UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação

Modelos matemáticos para planejamento da produção em indústrias de embalagens de vidro

Flaviana Moreira de Souza Amorim

Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciências de Computação e Matemática Computacional (PPG-CCMC)

SERVIÇO DE PÓS-GRADUAÇÃO DO ICMC-USP

Data de Depósito:

Assinatura: _____

Flaviana Moreira de Souza Amorim

Modelos matemáticos para planejamento da produção em indústrias de embalagens de vidro

Tese apresentada ao Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação – ICMC-USP, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Ciências – Ciências de Computação e Matemática Computacional. *VERSÃO REVISADA*

Área de Concentração: Ciências de Computação e Matemática Computacional

Orientador: Prof. Dr. Claudio Fabiano de Motta Toledo

USP – São Carlos
Agosto de 2019

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Achille Bassi
e Seção Técnica de Informática, ICMC/USP,
com os dados inseridos pelo(a) autor(a)

A524m Amorim, Flaviana Moreira de Souza
Modelos matemáticos para planejamento da produção
em indústrias de embalagens de vidro / Flaviana
Moreira de Souza Amorim; orientador Claudio Fabiano
Motta Toledo. -- São Carlos, 2019.
125 p.

Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em
Ciências de Computação e Matemática Computacional) --
Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação,
Universidade de São Paulo, 2019.

1. Modelagem matemática. 2. Problemas nas
indústrias de embalagens de vidro. 3.
Dimensionamento de lotes. 4. Planejamento da
produção. 5. Meta-heurísticas. I. Toledo, Claudio
Fabiano Motta, orient. II. Título.

Flaviana Moreira de Souza Amorim

**Mathematical models for production planning in the glass
container industry problems**

Thesis submitted to the Institute of Mathematics
and Computer Sciences – ICMC-USP – in
accordance with the requirements of the Computer
and Mathematical Sciences Graduate Program, for
the degree of Doctor in Science. *FINAL VERSION*

Concentration Area: Computer Science and
Computational Mathematics

Advisor: Prof. Dr. Claudio Fabiano de Motta Toledo

USP – São Carlos
August 2019

*Este trabalho é dedicado ao meu primogênito
Daniel Amorim Moreira (DAM-DAM!)
e aos seus irmãos que virão.*

AGRADECIMENTOS

Ao onipotente e soberano criador, SENHOR JEOVÁ, por me dá ânimo, força e coragem para superar todas as dificuldades físicas e mentais neste período de doutoramento.

À minha forte mãe *Emerinda Moreira de Souza* por passar nove meses me gerando e permitir que eu viesse a este mundo. Ensinando-me o quanto uma mulher pode ser independente e forte. Ao meu pai, *Francisco Alves de Souza*, por ser um engenheiro nato e um excelente autodidata.

A todos os professores que influenciaram na minha educação, no meu aprendizado e na minha vida acadêmica.

À antiga creche C.S.U. na cidade de Umarizal/RN, em especial, a professora Estela.

À Escola Municipal Tancredo Neves na cidade de Umarizal/RN. Em especial, as minhas maravilhosas professoras do Ensino Fundamental 1 (primário):

- Margarida Oliveira e Loira (Henedina Maria de Freitas) - 1ª série;
- Delvaci Câmara - 2ª série;
- Maria Audenora da Silva Fernandes e Débora Maciel da Silva - 3ª série;
- Elzinha (Josefa Maria Alves) - 4ª série.

À Escola Estadual 11 de Agosto (EE11A) na cidade de Umarizal/RN. Em especial, aos professores do Ensino Fundamental 2 (ginásio): Alderina, Aécio, Arlene, Cleide, Clezia, Eunice, Lúgia e Socorrinha. Aos professores do Ensino Médio: Chiquitinho (*in memoriam*), Crismar, Lucinha (*in memoriam*), Dona Neide, Neuzinha, Obelaide e Zezé.

À Rita Barbosa por todos os excelentes livros didáticos enviados como presentes da região sudeste ao nordeste do Brasil, com todo carinho. Ao meu cunhado Adalberto por ter ido pessoalmente me conhecer na escola EE11A, com as mãos cheias de bons livros para estudar para o vestibular. Sou muito grata por me ajudar a realizar o sonho de vencer na vida por meio dos estudos.

À Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (UERN) na cidade de Patu/RN. Em especial, aos meus mestres: Brismark, Fernandes e Walter.

À Faculdade Integrada de Patos, em especial, ao mestre Ricardo Brás.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) na cidade de Belo Horizonte/MG. Em especial, aos meus eternos orientadores: Moacir França e Sérgio Ricardo.

À Universidade de São Paulo (USP) e ao Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação (ICMC) na cidade de São Carlos/SP, por me proporcionar a oportunidade de ter acesso ao melhor ensino brasileiro. Aos professores da USP, em especial, aos professores do ICMC, pelos ensinamentos transmitidos.

Aos professores Claudio Toledo e Bernardo Almada-Lobo, pela excelente orientação e ensinamentos, que foram de grande relevância para a realização deste trabalho e para o meu crescimento profissional. Ao professor Bernardo, que foi muito generoso para comigo, compartilhando muitas ideias sobre a área de indústrias de embalagens de vidro, motivando-me a buscar indústrias brasileiras para que a pesquisa fosse realizada com consistência. Ao professor Claudio, que no início mostrou-se tão rígido, mas no final apresentou-se como um verdadeiro pai, sabendo o momento certo de exigir e de afagar.

Aos colegas do Laboratório de Computação Reconfigurável (LCR): Alessandro, André, Claudio, Erinaldo (Maria e Liana), Fati, Fernanda, Julian, Karla, Leandro's, Luiz, Marci, Rafael's, Valéria e Verônica.

Aos integrantes do Laboratório de Otimização (LOt) que tive o prazer de conhecer: Alfredo, Aline, Carol, Everton, Furlan, Márcio Belo, Leandro, Vanessa e Willy.

Às funcionárias da biblioteca do ICMC, pelas inúmeras assistências técnicas, com as teses, os artigos e os livros: Ana, Irene, Maria e Regina.

Sou muito grata a Deus por colocar em minha vida pessoas que me ajudaram a não perder as esperanças, tornando esse doutorado possível e, principalmente, quantitativo e qualitativo. Ao Alexandre, por ter compartilhado o seu conhecimento sobre o chão de fábrica. À Carol, pelo forte incentivo a gerar também este “filho”, a tese. Ao Gianini, que recebeu-me tão bem nas visitas técnicas e ajudou-me de todas as formas dentro da empresa. Ao Jesimar, pelos ensinamentos sobre a qualidade e o impacto de uma boa imagem, além das revisões textuais. À Magna, que chegou no final para dá um gás e continuar a pesquisa. Ao Márcio, pelo auxílio com vários dos meus questionamentos. Ao Patrick, que fez um trabalho manual incrível, preenchendo várias planilhas que facilitaram minha pesquisa, principalmente para gerar as últimas instâncias. Ao Pierre, o estrangeiro mais simpático que conheci, recebeu-me em sua residência para conhecer o meu trabalho e colaborar fortemente com ele; além de, ajudar-me com várias dúvidas práticas. Ao Rodrigo, pelas informações finais que confirmaram a qualidade e a importância dessa pesquisa acadêmica na indústria de fabricação de ampolas.

Às Famílias que Deus me deu... Agradeço especialmente à minha família de carne, sangue e coração: minha irmã Fabiana, minha sobrinha Gabi e ao meu irmão Felipe, por não limitarem meus sonhos. Aos irmãos na fé, da Casa de Oração Igreja de Cristo em Umarizal/RN

(Pr. Aluísio e Keyliane), Igreja Geração de Cristo em São Carlos/SP (Pr. Admilton e Edinha) e Igreja Verbo da Vida em Mossoró/RN (Pr. Jackson e Aurélia).

