre porque o estoque inicial, definido como 60% do valor do percentual de venda do produto multiplicada pela demanda base, é muito alto, tendo dificuldade para encontrar uma solução factível devido à restrição 5.1.9, que limita a somatória total de estoque de todos os produtos em 25.000 unidades. Testes foram realizados utilizando a mesma demanda sem a restrição de armazenamento e, segundos após o início dos testes para a classe 12, uma solução factível foi encontrada. Vale ressaltar que o limite de teste definido

para a classe 12 é 30 minutos, sendo assim, soluções factíveis poderiam sim serem encontradas mesmo com a restrição de armazenamento ativa.

Figura 7 – Exemplos factíveis, exemplos sem solução até o limite de tempo, exemplos ótimos e *gaps* médios e totais para cada classe.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando a Figura 7, podem-se tirar algumas outras conclusões, como por exemplo comprovar a facilidade de obtenção de soluções ótimas ou *gap* baixo para classes com 14 dias de horizonte de planejamento quando comparadas com os testes de 7 dias de horizonte de planejamento.

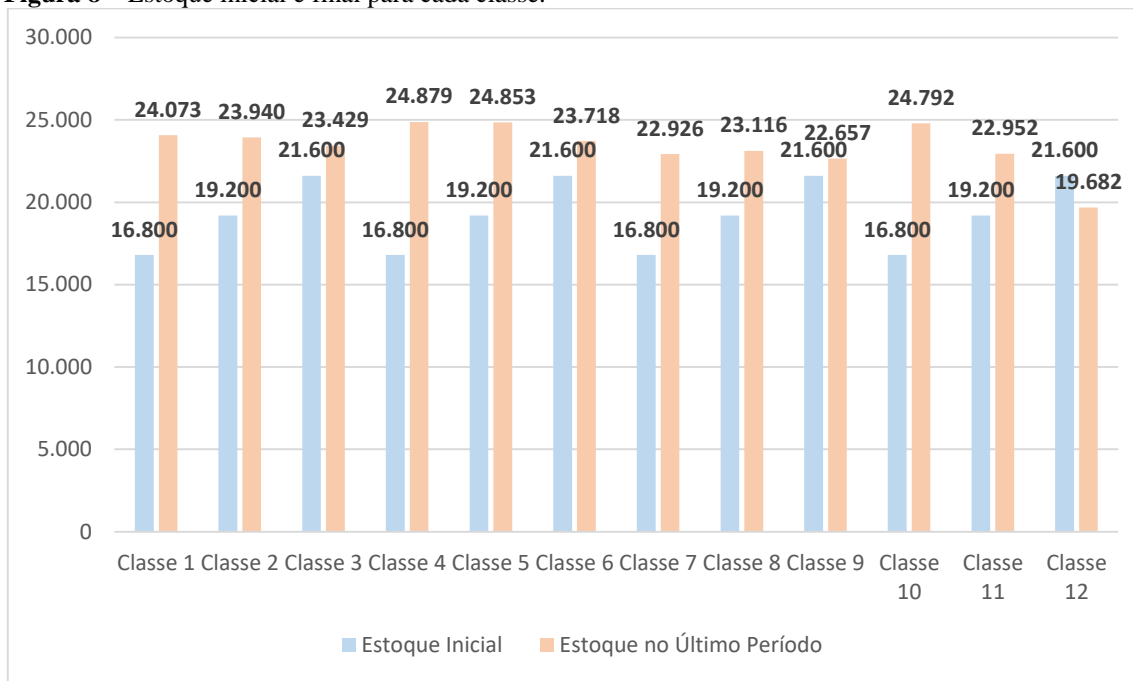
Dado que o objetivo é produzir o máximo possível no processo mais restritivo da fábrica de sorvetes, e observando na Figura 6 o resultado de 47.080 unidades da função objetivo da classe 4, e comparando este resultado com o obtido na classe 6 de 53.300 unidades e que não obteve solução ótima (*gap* de 2,71%), observa-se que, mesmo não sendo uma solução ótima, a solução da classe 6 possibilita uma produção maior do processo mais restritivo.

Estendendo esta análise para as outras classes, percebe-se que as classes que utilizaram demanda base média de 3.600 unidades, apresentaram resultados maiores na função objetivo, com exceção da classe 12 que, conforme já foi explicado, teve limitações devido à restrição de armazenamento.

Já as análises relacionadas aos estoques podem ser vistas inicialmente observando a Figura 8, que apresenta o gráfico de estoque inicial e final para cada classe. Percebe-se

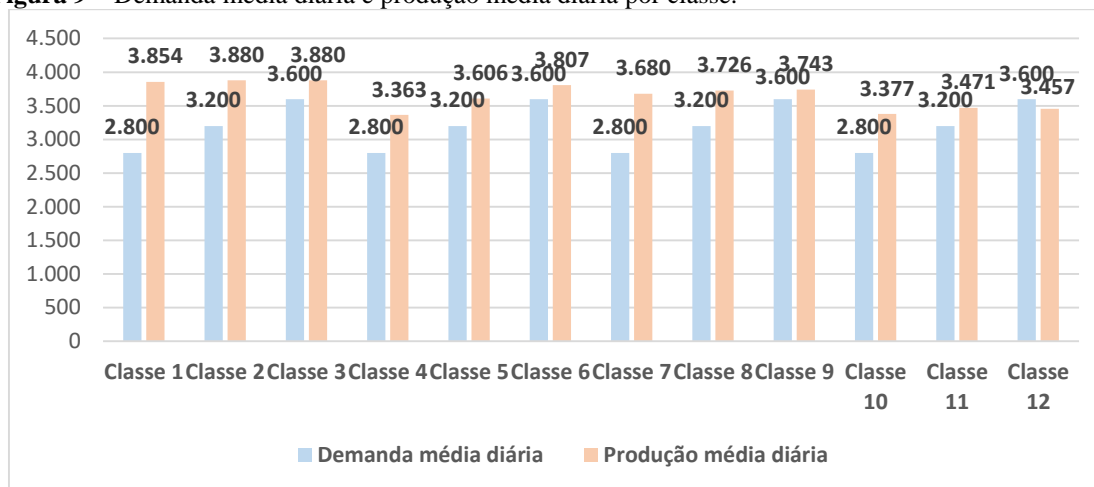
que quanto maior a demanda, menor é o aumento do nível de estoque no final do horizonte de planejamento.

Figura 8 – Estoque inicial e final para cada classe.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 9 apresenta a demanda média diária comparada com a produção média diária para cada classe. Nota-se que para todas as classes, com exceção da classe 12, a produção supera a demanda. Isso explica o aumento de estoque apresentado na Figura 8. Para a fábrica investigada, esse aumento de estoque é saudável, uma vez que ele é controlado pelo estoque máximo de 10 dias, presente em uma das restrições do modelo. Em outras palavras, para uma fábrica que deseja atender 100% dos seus pedidos, ter estoque, desde que controlado, é uma situação considerada aceitável.

Figura 9 – Demanda média diária e produção média diária por classe.

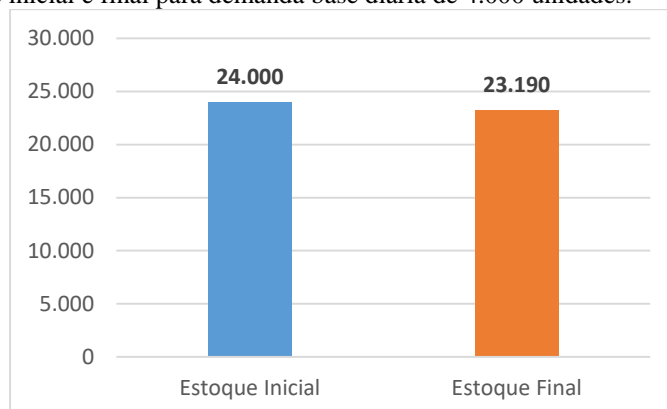
Fonte: Elaborado pelo autor.

Deve-se ressaltar que a fábrica atualmente produz 2.800 unidades por dia, não conseguindo atender toda sua demanda. Portanto, não se sabe ao certo qual é a sua demanda real. Os testes mostraram que independente da demanda base média, a produção diária é praticamente a mesma para a variação apenas da demanda base, ou seja, classes 1, 2, 3, classes 4, 5 e 6, classes, 7, 8 e 9 e classes 10, 11 e 12, conforme mostra a Figura 9, com a diferença de que existe um aumento de estoque maior no final do horizonte de planejamento quando a demanda base é menor, conforme mostra a Figura 8.

Os testes com a demanda base de 3.600 unidades diárias mostram que esta demanda deve estar próxima do limite de produção da fábrica. Foram então realizados testes com uma demanda base de 4.000 unidades diárias, adotando-se a mesma estratégia de sorteio para as demandas de cada sabor. A Figura 10 mostra o estoque inicial e o estoque final para os testes com 4.000 unidades diárias de produção.

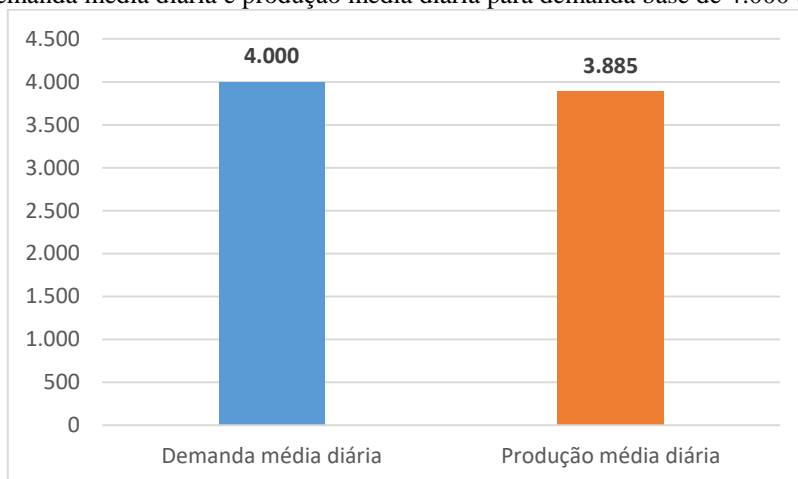
Observando a Figura 10, nota-se uma diminuição do estoque no final do horizonte de planejamento. Isso confirma que a demanda de 4.000 unidades diárias não pode ser atingida, uma vez que existe a necessidade de se realizar higienizações para troca de produção entre alguns sabores. A Figura 11 apresenta a média de produção diária para os testes com demanda base de 4.000 unidades.

Figura 10 – Estoque inicial e final para demanda base diária de 4.000 unidades.



Fonte: Elaborado pelo autor.

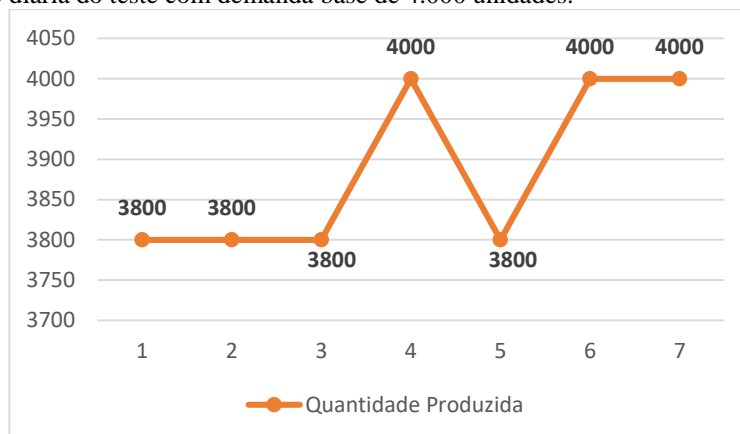
Figura 11 - Demanda média diária e produção média diária para demanda base de 4.000 unidades.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando a Figura 12 percebe-se que não será possível produzir 4.000 unidades todos os dias. Analisando mais detalhadamente, a Figura 11 apresenta a produção diária do teste com demanda base de 4.000 unidades. Pode-se notar que, conforme evidenciado anteriormente, devido à necessidade de higienizações em algumas trocas, não é possível produzir 4.000 unidades todos os dias.

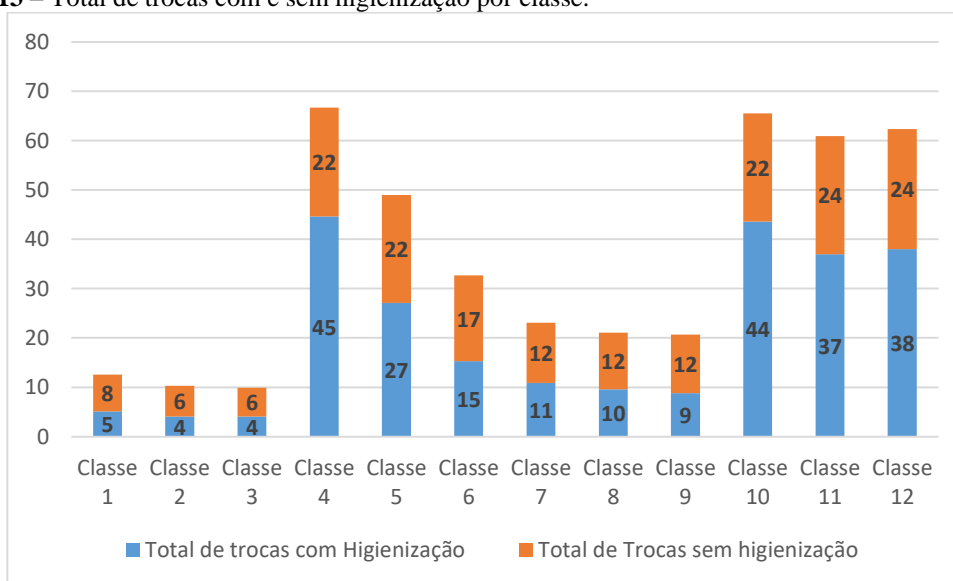
Figura 12 - Produção diária do teste com demanda base de 4.000 unidades.



Elaborado pelo autor.