Agradeço profundamente à minha família de amigos, principalmente, a Marcela e o Dênis, por me acolherem e cuidarem tão bem de mim, só Deus os pagará (e a Lavínia também). A Érika por todo cuidado com minha saúde física; você é uma inspiração! Ao meu grande amigo Márcio Arantes, pelos valiosos ensinamentos em qualquer dia e hora. Ao irmão Valdemar, pelos conselhos bíblicos. A Tatiane pela companhia em momentos especiais, como a descoberta da gravidez. Ao Herbert, pelos domingos de pizzas pós cultos. Às minhas amigas: Denizia, Jaqueline, Larissa e Lillian, pelos incentivos e conversas. Aos meus amigos: Aline, Cleyton, Elizoneide, Kallyedson, Isabel e Mayra, pelas correções no texto.

À minha amiga Ale por sempre tirar minhas dúvidas de estatística, que são muitas.

À minha amiga mais que especial, enviada por Deus, Daiane, pelas horas infindas de colaborações textuais e conversas remidoras.

À minha melhor amiga Narcisia, pelas inúmeras longas conversas e conselhos via celular, capazes de salvar minha vida literalmente.

Quero fazer um destaque e agradecer especialmente ao *Raimundo Gomes de Amorim Neto*, que faz parte da minha vida desde 1997, tendo colaborado diretamente em minha vida pessoal e acadêmica. Ele me fez acreditar que eu seria capaz de “terminar meus estudos” em qualquer instituição que eu desejasse. Além de dirigir incansavelmente para todas as indústrias, nas quais foram realizadas as visitas técnicas durante este doutorado. E a melhor parte dele, ele me deu colaborando 50% na geração do melhor de nós, que é o *Daniel Amorim Moreira*, nosso primogênito. Gerado após nossas esperanças estarem escassas, mas nossa Fé continuava firme em Deus.

DAM, mamãe também lhe agradece por ser sempre compreensivo em deixar-me pesquisar/trabalhar e por você aprender junto comigo todos os “processos” necessários para concluir esse doutorado. Ser sua mãe é, e sempre será meu maior presente nessa vida passageira. Obrigada Por Vocês Existirem em minha vida!

À banca pelas valiosas sugestões no texto e pelos elogios ao trabalho desenvolvido.

Ao Centro de Ciências Matemáticas Aplicadas à Indústria (CeMEAI) pela disponibilização dos recursos computacionais, financiados pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), sob protocolo 2013/07375-0.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro concedido para a realização desta pesquisa (código de financiamento 001).

Meu sincero MUITO OBRIGADA!

*“Meu talento é muito menor
do que meu esforço.”
(Leonardo Gonçalves)*

RESUMO

AMORIM, F. M. S. **Modelos matemáticos para planejamento da produção em indústrias de embalagens de vidro**. 2019. 125 p. Tese (Doutorado em Ciências – Ciências de Computação e Matemática Computacional) – Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2019.

Esta tese de doutorado apresenta modelos matemáticos de problemas de dimensionamento de lotes para planejamento da produção na indústria de embalagens de vidro, que são essenciais em qualquer cadeia de produção, pois são responsáveis por proteger e conservar os produtos (alimentos e bebidas). Na literatura científica são raros os trabalhos que abordam estudos sobre problemas combinados de dimensionamento de lotes e planejamentos da produção em indústrias de embalagens de vidro. Com a finalidade de preencher esta lacuna, a presente tese tem por objetivo propor modelos inéditos e métodos de resolução aplicáveis em problemas nas indústrias de embalagens de vidro. Dessa forma, propõem-se dois modelos baseados em problemas reais para a construção ou reforma de forno(s), denominados de *Problema de Instalação de um Novo Forno* e *Problema de Instalação de Múltiplos Fornos*, que verificam a capacidade de fusão e as configurações das máquinas instaladas. Outros dois modelos são desenvolvidos a partir de estudos de casos referentes ao planejamento e ao controle da produção de ampolas de garrafas térmicas. No primeiro estudo, considera-se o máximo da produção líquida e no segundo, minimiza-se os *set-up*, sendo que em ambos os casos a realidade de uma fábrica é refletida. A complexidade desses modelos contribui para o uso de métodos heurísticos e meta-heurísticos como técnicas para resolução dos mesmos. No entanto, considera-se também a avaliação da associação desses métodos ao uso de programação matemática. Para isso, modelos matemáticos são propostos dentro do contexto das indústrias consideradas. Desta forma, uma heurística de Filtro Guloso e as meta-heurísticas como o Algoritmo Genético Simples, o Algoritmo Genético Multi-Populacional e o Algoritmo Genético Modificado são utilizados na determinação das variáveis inteiras presentes nos modelos matemáticos. Além disso, utiliza-se um método exato, por meio da ferramenta CPLEX, para determinar as variáveis contínuas. Os estudos são conduzidos a partir de dados fornecidos por indústrias localizadas no Brasil e em Portugal. Portanto, os resultados colaboram com o estado da arte nessa área de pesquisa e com o processo de fabricação industrial de embalagens de vidro.

Palavras-chave: Modelagem matemática, Planejamento da produção, Problemas nas indústrias de embalagens de vidro, Heurísticas, Meta-heurísticas.

ABSTRACT

AMORIM, F. M. S. **Mathematical models for production planning in the glass container industry problems**. 2019. 125 p. Tese (Doutorado em Ciências – Ciências de Computação e Matemática Computacional) – Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2019.

This doctoral dissertation presents mathematical models of lot-sizing problems for production planning in the glass containers industry, which are essential in any production chain, as they are responsible for protecting and conserving products (food and beverages). In the scientific literature, studies addressing combined problems of batch sizing and production planning in glass containers industries are rare. In order to fill this gap, this thesis aims to propose novel models and resolution methods applicable to problems in the glass containers industry. Thus, we propose two models based on real problems for the construction or remodelling of the furnace (s), called *New Furnace Installation Problem* and *Multiple Furnace Installation Problem*, which verify fusibility and configurations of installed machines. We developed two other models from case studies regarding the planning and control of the production of thermos vials. In the first study, we consider the maximum net production; in the second, we minimize the set-up. Both cases reflect the reality of a factory. The complexity of these models contributes to the use of heuristic and metaheuristic methods as techniques for their resolution. However, we also consider the evaluation of the association of these methods with the use of mathematical programming. For this, we propose mathematical models within the context of the considered industries. Thus, a Greedy Filter heuristic and metaheuristics such as the Simple Genetic Algorithm, the Multi-Population Genetic Algorithm and the Modified Genetic Algorithm are used to determine the integer variables present in mathematical models. Besides, we use an exact method from CPLEX tool to determine continuous variables. The studies are conducted from data provided by industries located in Brazil and Portugal. Therefore, the results collaborate with state of the art in this research area and with the industrial glass containers manufacturing process.