Por fim, observando a Figura 13, pode-se perceber uma regularidade no número de higienizações e trocas entre sabores sem higienização para as classes 1, 2 e 3, bem como 7, 8 e 9, além de 10, 11, 12, porém, sempre com uma tendência de a primeira classe de cada grupo de classes ter mais higienizações. Isso ocorre porque, como a demanda é menor, e, conseqüentemente o estoque máximo de cada produto também são menores, existe a necessidade de se realizar mais trocas, uma vez que o estoque máximo não pode ser ultrapassado. As classes 4, 5 e 6, que não apresentaram regularidade, são justamente as que obtiveram soluções ótimas.

Figura 13 – Total de trocas com e sem higienização por classe.



Elaborado pelo autor.

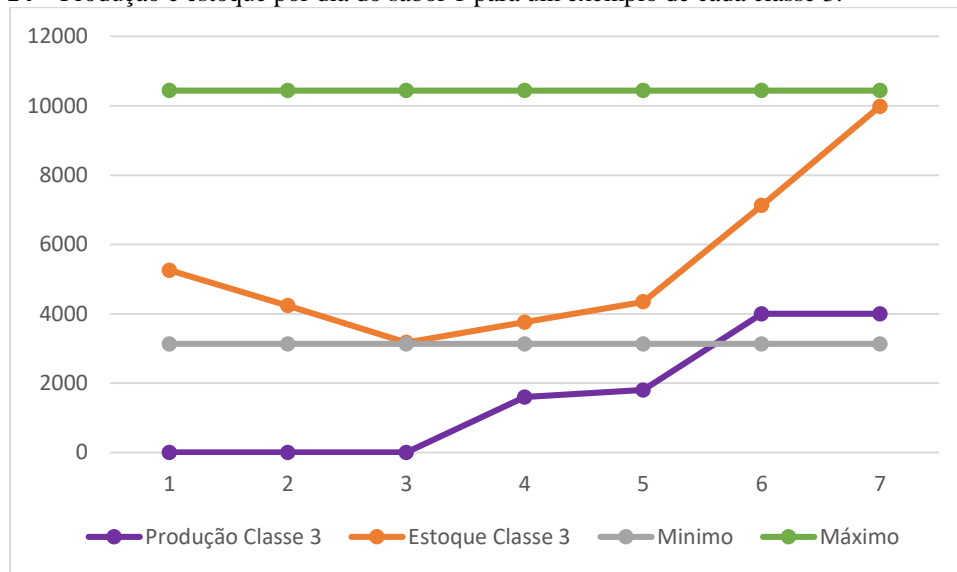
Da análise, pode-se concluir que, dado o objetivo do trabalho e de muitas fábricas que é aumentar a produção no processo mais restritivo, o melhor é utilizar a demanda base maior, de 3.600 unidades e rodar o modelo por um tempo pré-determinado, pois, mesmo não obtendo solução ótima, apresenta uma quantidade a ser produzida viável. Destaca-se aqui que, para chegar a esta conclusão, a realização dos testes foi de suma importância.

6.3 DESCRIÇÃO DETALHADA DA PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO

A seguir é apresentada a programação da produção para dois exemplos das classes 3 e 6. A escolha destas classes para explicar e comparar suas programações calculadas justifica-se pelo intuito de demonstrar o efeito do aumento do horizonte de planejamento nos resultados. A comparação quanto à alteração do número de sabores nos resultados pode ser observada na Figura 8, em que se nota que a produção total para ambos os períodos, de 7 e 14 dias, é menor quando se está realizando a programação com mais sabores.

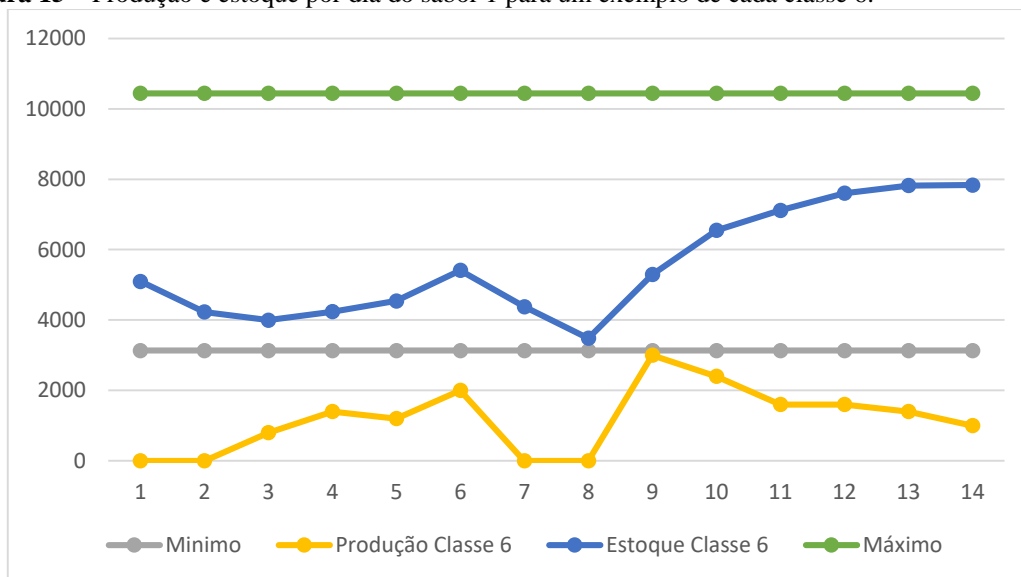
As Figuras 14 a 23 apresentam os gráficos da quantidade produzida e estoque de todos os sabores de sorvete na solução obtida para o modelo GLSPST. Os gráficos demonstram que os estoques de cada sabor foram mantidos dentro do estoque mínimo e estoque máximo, ou seja, o problema de excesso e falta de estoque que ocorre constantemente na fábrica foi resolvido.

Figura 14 – Produção e estoque por dia do sabor 1 para um exemplo de cada classe 3.



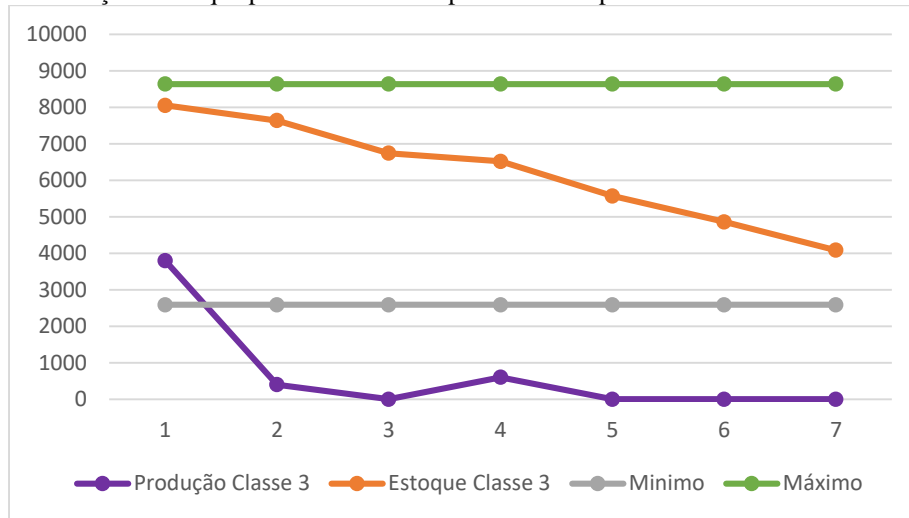
Fonte: Elaborado pelo autor com a solução obtida pelo solver CPLEX.

Figura 15 – Produção e estoque por dia do sabor 1 para um exemplo de cada classe 6.



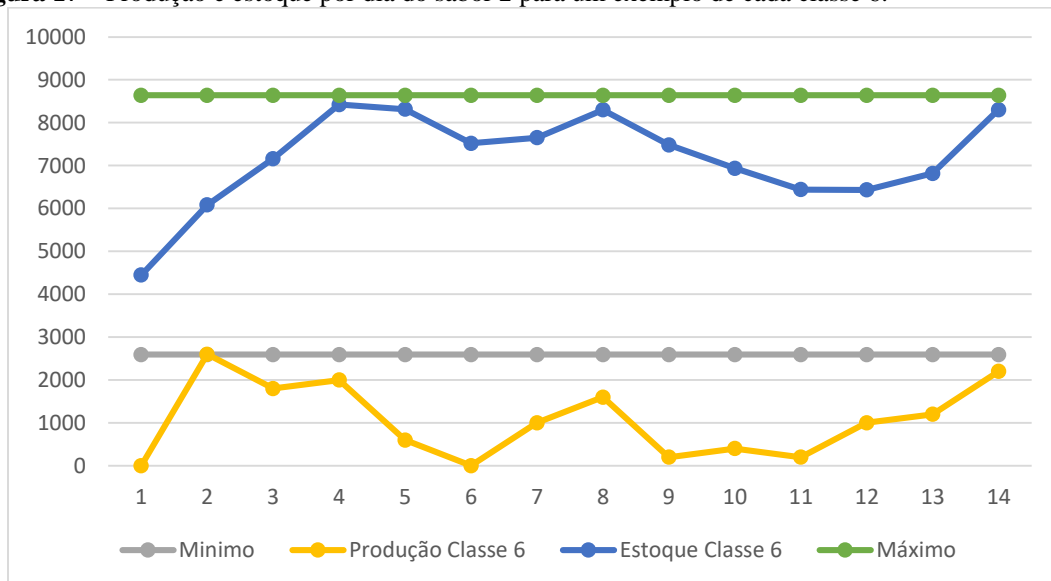
Fonte: Elaborado pelo autor com a solução obtida pelo solver CPLEX.

Figura 16 – Produção e estoque por dia do sabor 2 para um exemplo de cada classe 3.



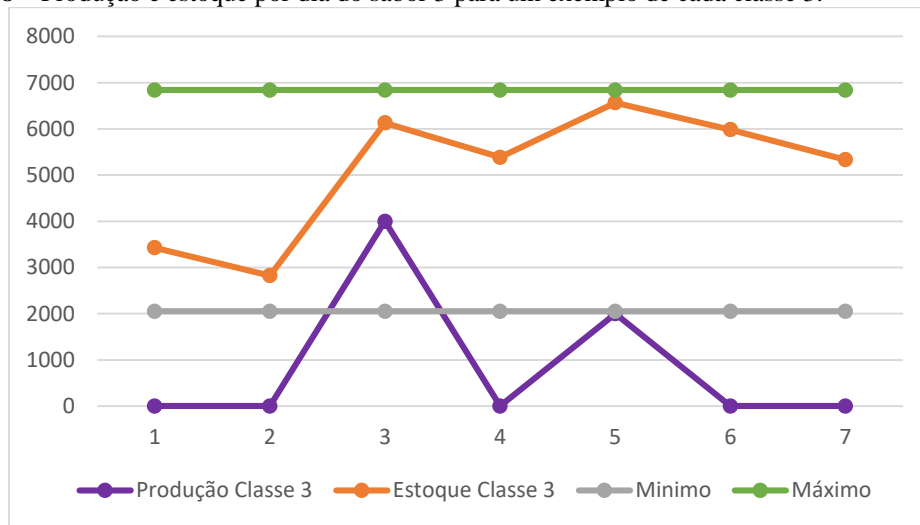
Fonte: Elaborado pelo autor com a solução obtida pelo solver CPLEX.

Figura 17 – Produção e estoque por dia do sabor 2 para um exemplo de cada classe 6.



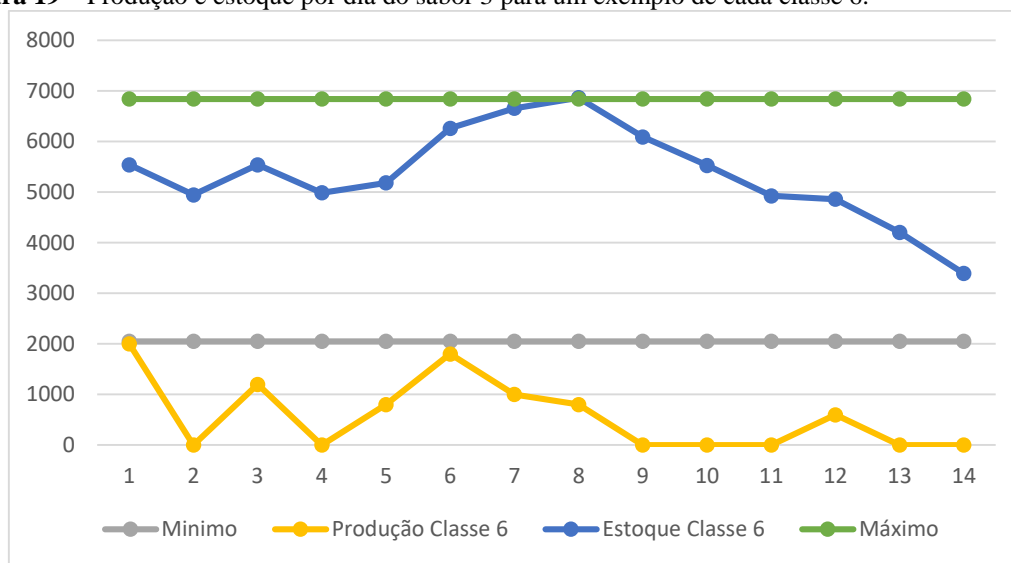
Fonte: Elaborado pelo autor com a solução obtida pelo solver CPLEX.

Figura 18 – Produção e estoque por dia do sabor 3 para um exemplo de cada classe 3.



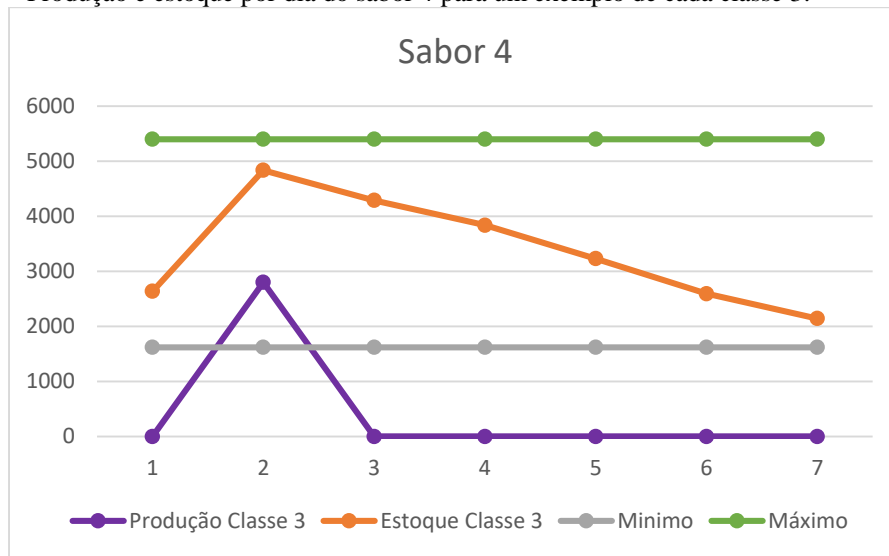
Fonte: Elaborado pelo autor com a solução obtida pelo solver CPLEX.