Keywords: Mathematical modeling, Production planning, Glass container industry problems, Heuristics, Meta-heuristics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Foto do processo artesanal da fabricação de embalagens de vidro.	28
Figura 2 – Exemplo do processo da produção do vidro.	28
Figura 3 – Exemplo do chão de fábrica.	29
Figura 4 – Ciclo da fabricação de embalagens de vidro.	37
Figura 5 – Distribuição geográfica das indústrias de embalagens de vidro associadas a ABIVIDRO.	38
Figura 6 – Exemplos de plantas industriais de embalagens de vidro.	39
Figura 7 – Exemplos de fornos regenerativo e recuperativo.	40
Figura 8 – Exemplo de forno elétrico.	40
Figura 9 – Exemplo de forno com combustão a oxigênio puro.	41
Figura 10 – Descrição das zonas internas do forno que realizam o processo de fusão. . .	42
Figura 11 – Exemplo de uma máquina IS.	43
Figura 12 – Exemplo da medida das distâncias entre os centros.	43
Figura 13 – Exemplo do processo BB.	44
Figura 14 – Exemplo do processo PB.	45
Figura 15 – Exemplo do processo completo da produção de embalagens.	46
Figura 16 – Exemplo do fluxo da cadeia de suprimento da produção de ampolas.	47
Figura 17 – Exemplo do processo de decisão sobre o novo forno.	59
Figura 18 – Exemplo de aceitabilidade dos produtos nas máquinas.	60
Figura 19 – Exemplo de dimensionamento de lotes dos produtos.	61
Figura 20 – Exemplo de configuração final do forno.	61
Figura 21 – Exemplo de planta com vários fornos.	63
Figura 22 – Exemplo da planta real da fábrica Z para ampolas.	67
Figura 23 – Demanda do PCP e a produção realizada em um trimestre.	67
Figura 24 – Refugo e eficiência durante um trimestre.	68
Figura 25 – Comportamento do <i>ramp-up</i> na produção real.	70
Figura 26 – O <i>ramp-up</i> real comparado com o modelado.	70
Figura 27 – Imagens das telas iniciais das ferramentas CPLEX e ProOf.	73
Figura 28 – Exemplo de uma estrutura em árvore.	84
Figura 29 – Exemplo de uma estrutura em grade.	84
Figura 30 – Operadores genéticos para o PINF.	85
Figura 31 – Inicialização para o PIMF.	86

Figura 32 – Operadores genéticos para o PIMF.	86
Figura 33 – Fluxograma do AGM.	88
Figura 34 – Exemplo de evolução no AGM.	89
Figura 35 – Impressão da tela da planilha com a ferramenta <i>Action</i>	90
Figura 36 – Resultados ordenados dos GAPs para instâncias de pequeno porte.	95
Figura 37 – Resultados ordenados dos tempos para instâncias de pequeno porte.	95
Figura 38 – Resultados ordenados dos tempos para instâncias de grande porte.	98
Figura 39 – Média das FOs para M100.	102
Figura 40 – Média dos tempos para M100.	102
Figura 41 – Melhores avaliações para M100.	103
Figura 42 – Solução representativa para M100.	103
Figura 43 – Média das FOs para P100.	104
Figura 44 – Média dos tempos para P100.	104
Figura 45 – Melhores avaliações para P100.	105
Figura 46 – Solução representativa para P100.	105
Figura 47 – FO e ganhos no planejamento operacional.	109
Figura 48 – Tempo no planejamento operacional.	109
Figura 49 – FO e ganhos no planejamento tático.	110
Figura 50 – Tempo no planejamento tático.	111
Figura 51 – FO e ganhos no planejamento estratégico.	112
Figura 52 – Tempo no planejamento estratégico.	112
Figura 53 – Resultado de um trimestre.	113
Figura 54 – Sequência do planejamento do PCP.	114
Figura 55 – Sequência do planejamento do CPLEX.	114
Figura 56 – Interseção dos planejamentos.	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Diversidade de vidros e suas aplicações.	36
Tabela 2 – Principais características dos fornos.	42
Tabela 3 – Notação matemática dos modelos PINF e PIMF.	58
Tabela 4 – Notação matemática dos modelos do EC1 e EC2.	66
Tabela 5 – Instâncias para o PINF.	74
Tabela 6 – Instâncias para o PIMF.	76
Tabela 7 – Instâncias para o EC1.	77
Tabela 8 – Instâncias para o EC2.	79
Tabela 9 – Valores dos parâmetros dos operadores.	94
Tabela 10 – O número de soluções ótimas por método.	94
Tabela 11 – Análise estatística dos GAPs para instâncias de pequeno porte.	96
Tabela 12 – Análise estatística dos tempos para instâncias de pequeno porte.	96
Tabela 13 – O número de soluções factíveis por métodos.	97
Tabela 14 – Análise estatística dos valores das FOs para as instâncias de grande porte.	98
Tabela 15 – Análise estatística para os tempos das instâncias de grande porte.	99
Tabela 16 – Valores dos parâmetros dos operadores.	100
Tabela 17 – Parâmetros do AGM.	100
Tabela 18 – Soluções obtidas.	100
Tabela 19 – Soluções dos métodos.	101
Tabela 20 – Médias dos GAPs.	101
Tabela 21 – Análise estatística das FOs.	106
Tabela 22 – Análise estatística dos tempos.	107
Tabela 23 – Análise estatística das avaliações.	107
Tabela 24 – Planejamento operacional.	108
Tabela 25 – Planejamento tático.	110
Tabela 26 – Planejamento estratégico.	111
Tabela 27 – Número de <i>set-up</i> por trimestre.	113

LISTA DE ALGORITMOS

Algoritmo 1 – Heurística de Filtro Guloso.	82
Algoritmo 2 – Algoritmo Genético Simples.	87
Algoritmo 3 – Algoritmo Genético Multi-Populacional.	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIVIDRO	Associação Brasileira das Indústrias de Vidro
AD	Anderson-Darling
AG	Algoritmo Genético
AGM	Algoritmo Genético Modificado
AGMP	Algoritmo Genético Multi-Populacional
AGMPa	Algoritmo Genético Multi-Populacional com estrutura Árvore
AGMPa-FG	Algoritmo Genético Multi-Populacional em estrutura de Árvore com heurística Filtro Guloso
AGMPg	Algoritmo Genético Multi-Populacional com estrutura Grade
AGMPg-FG	Algoritmo Genético Multi-Populacional em estrutura de Grade com heurística Filtro Guloso
AGS	Algoritmo Genético Simples
AGS-FG	Algoritmo Genético Simples com heurística Filtro Guloso
API	Application Programming Interface
B&C	Branch & Cut
BB	Blow and Blow
DG	Double-Gob
EC1	Estudo de Caso 1
EC2	Estudo de Caso 2
ECM	Eco-Care-Matrix
F&O	Fix-and-Optimize
FG	Filtro Guloso
FO	Função Objetivo
HB	Horizon-Based
ICMC	Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação
IDE	Integrated Development Environment
IEV	Indústrias de Embalagens de Vidro
IS	Individual Section
JFM	Janeiro+Fevereiro+Março
KW	Kruskal-Wallis
LI	Limite Inferior
LS	Limite Superior

NNPB	Narrow Neck Press and Blow
NS	Número de Seções
OPL	Optimization Programming Language
PB	Press and Blow
PCP	Planejamento e Controle da Produção
PIMF	Problema de Instalação de Múltiplos Fornos
PINF	Problema de Instalação de um Novo Forno
PL	Programação Linear
PLIM	Programação Linear Inteira Mista
ProOF	Professional Optimization Framework
QG	Quadruple-Gob
R&F	Relax-and-Fix
RINS	Relaxation Induced Neighborhood Search
SF	Solução Factível
SG	Single-Gob
SH	Simes-Hochberg
SO	Solução Ótima
SS	Sem Solução
TB	Tipos de Botas
TG	Triple-Gob
USP	Universidade de São Paulo
VNS	Variable Neighbourhood Search

SUMÁRIO

1	Introdução	27
1.1	Motivação	30
1.2	Objetivos	32
1.3	Metodologia	33
1.4	Organização da tese	33
2	Produção em Indústria de Embalagens de Vidro	35
2.1	Vidro: do surgimento às aplicações	35
2.2	O Processo da produção de embalagens de vidro	38
2.3	Visitas técnicas em indústrias brasileiras	47
2.4	Trabalhos relacionados	50
3	Formulações Matemáticas	57
3.1	Construção ou reforma de fornos e configurações de máquinas	57
3.1.1	<i>Problema de instalação de um novo forno</i>	58
3.1.2	<i>Problema de instalação de múltiplos fornos</i>	63
3.2	Planejamento e controle da produção de ampolas	65
3.2.1	<i>Estudo de caso 1</i>	66
3.2.2	<i>Estudo de caso 2</i>	70
4	Metodologia Adotada	73
4.1	Instâncias para os modelos	74
4.1.1	<i>Construção ou reforma de fornos e configurações de máquinas</i>	74
4.1.2	<i>Planejamento e controle da produção de ampolas</i>	76
4.2	Métodos aplicados aos modelos	79
4.2.1	<i>Exato</i>	79
4.2.2	<i>Heurística</i>	80
4.2.3	<i>Meta-heurísticas</i>	83

4.2.4	<i>Análises estatísticas</i>	89
5	Resultados	93
5.1	Construção ou reforma de fornos e configurações de máquinas	93
5.2	Planejamento e controle da produção de ampolas	108
6	Considerações Finais	115
6.1	Construção ou reforma de fornos e configurações de máquinas	115
6.2	Planejamento e controle da produção de ampolas	117
6.3	Perspectivas futuras	118
	Referências	119

INTRODUÇÃO

Na sociedade atual, as embalagens são essenciais em qualquer cadeia de produção, pois são responsáveis por proteger e conservar os produtos (alimentos, remédios, bebidas, entre outros). As embalagens podem ser confeccionadas de diversos materiais como metal (alumínio, aço), plástico, vidro e celulose (papel, papelão, *tetra-pak*). As embalagens de vidro se destacam por serem capazes de manter inalterados o sabor, o odor, a cor e a qualidade dos produtos, visto que o vidro é um material inerte, ou seja, não reage quimicamente com os produtos. Além disso, essas embalagens são versáteis (diversas formas, cores e tamanhos), práticas (podem ser levadas à mesa ou ao micro-ondas sem a necessidade de transferir o produto para outro recipiente e podem ser fechadas novamente, quando o produto não é consumido em sua totalidade), resistentes (suportam alterações térmicas) e atóxicas ([LANDIM et al., 2016](#); [CICLO VIVO, 2019](#)).

As Indústrias de Embalagens de Vidro (IEV) contribuem ambiental, social e economicamente, pois são *eco-friendly*. Logo, as IEV são aliadas do meio ambiente ao causar menos danos à natureza já que o vidro é 100% reciclável e ainda pode ser reciclado várias vezes. A federação europeia classifica 76% das suas embalagens de vidro como ecológicas. Além disso, as IEV europeias contribuem com 9.5 bilhões de euros ([FRIENDS OF GLASS, 2019](#)) no mercado, enquanto as IEV americanas aportam 5.5 bilhões de dólares ([GPI, 2019](#)). No Brasil, o valor bruto da produção física de embalagens, em geral, atingiu 57.2 bilhões de reais em 2015 e as embalagens de vidro correspondem a 4.84% deste valor ([ABRE, 2019](#)).

As embalagens de vidro são conhecidas no chão de fábrica como vidro oco. O processo artesanal de fabricação compreende a coleta de uma gota ou bola de vidro na ponta de um tubo de aço (a cana), ou canudo cilíndrico de metal. Um vidreiro sopra o ar pelo cano, formando assim a embalagem oca ou a forma que desejar ([ABRAVIDRO, 2019b](#)). O tubo utilizado pode ter um comprimento de até 1.5 m e este vidro oco soprado serve para fabricar peças artesanais ou em moldes como lâmpadas e garrafas ([INFOPÉDIA, 2019](#)). A [Figura 1](#) mostra este processo artesanal, com uma gota de vidro na ponta de um tubo sendo soprado por um vidreiro.

Figura 1 – Foto do processo artesanal da fabricação de embalagens de vidro.

Fonte: [Farias \(2019\)](#).

O processo de fabricação industrial de embalagens de vidro, desde o recebimento das matérias-primas até o armazenamento do produto final, consiste basicamente das três fases ilustradas na [Figura 2](#). A *primeira fase* (Figuras 2(a) - 2(c)) compreende o transporte, até a fábrica, das matérias-primas que constituem o vidro como a areia, a sílica (dióxido de silício- SiO_2 , oriundo, na maioria das vezes, do quartzo), a barrilha ou soda (carbonato de sódio- Na_2CO_3), o calcário (carbonato de cálcio- $CaCO_3$) e os cacos recicláveis. Na *segunda fase*, esses materiais são aquecidos em um forno ([Figura 2\(d\)](#)), a uma temperatura que pode chegar a $1600^{\circ}C$ ([LANDIM et al., 2016](#)), para que sejam misturados, formando um material homogêneo. Na *terceira fase*, esse material seguirá para uma máquina ([Figura 2\(e\)](#)) conectada ao forno para a moldagem do produto final que percorrerá o chão de fábrica até o estoque ([Figura 2\(f\)](#)). Segundo [Azinheira \(2014\)](#), o vidro é um material cerâmico que se define como todos os materiais inorgânicos não metálicos obtidos, geralmente, após o tratamento térmico a temperaturas elevadas.

Figura 2 – Exemplo do processo da produção do vidro.

Fonte: Elaborada pela autora.

Como prática comum nas fábricas de embalagens de vidro, as decisões sobre a construção ou reforma do forno são tomadas a partir das informações dos construtores que nem sempre

são os responsáveis pela conexão das máquinas ao mesmo. Logo, as decisões são tomadas de maneira independente, sem haver troca de informações entre os responsáveis pela construção do forno e os responsáveis pelas linhas de produção. Esse entendimento simples de planejar a construção ou reforma do forno pode desencadear alguns inconvenientes, como: (i) custo alto de instalação ou reforma do forno e (ii) capacidade de fusão do forno incompatível com as máquinas. Como consequência de (i) e (ii), o custo total da construção ou reforma do forno pode se tornar desnecessariamente alto, comprometendo a própria sobrevivência da fábrica. Essa situação é ainda mais grave quando o custo da instalação ou reforma de um forno representa uma parte financeira considerável para a indústria.

O planejamento da produção é utilizado na prática das indústrias pela comissão do Planejamento e Controle da Produção (PCP). Antes de se estabelecer o processo produtivo, o PCP deve tomar algumas decisões relativas às políticas de produção, estocagem e distribuição das embalagens ao longo do horizonte de planejamento. Esse horizonte pode ser composto por períodos de semanas, trimestres ou anos.

As demandas dos produtos, preliminarmente conhecidas, implicam no processo de decisão sobre os tipos e as quantidades de embalagens que são produzidas em cada período, com base na capacidade de derretimento do forno e extração das máquinas. Por exemplo, considere a [Figura 3](#) em que são apresentados vários tipos de embalagens de vidro como garrafas, potes, frascos de perfumaria, cosméticos, farmacêuticos e ampolas térmicas. Para fabricar cada tipo de recipiente, é necessário obter as informações específicas do produto como o tamanho, altura, volume, tipo de boca e cor. Além disso, as quantidades (em unidades) de cada tipo de produto são bem variadas e dependem do produto a ser produzido.

Figura 3 – Exemplo do chão de fábrica.

Fonte: Elaborada pela autora.

As características mencionadas são de problemas de dimensionamento de lotes para o planejamento da produção. Quando o problema de dimensionamento de lotes e o planejamento da produção são resolvidos conjuntamente, há uma tendência em se antecipar a produção de lotes de embalagens de períodos futuros, buscando reduzir o número de vezes que a máquina é preparada para troca de produtos (do inglês, *set-up*) ao longo do horizonte de planejamento. Na prática, antecipar a produção e estocar o produto pode ser uma estratégia mais interessante do que atrasar a produção e correr o risco de suspender o atendimento da demanda, uma vez que os atrasos nas entregas dos produtos impactam no nível de serviço da fábrica.