Figura 19 – Produção e estoque por dia do sabor 3 para um exemplo de cada classe 6.



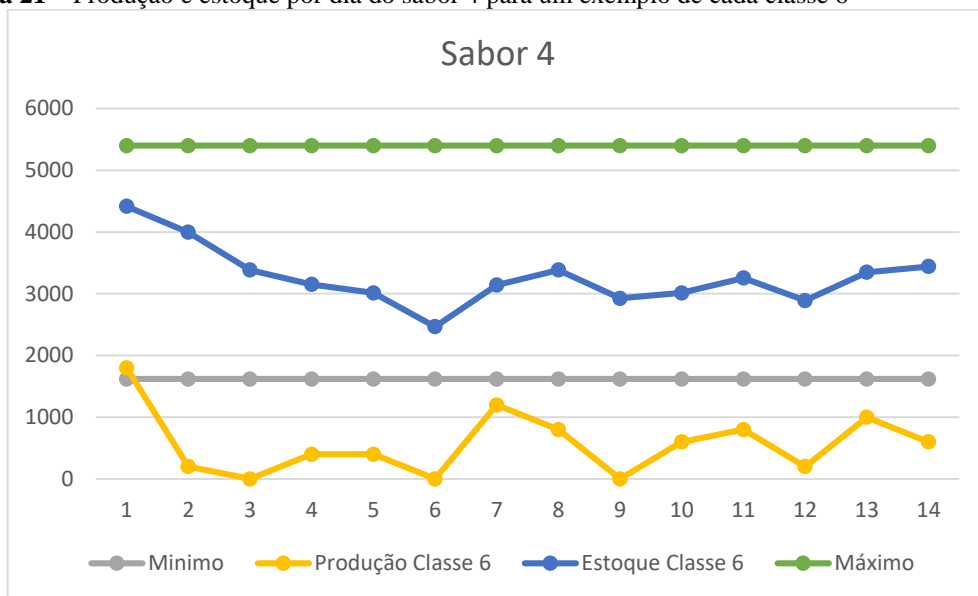
Fonte: Elaborado pelo autor com a solução obtida pelo solver CPLEX.

Figura 20 – Produção e estoque por dia do sabor 4 para um exemplo de cada classe 3.



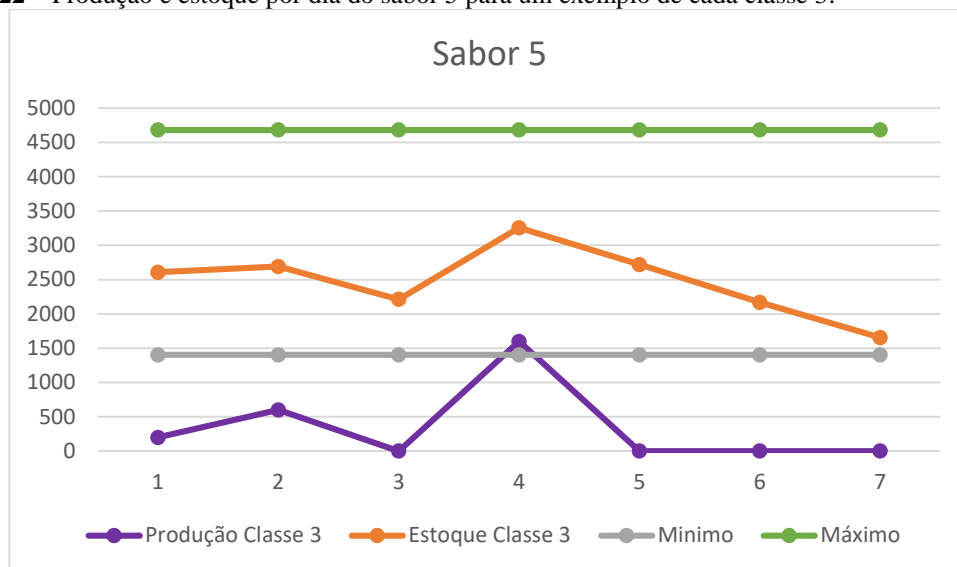
Fonte: Elaborado pelo autor com a solução obtida pelo solver CPLEX.

Figura 21 – Produção e estoque por dia do sabor 4 para um exemplo de cada classe 6



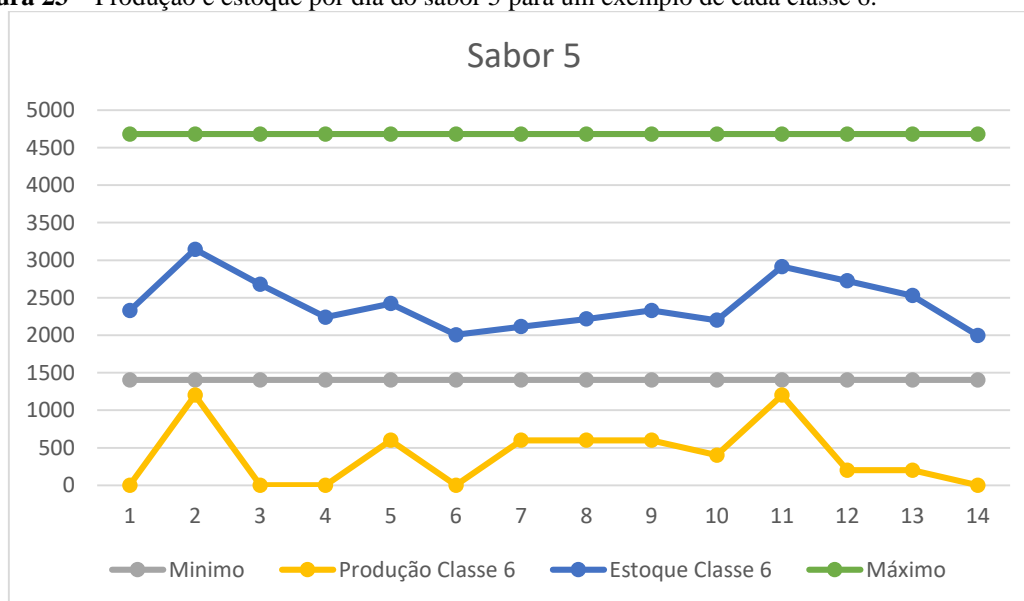
Fonte: Elaborado pelo autor com a solução obtida pelo solver CPLEX.

Figura 22 – Produção e estoque por dia do sabor 5 para um exemplo de cada classe 3.



Fonte: Elaborado pelo autor com a solução obtida pelo solver CPLEX.

Figura 23 – Produção e estoque por dia do sabor 5 para um exemplo de cada classe 6.