Nesse contexto, define-se a possibilidade de um tratamento do problema clássico de dimensionamento de lotes para o planejamento da produção no contexto da construção ou reforma de fornos, considerando simultaneamente a escolha das melhores configurações de máquinas associadas aos fornos. Além de abranger os fundamentos do planejamento da produção em estudos de casos reais, a principal motivação nos problemas é permitir que as decisões relativas ao dimensionamento de lotes para o planejamento da produção possam ser determinadas conjuntamente e, com isso, melhorar algum padrão de desempenho do processo nas indústrias desta área.

1.1 Motivação

O planejamento da produção é adotado pelo PCP para constituir políticas de produção, controle de estoque, distribuição e logística de vendas, com base nas informações de mercado e demanda dos clientes, e ainda respeitando todas as restrições que considere relevantes. As informações sobre diversos dados se tornam importantes para o planejamento da produção e necessárias para uma adequada modelagem do problema. Neste contexto, considerando o problema aqui abordado em uma IEV, duas hipóteses se destacam:

H1: Na construção ou reforma de fornos e configurações de máquinas temos conhecimento dos seguintes dados:

- Tipo e quantidade de forno para construir;
- Custo de cada construção;
- Capacidade de derretimento do forno;
- Quantidade de máquinas conectadas ao forno;
- Quantidade de seções da máquina;
- Tipo de boca a ser adotado nessas seções.

H2: No planejamento e controle da produção de ampolas, temos conhecimento dos seguintes dados:

- Qual *mix* de produção executar;
- Número de dias da produção;
- Estoque inicial e esperado do produto;
- Demanda do *mix* de produção;
- Extração dos produtos;
- Peso de cada produto;
- Custos de cada produto;
- Refugo na produção;
- *Set-up* entre os produtos;
- *Ramp-up* para cada produto.

Para confirmar a hipótese *H1*, tomou-se como exemplo o cenário encontrado em duas IEV no Brasil, ambas multinacionais de grande porte que foram visitadas e estudadas neste trabalho. A *primeira* indústria permitiu acesso direto a dois funcionários que foram muito prestativos e precisos nas respostas a questionários enviados a eles via *e-mail*. A *segunda* indústria visitada forneceu dados, porém são incompletos e os contatos seguintes não evoluíram como desejado. Em ambas, o planejamento da produção era feito na prática por meio de planilhas e mensurações com base em históricos. Todavia, os dados fornecidos nos convenceu a elaborar modelos matemáticos para o problema que possam reproduzir a realidade de chão de fábrica, mesmo que as soluções alcançadas não possam ser comparadas com a realidade por falta de informações. Por isso, a partir desses dados, foram geradas instâncias artificiais para o cenário produtivo visando testar os modelos propostos.

Na prática, a decisão sobre a quantidade de fornos que serão construídos ou reformados é tomada com base na planta onde o mesmo ficará. A quantidade de máquinas vinculadas ao forno depende das configurações adotadas quanto ao número de seções e o tipo de boca. Essas configurações de máquina dependem do modelo de máquina a ser adquirido e do volume de produção da fábrica. Em geral, os custos de construção do forno variam de acordo com o seu tipo e obedecem a um intervalo de valores pré-definido. O custo de instalação e a eficiência das máquinas também estão dentro de um intervalo de valores com custos específicos atribuídos a cada combinação possível de configurações para a máquina. As estratégias por trás da construção ou reforma de fornos podem gerar sérios problemas de capacidade de derretimento do mesmo e, assim, acarretar consequências no atendimento da demanda do *mix* de produtos. Isso acontece uma vez que a construção do forno é um dos recursos mais caros para uma IEV e deve ser feita com certa periodicidade, pois a durabilidade de um forno gira em torno de 15 anos. Por isso, se faz necessário um estudo para um planejamento estratégico mais eficiente, objetivando um efeito positivo na vida útil do forno.

Para corroborar com a hipótese *H2*, considera-se o exemplo de uma terceira visita técnica a uma indústria multinacional com uma planta industrial de pequeno porte no Brasil. O PCP é o principal setor dessa indústria e o processo de tomada de decisão é feito por meio dos históricos de informações sobre balanceamento de estoque e previsão de produção, importação, consumo (demanda) e duração de estoque em meses. A indústria executa um planejamento estratégico anual, seguido de um planejamento tático trimestral e um planejamento operacional semanal.

Dependendo das alterações no consumo, esses planejamentos sofrem mudanças de acordo com o estoque inicial e o estoque esperado do produto, visando atender a demanda do produto sem gerar um nível elevado de estoque. Além disso, produzir para estocar como estratégia, pode gerar um estoque custoso e indesejável de produtos que podem não ter tanta procura, acarretando custos significativos.

Analisando as indagações anteriores, a presente tese estuda problemas combinados de dimensionamento de lotes para o planejamentos da produção em indústrias de embalagens de vidro. Do ponto de vista teórico, o tema dessa tese envolve desafios por adotar modelagem matemática para otimização combinatória em problemas reais. Do ponto de vista prático, a elaboração desse estudo discutirá vários cenários de resultados que podem auxiliar o tomador de decisões no planejamento operacional, tático e/ou estratégico neste mercado competitivo das IEV.

1.2 Objetivos

O principal objetivo desta tese é propor modelos e métodos de resolução para os problemas nas indústrias de embalagens de vidro (IEV). Os métodos propostos são baseados na combinação de heurísticas e meta-heurísticas com técnicas de programação matemática. As meta-heurísticas são utilizadas na determinação de variáveis inteiras de modelos matemáticos, enquanto os métodos exatos são utilizados na determinação das variáveis contínuas.

A fim de atingir o objetivo geral, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- estudar problemas reais existentes em indústrias de embalagens de vidro, a partir de visitas técnicas realizadas em indústrias de fabricação de garrafa e ampolas térmicas;
- propor formulações matemáticas e métodos de solução para os problemas, através da combinação de dimensionamento de lotes para o planejamento da produção no contexto das indústrias de embalagens de vidro, sob o enfoque da Programação Linear (PL) clássica e Programação Linear Inteira Mista (PLIM);
- analisar os resultados computacionais a partir de uma vasta gama de cenários simulados com base em dados reais e em estudo de casos.

1.3 Metodologia

A presente tese utiliza a metodologia de Pesquisa Axiomática Quantitativa Normativa (MORABITO; PUREZA, 2012), pois é baseada na concepção de modelos de problemas idealizados (característica axiomática quantitativa), que estabelecem uma tomada de decisão para a elaboração de expressões algébricas para o problema de planejamento da produção de embalagens de vidro (característica normativa). Esse tipo de pesquisa é frequentemente utilizada na área de otimização combinatória, como no trabalho de Bertrand e Fransoo (2002).

1.4 Organização da tese

Este trabalho está estruturado em seis capítulos. No Capítulo 1, introduz-se o processo de fabricação de embalagens de vidro, descrevendo a motivação para esta pesquisa (Seção 1.1), os objetivos auferidos (Seção 1.2), a metodologia adotada (Seção 1.3) e a organização do trabalho (Seção 1.4).

No Capítulo 2 é apresentado o surgimento e as aplicações do vidro (Seção 2.1), o processo da produção de embalagens de vidro (Seção 2.2), o relato sobre as visitas técnicas realizadas em três fábricas brasileiras (Seção 2.3) e a revisão bibliográfica (Seção 2.4).

No Capítulo 3 são propostos os modelos de otimização para os problemas nas indústrias de embalagens de vidro, combinando o problema de dimensionamento de lotes para o planejamento da produção. As formulações sobre o problema de construção ou reforma de fornos e configurações de máquinas são apresentadas na Seção 3.1. Enquanto que, as características e os modelos para o planejamento e controle da produção de ampolas de garrafas térmicas são detalhadas na Seção 3.2.

No Capítulo 4 é retratada a metodologia adotada neste trabalho. Apresenta-se na Seção 4.1, os grupos de instâncias elaborados para avaliar cada modelo desenvolvido no Capítulo 3. Além disso, são descritos o método exato CPLEX, uma heurística de Filtro Guloso e as meta-heurísticas como o Algoritmo Genético Simples, o Algoritmo Genético Multi-Populacional e o Algoritmo Genético Modificado que serão utilizados na resolução dos modelos (Seção 4.2).

No Capítulo 5 são mostrados os resultados dos experimentos computacionais realizados com os modelos de construção ou reforma de fornos e configurações de máquinas (Seção 5.1) e de planejamento e controle da produção de ampolas (Seção 5.2).

No Capítulo 6 são discutidas as considerações finais sobre os modelos propostos para a construção ou reforma de fornos e configurações de máquinas (Seção 6.1) e para o planejamento e controle da produção de ampolas (Seção 6.2), enfatizando a contribuição científica em cada um deles e as perspectivas futuras para novas pesquisas (Seção 6.3).

PRODUÇÃO EM INDÚSTRIA DE EMBALAGENS DE VIDRO

Esse capítulo tem como propósito apresentar um breve histórico sobre o surgimento do vidro, desde a sua origem até a implantação das primeiras fábricas de vidro no Brasil. Além de descrever todas as etapas do processo da produção de embalagens de vidro, detalhando os tipos de fornos para a fabricação do vidro e as máquinas para a produção das embalagens. Em seguida, relata-se as experiências vivenciadas durante as visitas técnicas realizadas em indústrias brasileiras de embalagens de vidro. Por fim, apresenta-se uma revisão da literatura sobre os principais trabalhos relacionados com os problemas de planejamento e produção em indústrias de embalagens de vidro.

2.1 Vidro: do surgimento às aplicações

O vidro hoje é utilizado em diversas áreas, porém a explicação para sua origem possui várias teorias. A data mais provável seria por volta de 5.000 anos a.C. quando o homem teria produzido o vidro de forma espontânea. Atribui-se aos fenícios a descoberta accidental de um líquido transparente que seria o vidro. Os fenícios preparavam, a beira mar, suas refeições por meio de fogueira em que usavam blocos de nitrato de sódio como apoio. Segundo [FAU \(2015\)](#), o aquecimento do nitrato de sódio, que se fundia com a areia da praia, resultou no vidro.

Aos egípcios se atribui o uso do natrão que é um mineral composto por carbonato de sódio hidratado, utilizado no processo de mumificação. Também acredita-se que eles tenham aquecido o natrão próximo da areia e que a união destes materiais teria formado um material viscoso dando origem ao vidro. Além disso, os egípcios teriam iniciado a utilização do vidro como objetos artísticos e decorativos ([VIDROPORTO, 2015](#)).

Outros povos desenvolveram técnicas para moldar o vidro, como os romanos que o

soprava para confeccionar janelas. Porém, o maior desenvolvimento no uso deste material se deu durante a Revolução Industrial nos séculos XVIII e XIX, em toda Europa e Estados Unidos.

O vidro é definido como um material cerâmico obtidos após o tratamento térmico a altas temperaturas e distingue-se de outros cerâmicos por ser uma substância homogênea e amorfa (apresenta um arranjo atômico semelhante ao de um líquido e ordens atômicas de curtas distâncias) resultante de uma massa líquida a base de sílica, arrefecida até um estado rígido sem cristalização ([AZINHEIRA, 2014](#)).

Há diversidade de usos e tipos de vidros, partindo sempre da mesma base de composição, mas para finalidades distintas. A [Tabela 1](#) apresenta os tipos mais comuns de vidros e suas aplicações gerais.

Tabela 1 – Diversidade de vidros e suas aplicações.

Diversidade de Vidros	
Tipos	Aplicações
Vidros para embalagens	Garrafas, potes, frascos e outros vasilhames. Fabricados em vidro comum nas cores branca, âmbar ou verde.
Vidros planos	Vidros para janelas, de automóveis, fogões, geladeiras, micro-ondas, espelhos, etc .
Vidros domésticos	Tigelas, travessas, copos, pratos, panelas e produtos domésticos fabricados em diversos tipos de vidro.
Fibras de vidro	Mantas, tecidos, fios e outros produtos para aplicações de reforço ou de isolamento.
Vidros técnicos	Lâmpadas incandescentes ou fluorescentes, tubos de TV, vidros para laboratório, para ampolas, para garrafas térmicas, vidros oftálmicos e isoladores elétricos.

Fonte: [RECICLOTECA \(2015\)](#).

A permanência do vidro no mercado se deve tanto por sua diversidade de uso quanto por suas características próprias como transparência (permeável à luz), durabilidade, inalterabilidade, resistência, ópticas, acústicas, não absorção, isolante dielétrico, baixa condutividade térmica, recursos abundantes na natureza e reciclabilidade ([CEBRACE, 2015](#)).

O ciclo de fabricação de embalagens de vidro é representado na [Figura 4](#) onde se pode ver que esse processo é contínuo e permanente, pois inicia-se a partir dos cacos, seguindo para matérias-primas, fabricação, envase, embalagens, distribuição, consumo, coleta, limpeza e seleção, completando um ciclo que se repete com os cacos.

Figura 4 – Ciclo da fabricação de embalagens de vidro.

Fonte: Martins (2016).

A chegada do vidro ao Brasil foi possivelmente na “descoberta” de 1500, quando os pioneiros “presentearam” os índios com colares nos escambos. No século XVII, artesãos holandeses abriram uma oficina de vidro que fabricavam copos, frascos e janelas. Porém, ela foi fechada com a saída dos holandeses do Brasil (ABRAVIDRO, 2019a).

Desde então houve uma pausa na história da indústria de vidro no Brasil até o início do século XIX, quando é inaugurada uma fábrica de vidro em Salvador-BA que produzia vidros lisos, de cristal branco, frascos, garrações e garrafas. Neste mesmo século, houve a 1ª Exposição Nacional de Produtos Naturais e Industriais, em 1861, onde o vidro apareceu em forma de globos para lampiões (ABRAVIDRO, 2019a).

No século XIX, também foram fundadas várias fábricas, dentre elas a fábrica de Vidros e Cristais do Brasil em São Cristóvão, no Rio de Janeiro, que fabricava vidros para lampiões, janelas, copos e artigos de mesa (CEBRACE, 2015). Em 1882, foi criada uma fábrica produtora de embalagens, a *Fábrica Esbérald – Companhia de Vidros e Cristais*. Na mesma década foi inaugurada a Companhia Vidraria Santa Marina em São Paulo (ABRAVIDRO, 2019a).

No século XX as embalagens para bebidas e farmacêuticas começaram a ganhar o mercado do vidro. Em 1902, a fábrica *Fratelli Vita* é fundada na Bahia, produzindo garrafas de refrigerantes (CEBRACE, 2015). Em 1953, a fábrica pioneira de fabricação de frascos de penicilina é fundada em São Paulo, a *Wheaton*. Nesse mesmo ano, a fábrica passa a produzir outros frascos farmacêuticos para perfumaria e cosméticos.

Atualmente, existem oito indústrias vinculadas à Associação Brasileira das Indústrias de Vidro - ABIVIDRO (ABIVIDRO, 2019). Cada indústria possui pelo menos uma planta, como apresentado na Figura 5, em que são representadas a localização das indústrias de embalagens de

vidro que fazem parte da ABIVIDRO: a fábrica *Vidroporto* (Figura 5(a)) possui uma planta no estado de São Paulo; a fábrica *Verallia* (Figura 5(b)) possui três plantas, duas no estado de São Paulo e uma no estado do Rio Grande do Sul; a fábrica *Vidraria Anchieta* (Figura 5(c)) possui uma planta no estado de São Paulo; a fábrica *Schott do Brasil* (Figura 5(d)) possui uma planta no estado de São Paulo; a fábrica *Wheaton* (Figura 5(e)) possui uma planta no estado de São Paulo; a fábrica *Nadir Figueiredo* (Figura 5(f)) possui uma planta no estado de São Paulo; a fábrica *Sobral Invicta* (Figura 5(g)) possui uma planta no estado de Minas Gerais e a maior fábrica em plantas, *Owens Illinois do Brasil*, (Figura 5(h)) possui quatro plantas nos estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Pernambuco e Ceará.