Fonte: Elaborado pelo autor com a solução obtida pelo solver CPLEX.

As Tabelas 12 a 25 apresentam a programação da produção. Nota-se que foram alocados os subperíodos utilizados para higienização, facilitando o trabalho da equipe de produção, que deve apenas seguir a programação. Não há nenhuma comparação a ser destacada entre a programação da classe 3 e classe 6.

Tabela 12 – Programação da produção para o período T = 1 e subperíodos de 1 a 20

Período de produção T = 1 (primeiro dia)																				
Horário	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30
Subperíodo s =	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
7 DIAS																				
Sabor_1																				
Sabor_2		200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Sabor_3																				
Sabor_4																				
Sabor_5	200																			
14 DIAS																				
Sabor_1																				
Sabor_2																				
Sabor_3	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200										
Sabor_4													200	200	200	200	200	200	200	200
Sabor_5																				

Fonte: Elaborado pelo autor com dados extraídos do CPLEX após execução do modelo desenvolvido.

Tabela 13 – Programação da produção para o período T = 2 e subperíodos de 21 a 40

Período de produção T = 2 (segundo dia)																				
Horário	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30
Subperíodo s =	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
7 DIAS																				
Sabor_1																				
Sabor_2																			200	200
Sabor_3																				
Sabor_4	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200						
Sabor_5																				
14 DIAS																				
Sabor_1																				
Sabor_2								200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	
Sabor_3																				
Sabor_4																				200
Sabor_5	200	200	200	200	200	200														

Fonte: Elaborado pelo autor com dados extraídos do CPLEX após execução do modelo desenvolvido.

Tabela 14 – Programação da produção para o período T = 3 e subperíodos de 41 a 60

Período de produção T = 3 (terceiro dia)																				
Horário	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30
Subperíodo s =	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
7 DIAS																				
Sabor_1																				
Sabor_2																				
Sabor_3	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Sabor_4																				
Sabor_5																				
14 DIAS																				
Sabor_1																				
Sabor_2	200	200	200	200	200	200	200	200	200											
Sabor_3											200	200	200	200	200					
Sabor_4																				
Sabor_5																				

Fonte: Elaborado pelo autor com dados extraídos do CPLEX após execução do modelo desenvolvido.

Tabela 15 – Programação da produção para o período $T = 4$ e subperíodos de 61 a 80

		Período de produção $T = 4$ (quarto dia)																		
Horário	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30
Subperíodo $s =$	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
7 DIAS																				
Sabor_1																				
Sabor_2										200	200	200								
Sabor_3																				
Sabor_4																				
Sabor_5	200	200	200	200	200	200	200	200	200											
14 DIAS																				
Sabor_1																				
Sabor_2	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200										
Sabor_3																				
Sabor_4																				
Sabor_5																				

Fonte: Elaborado pelo autor com dados extraídos do CPLEX após execução do modelo desenvolvido.

Tabela 16 – Programação da produção para o período $T = 5$ e subperíodos de 81 a 100

		Período de produção $T = 5$ (quinto dia)																		
Horário	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30
Subperíodo $s =$	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
7 DIAS																				
Sabor_1	200	200	200	200	200	200	200	200	200											
Sabor_2																				
Sabor_3																				
Sabor_4																				
Sabor_5																				
14 DIAS																				
Sabor_1	200	200	200	200	200	200														
Sabor_2																				
Sabor_3																				
Sabor_4																				
Sabor_5																				

Fonte: Elaborado pelo autor com dados extraídos do CPLEX após execução do modelo desenvolvido.

Tabela 17 – Programação da produção para o período $T = 6$ e subperíodos de 101 a 120

		Período de produção $T = 6$ (sexto dia)																		
Horário	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30
Subperíodo $s =$	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
7 DIAS																				
Sabor_1	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Sabor_2																				
Sabor_3																				
Sabor_4																				
Sabor_5																				
14 DIAS																				
Sabor_1																				
Sabor_2																				
Sabor_3	200	200	200	200	200	200	200	200	200											
Sabor_4																				
Sabor_5																				

Fonte: Elaborado pelo autor com dados extraídos do CPLEX após execução do modelo desenvolvido.

Tabela 18 – Programação da produção para o período T = 7 e subperíodos de 121 a 140

Período de produção T = 7 (sétimo dia)																				
Horário	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30
Subperíodos =	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140
7 DIAS																				
Sabor_1	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Sabor_2																				
Sabor_3																				
Sabor_4																				
Sabor_5																				
14 DIAS																				
Sabor_1																				
Sabor_2					200	200	200	200	200											
Sabor_3																				
Sabor_4										200	200	200	200	200	200					
Sabor_5	200	200	200																	

Fonte: Elaborado pelo autor com dados extraídos do CPLEX após execução do modelo desenvolvido.

Tabela 19 – Programação da produção para o período T = 8 e subperíodos de 141 a 160

Período de produção T = 8 (oitavo dia)																				
Horário	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30
Subperíodos =	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160
14 DIAS																				
Sabor_1																				
Sabor_2										200	200	200	200	200	200	200				
Sabor_3	200	200	200	200																
Sabor_4																				
Sabor_5																				

Fonte: Elaborado pelo autor com dados extraídos do CPLEX após execução do modelo desenvolvido.

Tabela 20 – Programação da produção para o período T = 9 e subperíodos de 161 a 180

Período de produção T = 9 (nono dia)																				
Horário	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30
Subperíodos =	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180
14 DIAS																				
Sabor_1	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200						
Sabor_2																				200
Sabor_3																				
Sabor_4																				
Sabor_5																				

Fonte: Elaborado pelo autor com dados extraídos do CPLEX após execução do modelo desenvolvido.

Tabela 21 – Programação da produção para o período T = 10 e subperíodos de 181 a 200

Período de produção T = 10 (décimo dia)																				
Horário	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30
Subperíodos =	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200
14 DIAS																				
Sabor_1	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200								
Sabor_2																				
Sabor_3																				
Sabor_4																				
Sabor_5																				

Fonte: Elaborado pelo autor com dados extraídos do CPLEX após execução do modelo desenvolvido.

Tabela 22 – Programação da produção para o período T = 11 e subperíodos de 201 a 220

Período de produção T = 11 (décimo primeiro dia)																				
Horário	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30
Subperíodo s =	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140
14 DIAS																				
Sabor_1	200	200	200	200	200	200	200	200	S											
Sabor_2									E							200				
Sabor_3									T											
Sabor_4									U								200	200	200	200
Sabor_5									P	200	200	200	200	200	200					

Fonte: Elaborado pelo autor com dados extraídos do CPLEX após execução do modelo desenvolvido.

Tabela 23 – Programação da produção para o período T = 12 e subperíodos de 221 a 240

Período de produção T = 12 (décimo segundo dia)																				
Horário	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30
Subperíodo s =	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140
14 DIAS																				
Sabor_1								S					S	200	200	200	200	200	200	200
Sabor_2		200	200	200	200	200		E				E								
Sabor_3								T	200	200	200	T								
Sabor_4							200	U				U								
Sabor_5	200							P				P								

Fonte: Elaborado pelo autor com dados extraídos do CPLEX após execução do modelo desenvolvido.

Tabela 24 – Programação da produção para o período T = 13 e subperíodos de 241 a 260

Período de produção T = 13 (décimo terceiro dia)																				
Horário	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30
Subperíodo s =	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140
14 DIAS																				
Sabor_1													S	200	200	200	200	200	200	200
Sabor_2		200	200	200	200	200	200						E							
Sabor_3													T							
Sabor_4								200	200	200	200	200	U							
Sabor_5	200												P							

Fonte: Elaborado pelo autor com dados extraídos do CPLEX após execução do modelo desenvolvido.

Tabela 25 – Programação da produção para o período T = 14 e subperíodos de 261 a 280

Período de produção T = 14 (décimo quarto dia)																				
Horário	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30
Subperíodo s =	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140
14 DIAS																				
Sabor_1																				
Sabor_2	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200					S	200	200	200	200
Sabor_3																E				
Sabor_4													200	200	200	T				
Sabor_5																U				
																P				

Fonte: Elaborado pelo autor com dados extraídos do CPLEX após execução do modelo desenvolvido.

CAPÍTULO 7: CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS

O presente estudo teve como objetivo planejar e programar a produção de sorvetes, considerando a etapa mais restritiva do processo e visando a maximização da produção. Foi realizada uma adaptação do modelo matemático de otimização GLSPST (*General Lot sizing and Scheduling Problem with Sequence dependent Setup Times*) para uma máquina e múltiplos itens proposto por Meyr (2000). Para identificar a etapa mais restritiva, foi analisado o fluxograma de produção de sorvete com as respectivas capacidades.

A modelagem matemática proposta leva em conta as particularidades da fábrica investigada e, além disso, como o objetivo do estudo é maximizar a produção do processo mais restritivo, foi realizada uma alteração na função objetivo, que no modelo padrão minimiza custos, para uma nova função objetivo que maximiza a produção.

Utilizando parâmetros e dados que simulam a realidade da fábrica, e apresentando uma variação de classes para realização dos testes, os resultados evidenciam um aumento significativo da produção quando comparada com o cenário atual da empresa. Nos testes com 10 sabores para 7 dias, foi possível obter uma produção média diária de 3.800 potes de 2 litros por dia, enquanto que no cenário atual a empresa investigada consegue produzir apenas 2.800 unidades.

Os resultados obtidos, bem como a programação do processo apresentada na Seção 6.3, podem trazer diversos benefícios para a fábrica investigada. Por exemplo, o pessoal responsável pelo planejamento e controle de produção pode, dentro de um horizonte de planejamento, parametrizar os limites de estoques evitando as faltas e os excessos. As tabelas de planejamento, como aquelas apresentadas na Seção 6.3, poderiam ser expostas na fábrica, permitindo uma gestão à vista do programa de produção.

A competitividade e a geração de receitas da fábrica podem ser beneficiadas, uma vez que ela estará disponibilizando um melhor nível de serviço devido a melhor disponibilidade de produtos para pronta-entrega, direcionando ações comerciais para que os produtos sejam colocados no mercado.

Outro ganho que pode ser evidenciado é a possibilidade de programação da área de suprimentos, uma vez que, com a produção programada para os próximos sete ou

quatorze dias, tornam-se conhecidos os consumos de insumos, embalagens e matéria-prima, melhorando assim o desempenho e negociações junto aos fornecedores.

O presente estudo contribui para a literatura, propondo uma abordagem para o planejamento e programação da produção em uma fábrica de sorvetes, a partir da adaptação do modelo GLSPST, voltada para a maximização da produção.

Embora não tenha interferência no resultado apresentado, vale destacar algumas dificuldades para obtenção de certos dados da fábrica. Outra limitação da pesquisa foi o *hardware* (computador) utilizado para executar o modelo, que apresentou falta de memória, interrompendo a execução do modelo em tempos maiores. Um *hardware* mais atualizado e potente poderia proporcionar resultados melhores até mesmo para os testes das classes onde foram definidos limites de tempos. Por fim, apesar de apresentar os resultados matematicamente satisfatórios e ser validado positivamente por um dos diretores da fábrica investigada, não foi possível acompanhar a utilização do resultado na prática.

Para estudos futuros, além das sugestões apresentadas no início desta seção, propõe-se aplicar o modelo GLSPST maximizando a produção em outros casos reais, realizando as adaptações necessárias de acordo com as particularidades de cada fábrica investigada. Implementações dos resultados calculados também permitiriam validar a aplicabilidade dos modelos desenvolvidos na gestão de fábricas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIS. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE INDÚSTRIAS DE SORVETES. **ABIS**, 2016. Disponível em: <<http://www.abis.com.br/estat.asp>>. Acesso em: 07 Agosto 2017.
- ALMADA-LOBO, B.; OLIVEIRA, J. F.; 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.
- ANTHONY, R. N. Planning and Control Systems: a Framework for Analysis. **Harvard University**, 1965.
- ARAÚJO, S. A. D.; RANGEL, M. S. N. **Matemática Aplicada ao Planejamento da Produção**. In: Sociedade de Matemática Aplicada e Computacional - SBMAC. [S.l.]: [s.n.], v. 76, 2014.
- ARAÚJO, S.; ARENALES, M.; CLARK, A. Joint rolling-horizon scheduling of materials processing and lot-sizing with sequence-dependent setups. **Journal of Heuristics**, v. 13, n. 4, p. 337–358, 2007.
- ARBUCKLE, W. S. **Ice cream**. 3rd. ed. Westport: [s.n.], 1977. 517 p.
- ARENALES, M. et al. **Pesquisa Operacional**. 2^a. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2007.
- BALDO, T. A. et al. An optimization approach for the lot sizing and scheduling problem in the brewery industry. **Computers & Industrial Engineering**, v. 12, p. 58–71, 2014.
- BERALDI, P. et al. Rolling-horizon and fix-and-relax heuristics for the parallel machine lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent set-up costs. **Computers and Operations Research**, v. 35, p. 3644-3656, 2008.
- BONGERS, M. M.; BAKKER, B. H. Application of multi-stage scheduling. **16th European Symposium on Computer Aided Process Engineering and 9th International Symposium on Process Systems Engineering**, Boston, p. 1917–1922, 2006.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria n. 379, de 26 de abril de 1999. Aprova o regulamento técnico referente a gelados comestíveis, preparados, pós para o preparo e bases para gelados comestíveis. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. **Agência Nacional de Vigilância Sanitária**, Brasília, 29 abril 1999. Disponível em: <<http://www.anvisa.org.br>>. Acesso em: 17 agosto 2017.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Resolução n. 266, de 22 de setembro de 2005. Regulamento técnico para gelados comestíveis e preparados para gelados comestíveis. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. **Agência Nacional de Vigilância Sanitária**, setembro 23 2005. Disponível em: <<http://www.anvisa.org.br>>. Acesso em: 17 agosto 2017.
- CORRÊA, H. L.; GIANESI, I. G. N.; CAON, M. **Planejamento, programação e controle da produção: MRPII/ERP**. São Paulo: Atlas, 1997.
- DREXL, A.; KIMMS, A. Lot Sizing and Scheduling – Survey and Extensions. **European Journal of Operational Research**, v. 99, p. 221-235, 1997.