Figura 5 – Distribuição geográfica das indústrias de embalagens de vidro associadas a ABIVIDRO.

Fonte: Elaborada pela autora.

2.2 O Processo da produção de embalagens de vidro

As plantas nas indústrias de embalagens de vidro podem variar de localização e nas configurações, ou seja, cada uma delas podem apresentar um número diferente de fornos, com capacidade de fusão variada que alimenta um número de máquinas. A Figura 6 ilustra três plantas (A, B e C) com diversas linhas de produção (fornos e máquinas), em que os fornos estão ligados a um número diferente de máquinas. Por exemplo, na planta A temos três fornos (F_1 , F_2 e F_3), sendo que o primeiro está ligado a duas máquinas, o segundo alimenta uma máquina e o terceiro está conectado a três máquinas; na planta B temos dois fornos (F_1 , F_2), onde o primeiro alimenta três máquinas e o segundo está ligado a uma máquina; e na planta C apenas um forno (F_1) conectado a duas máquinas.

Figura 6 – Exemplos de plantas industriais de embalagens de vidro.

Fonte: Elaborada pela autora.

O principal objetivo de um forno é atingir uma temperatura de processamento mais alta do que a obtida ao ar livre (MULLINGER; JENKINS, 2014), alimentando simultaneamente várias máquinas ligadas a ele. Essa alimentação depende da capacidade de fusão do forno, como visto na Figura 6. Um forno pode ser definido pela taxa de extração de vidro, tipo de vidro derretido e produto a ser produzido. Segundo GGC (2019), existem dois tipos de fornos de fusão de vidro: fornos de tanques (em inglês, *tank furnaces*) e fornos de potes (em inglês, *pot furnaces*). Os fornos de tanques são usados para o fluxo contínuo de vidro e alimentam máquinas automáticas, sendo os mais econômicos no uso de combustível e usados, principalmente, para a produção em larga escala de embalagens, vidro plano, lâmpadas elétricas, tubos e louças domésticas. Os fornos de potes são usados para fundir entre 18 e 21 toneladas de vidros para moldagem manual por sopro pela boca.

A Figura 7 é um exemplo ilustrativo da variedade de fornos, mostrando típicos fornos regenerativos com porta traseira (em inglês, *end-port*) normal e refinador profundo (em inglês, *deep refiner*), na Figura 7(a)¹ e Figura 7(b)², respectivamente. Um forno regenerativo com porta lateral (em inglês, *side-port*) na Figura 7(c)³ e um forno recuperativo na Figura 7(d) (FRISCH, 2019).

¹ De acordo com as especificações apresentadas em <http://twixar.me/qrhK>

² De acordo com as especificações apresentadas em <http://twixar.me/3fvK>

³ De acordo com as especificações apresentadas em <http://twixar.me/MshK>

Figura 7 – Exemplos de fornos regenerativo e recuperativo.

Fonte: Adaptada de Frisch (2019).

Além dos fornos regenerativos e recuperativos, existem os fornos elétricos e os de combustão a oxigênio puro (em inglês, *Oxy-Fuel*). Segundo Frisch (2019), os fornos elétricos são usados normalmente para vidros especiais, justificando campanhas (processo de produção) relativamente pequenas (22-28 meses). Os de combustão a oxigênio puro são cada vez mais encontrados em vidrarias, substituindo, em alguns casos, fornos contínuos elétricos. A Figura 8 apresenta um exemplo de um forno elétrico.

Figura 8 – Exemplo de forno elétrico.

Fonte: Hotwork (2018).

Os fornos de combustão a oxigênio puro são utilizados em diferentes plantas de produção e podem ser considerados como uma alternativa aos fornos regenerativos para vidros de embalagens e utensílios domésticos. Eles apresentam um nível de consumo que pode ser até 25-30% menor do que um forno regenerativo e até 40-50% do que um forno recuperativo

(FALORNITECH, 2019). A Figura 9 apresenta um exemplo de um forno com combustão a oxigênio puro.

Figura 9 – Exemplo de forno com combustão a oxigênio puro.

Fonte: FalorniTech (2019).

O processo de fusão é gerado nas principais áreas do forno que recebe a mistura dos compostos para criar o vidro, ou seja, elaborar a massa vítrea que é o vidro fundido. A fim de facilitar o trabalho dos operários, a duração desse ciclo é geralmente de 24 horas e dois fatores são essenciais sobre a qualidade da massa vítrea que são a sua viscosidade e o tempo que ficou na fundição (FRISCH, 2019).

Baseado nas informações de Jaime e Dantas (2009), Azinheira (2014) e Frisch (2019) na Figura 10, são apresentadas a seguir as principais áreas que geram o processo de fusão:

1. **zona de fusão (ou enforna):** a matéria-prima e os cacos entram pelas bocas do forno para o refratário, que possuem queimadores e proporcionam o calor suficiente para iniciar a fundição da mistura com uma temperatura próxima dos 1400°C ;
2. **zona de refino (ou afinagem):** nesta fase procura-se retirar os gases das reações químicas intensas ocorridas na fase anterior. Reduzindo assim, a viscosidade do vidro, aumentando a temperatura para 1500°C ;
3. **garganta (ou condicionamento):** a temperatura é reduzida lentamente, assim o vidro atinge uma viscosidade adequada para ser trabalhado (temperatura da ordem de 1100°C) evitando criar heterogeneidades térmicas que podem comprometer a qualidade do vidro;

4. **alimentador (ou feeder)**: após a fase anterior, o vidro escoa por gravidade para o alimentador, que fornece a gota de vidro fundido à máquina de fabricação de embalagens. Esse processo de formação de gota é automático e contínuo, ou seja, extração do vidro.

Figura 10 – Descrição das zonas internas do forno que realizam o processo de fusão.

Fonte: Elaborada pela autora.

Segundo Frisch (2019), os fornos apresentam uma infinidade de formas e concepções diferentes para sua construção, impossibilitando entrar nos detalhes de cada um. A Tabela 2 apresenta um resumo das principais características dos fornos de fluxo contínuos e suas aplicações gerais.

Tabela 2 – Principais características dos fornos.

Características dos fornos	
Energia	Aplicações
Regenerativo	embalagens de vidro, planos, utensílios domésticos, cosmético, farmacêutico e técnicos.
Recuperativo	embalagens de vidro, utensílios domésticos, farmacêutico e técnicos.
Elétrico	embalagens de vidro, utensílios domésticos e farmacêutico.
Combustão a oxigênio	embalagens de vidro, utensílios domésticos, farmacêutico, fibra de vidro e técnicos.

Fonte: Elaborada pela autora.

Os fornos com fluxo contínuos são capazes de fundir durante 24 horas, ou seja, com uma produção contínua para extração. A fabricação é efetuada por meio de máquinas automáticas ou semiautomáticas, permitindo produções em larga escala com pouca mão de obra (FRISCH, 2019).

Os avanços tecnológicos contribuíram na evolução e nas mudanças da produção do vidro. A técnica artesanal de sopro, que permitia a confecção de um pote ou uma jarra por vez, foi aperfeiçoada para máquinas eletrônicas ou mecânicas, que possuem configurações definidas por seções, bocas, centros e processos.

Por exemplo, a Figura 11⁴ ilustra uma máquina de seção individual (IS, do inglês, *Individual Section*) com oito seções e com três bocas em cada seção, totalizando a produção máxima de 24 embalagens de vidro.