- EARLY, R. **Tecnologia de los productos lácteos**. Zaragoza: Acribia, 2000. 459 p.
- FERREIRA, D.; MORABITO, R.; RANGEL, S. Solution approaches for the soft drink integrated production lot sizing and scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, 2008.
- FIGUEIRA, G.; SANTOS, M. O.; ALMADA-LOBO, B. A hybrid VNS approach for the short-term production planning and scheduling: A case study in the pulp and paper industry. **Computers & Operations Research**, v. 40, n. 7, p. 1804–1818, 2013.
- FLEISCHMANN, B.; MEYR, H. The general lotsizing and scheduling problem. **Operations Research Spektrum**, v. 19, n. 1, p. 11–21, 1997.
- GUNN, E. A. et al. Scotsburn Dairy Group Uses a Hierarchical Production Scheduling and Inventory Management System to Control Its Ice Cream Production. **Interfaces**, v. 44, n. 3, 2014.
- GUPTA, M. Constraints management: Recent advances and practices. **International Journal of Production Research**, v. 41, n. 4, p. 647-659, 2003.
- HAX, A.; CANDEA, D. **Production and Inventory Management**. New Jersey: PrenticeHall, 1983.
- JOHNSON, L. A.; MONTGOMERY, D. C. **Operations research in production planning, scheduling and inventory control**. New York: John Wiley & Sons, 1974.
- KARIMI, B.; FATEMI GHOMI, S. M. T.; WILSON, J. M. The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms. **Omega**, v. 31, n. 5, p. 365–378, 2003.
- KAWAMURA, M. S.; RONCONI, D. P. Aplicação da Heurística Relax-and-Fix no Problema de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes de Produção em Máquinas Distintas em Paralelo. **XLII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2010, Bento Gonçalves**, v. 1, p. 1-12, 2010.
- KOPANOS, G. M. et al. An Efficient Mathematical Framework for Detailed. **21st European Symposium on Computer Aided Process Engineering**, 2011.
- LANG, J. C.; SHEN, Z. J. M. Fix-and-optimize heuristics for capacitated lot-sizing with sequence dependent setups and substitutions. **European Journal of Operational Research**, v. 214, n. 3, p. 595–605, 2011.
- LUCHE, J. R. D.; MORABITO, R.; PUREZA, V. Combining process selection and lot sizing models for production scheduling of electrofused grains. **Asia-Pacific Journal of Operational Research**, v. 26, n. 3, p. 421–443, 2009.
- MARSHALL, R. T.; ARBUCKLE, W. S. **Ice cream**. 5th. ed. New York: International Thomson, 1996. 349 p.
- MATEUS, G. et al. Capacitated lot sizing and sequence dependent setup scheduling: an iterative approach for integration. **Springer Science+Business Media**, 2009.
- MEYR, H. Simultaneous lotsizing and scheduling by combining local search with dual reoptimization. **European Journal of Operational Research**, v. 120, p. 311-326, 2000.
- MEYR, H. Simultaneous lotsizing and scheduling on parallel machines. **European Journal of Operational Research**, v. 139, p. 277-292, 2002.

- MEYR, H.; MANN, M. A decomposition approach for the general lotsizing and scheduling problem for parallel production lines. **European Journal of Operational Research**, v. 229, n. 3, p. 718–731, 2013.
- PINEDO, M. **Scheduling Theory, Algorithms and Systems**. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- POCHET, Y.; WOLSEY, L. **Production Planning by Mixed Integer Programming**. New York: Springer, 2006.
- QUADT, D.; KUHN, H. Capacitated lot-sizing with extensions: a review. **4OR – A Quarterly Journal of Operations Research**, v. 6, n. 1, p. 61-83, 2009.
- SALOMON, M. et al. Solving the discrete lotsizing and scheduling problem with sequence dependent setup costs and setup times using the travelling salesman problem with time windows. **European Journal of Operational Research**, v. 100, n. 3, p. 494–513, 1997.
- SANTOS, M. O.; ALMADA-LOBO, B. Integrated pulp and paper mill planning and scheduling. **Computers & Industrial Engineering**, v. 63, n. 1, p. 1–12, 2012.
- SAWYER, W. H. Complex between β -lactoglobulin and κ -casein: a review. **J. Dairy Science**, v. 52, n. 9, p. 1347-1363, 1969.
- SEEANNER, F.; ALMADA-LOBO, B.; MEYR, H. Combining the principles of variable neighborhood decomposition search and the fix&optimize heuristic to solve multi-level lot-sizing and scheduling problems. **Computers & Operations Research**, v. 40, n. 1, p. 303–317, 2013.
- SENGE, P. M. **The Fifth Discipline – The Art and Practice of the Learning Organisation**. New York: Doubleday, 1990.
- SILVA, K.; BOLINI, H. M. A. Avaliação sensorial de sorvete formulado com produto de soro ácido de leite bovino. **Ciência e Tecnologia Alimentar**, v. 1, n. 26, p. 116-122, 2006.
- SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2002.
- TOLEDO, C. F. M. et al. Multi-population genetic algorithm to solve the synchronized and integrated two-level lot sizing and scheduling problem. **International Journal of Production Research**, v. 47, n. 11, p. 3097–3119, 2009.
- TOLEDO, C. F. M. et al. A memetic framework for solving the lot sizing and scheduling problem in soft drink plants. In: CHIONG, R.; WEISE, T.; MICHALEWICZ, Z., eds. Variants of Evolutionary Algorithms for Real-World Applications. **Springer**, p. 59–93, 2012.
- TOSO, E. A. V.; MORABITO, R.; CLARK, A. R. Combinação de abordagens GLSP e ATSP para o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção de suplementos para nutrição animal. **Pesquisa Operacional**, v. 28, n. 3, p. 423–450, 2008.
- TOSO, E.; MORABITO, R. Otimização no dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção: estudo de caso numa fábrica de rações. **Gestão & Produção**, v. 12, n. 2, p. 203-217, 2005.

- TOSO, E.; MORABITO, R.; CLARK, A. Lot-sizing and sequencing optimisation at an animal-feed plant. **Computers and Industrial Engineering**, 2009.
- TRIGEIRO, W. W.; THOMAS, L. J.; MCCLAIN, J. O. Capacitated lot sizing with setup times. **Management Science**, v. 35, n. 3, p. 353–366, 1989.
- TURNBOW, G. D.; TRACY, P. H.; RAFFETTO, L. A. **The ice cream industry**. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1947. 381 p.
- VOLLMANN, T. E.; BERRY, W. L.; WHYBARK, D. Integrated production and inventory management. **Business One Irwin**, 1993.
- WAGNER, H. M.; WHITIN, T. M. Dynamic version of the economic lot size model. **Management Science**, v. 5, n. 1, p. 89–96, 1958.
- WARI, E.; ZHU, W. Multi-week MILP scheduling for an ice cream processing facility. **Computers and Chemical Engineering**, v. 94, p. 141-156, 2016.
- YU, B.; WRIGHT, D. T. Software tools supporting business process analysis and modeling. **Business Process Management Journal**, v. 3, n. 2, p. 133-142, 1997.
- ZHU, X.; WILHELM, W. E. Scheduling and lot sizing with sequence-dependent setup: A literature review. **IIE Transactions**, v. 38, p. 987-1007, 2006.