Figura 11 – Exemplo de uma máquina IS.

Fonte: Elaborada pela autora.

O Número de Seções (NS) são os blocos numerados da Figura 11, os quais podem variar entre 4, 6, 8, 10, 12, 16 ou 20. Nas seções, encontram-se as bocas, que são as cavidades dos moldes que receberão o vidro fundido, sendo representadas por três círculos nos blocos. Os Tipos de Botas (TB) podem variar entre boca única (em inglês, *Single-Gob* (SG)), boca dupla (em inglês, *Double-Gob* (DG)), boca tripla (em inglês, *Triple-Gob* (TG)) e quatro bocas (em inglês, *Quadruple-Gob* (QG)).

As distâncias entre os centros das seções e o tipo de produto que se deseja fabricar também definem os diferentes tipos de configurações para as máquinas. As distâncias mais comuns entre os centros são: 4" 1/2, 5", 5" 1/2, 6" 1/4. A Figura 12 exemplifica a distância entre os centros na máquina.

Figura 12 – Exemplo da medida das distâncias entre os centros.

Fonte: PGP (2019).

⁴ De acordo com as especificações apresentadas em <http://twixar.me/YY8K>

A conformação das embalagens pode ser feita por meio de três processos de fabricação: soprado-soprado (em inglês, *Blow and Blow (BB)*), prensado-soprado (em inglês, *Press and Blow (PB)*) e processo prensado-soprado-gargalo-estreito (em inglês, *Narrow Neck Press and Blow (NNPB)*).

O processo de fabricação BB ou duplo sopro tem a vantagem de formar uma grande variedade de garrafas de vidro em termos de tipo e finalidade, pois é usado na fabricação de embalagens pesadas. A Figura 13 ilustra um exemplo do processo em que é descrito cada fase de acordo com Verallia (2019):

Figura 13 – Exemplo do processo BB.

Fonte: Verallia (2019).

- (a) **Carregamento:** chegada da gota de vidro dentro do pré-molde para o início da conformação. Nesta etapa acontece a formação quase completa do gargalo;
- (b) **Compressão:** o ar comprimido injetado dentro do pré-molde completa a formação do gargalo e garante sua estabilização dimensional;
- (c) **Sopro do parison:** o ar comprimido é injetado para dentro da massa de vidro, obrigando-a a ocupar o espaço interno do pré-molde, formando o parison (pré-formato);
- (d) **Transferência inicial:** o parison preso pelo gargalo é transferido desde o pré-molde até o molde;
- (e) **Transferência final:** após a transferência inicial a conformação final será realizada;
- (f) **Sopro final:** injeta-se ar comprimido dentro do parison forçando-o a tomar o formato final dentro de uma forma;
- (g) **Extração:** após o sopro final e a abertura da forma, um mecanismo de garras pega a embalagem (de vidro) pela região do gargalo e o coloca sobre uma placa de ventilação em que a embalagem será resfriada.

O processo de fabricação PB é utilizado na produção de embalagens de vidro com paredes finas, ou seja, embalagens leves e rápidas. A Figura 14 ilustra um exemplo do processo PB em que é descrito cada fase apresentada na imagem de acordo com Verallia (2019):

Figura 14 – Exemplo do processo PB.

Fonte: Verallia (2019).

- (a) **Carregamento:** a gota de vidro chega dentro do pré-molde e se deposita sobre um pino de prensagem;
- (b) **Prensagem:** o vidro prensado contra o fundo do pré-molde é forçado a escoar entre o pino de prensagem e as paredes do pré-molde, até a formação do gargalo. Neste processo o gargalo é a última região do parison a ser conformada;
- (c) **Transferência inicial:** o parison preso pelo gargalo é transferido desde o pré-molde até o molde;
- (d) **Transferência final:** após a transferência inicial a conformação final será realizada;
- (e) **Assopro final:** injeta-se ar comprimido dentro do parison forçando-o a tomar o formato final dentro de uma forma;
- (f) **Extração:** após o assopro final e a abertura da forma, um mecanismo de garras pega o artigo pela região do gargalo e o coloca sobre uma placa de ventilação onde o artigo será resfriado.

O processo de fabricação NNPB é semelhante ao PB, no entanto, utiliza-se um êmbolo muito mais estreito que permite a formação de embalagens com gargalo estreito. Esse processo é caracterizado pela distribuição uniforme do vidro, sendo essa uma das principais melhorias do processo recente da produção de garrafas, pois permitiu uma redução significativa no peso do vidro de até 33% sem afetar o desempenho mecânico da embalagem (SARWAR; ARMITAGE, 2003). Assim, esse é o melhor processo para controle sobre a distribuição de vidro.

Além das configurações de NS, TB, distância entre centros e processo da produção para a conformação da embalagem, existe a variedade de cores que o produto final pode ter. As principais cores utilizadas nas embalagens são: âmbar, verde e branca (MILLER; PACEY, 1985).

Entretanto, diferentes tipos de produtos requerem configurações de máquinas específicas, sendo que os custos de instalação de cada tipo de máquina estão relacionados com a configuração desejada. Dessa forma, geralmente, busca-se instalar máquinas que aceitem um tipo amplo de embalagens com custo reduzido e alta produtividade. No entanto, essa meta pode ser difícil de alcançar e, uma vez que a planta da produção é projetada, permanecerá por anos.

O processo completo de fabricação das embalagens de vidro é apresentado na **Figura 15** em que, de forma geral, a massa vítrea passa pela zona de fusão, zona de refino, garganta e escorre para o alimentador (**Figura 15(a)**). Em seguida, a massa é cortada por tesouras, formando gotas de acordo com o tamanho do recipiente a ser fabricado (**Figura 15(b)**⁵). Por meio dos distribuidores de gotas ou canais, as gotas fluem em direção às máquinas de moldagem (**Figura 15(c)**⁶) para entrar nas bocas de cada bloco de seções (**Figura 15(d)**). Após a conformação, a embalagem é colocada em uma esteira (**Figura 15(e)**) e seguirá para o processo de controle de qualidade, resultando no produto final.

Figura 15 – Exemplo do processo completo da produção de embalagens.

Fonte: Elaborada pela autora.

Este processo produtivo é semelhante para todos os tipos de embalagens de vidro (garrafas, potes e frascos). A variação ocorre na quantidade ou tipos de fornos e na configuração de cada máquina. As diferentes possibilidades de combinações nas configurações irão refletir diretamente sobre o tipo de embalagens que podem ser produzidas nestas máquinas. Existem máquinas com diferentes tecnologias, modelos, capacidades e flexibilidade disponíveis no mercado. Dessa forma, a escolha da máquina terá um impacto direto no custo da instalação do novo forno.

Considerando o fluxo de materiais da cadeia de suprimento das embalagens de vidro, em especial, as ampolas para garrafas térmicas, tem-se que as indústrias (**Figura 16(a)**) recebem a matéria-prima para enformar, pré-moldar (**Figura 16(b)**), produzir e estocar as ampolas (**Figura 16(c)**). Os centros de distribuições comercializam (**Figura 16(d)**), levando ao mercado em serviços (**Figura 16(e)**) e por último ao consumidor final (**Figura 16(f)**). A **Figura 16**, no sentido reverso (da **Figura 16(f)** a **Figura 16(a)**), representa o fluxo de informações.

⁵ De acordo com as especificações apresentadas em <http://twixar.me/L7XK>

⁶ De acordo com as especificações apresentadas em <http://twixar.me/cVXK>

Figura 16 – Exemplo do fluxo da cadeia de suprimento da produção de ampolas.

Fonte: Elaborada pela autora.

2.3 Visitas técnicas em indústrias brasileiras

Nesta seção, relata-se as informações e as experiências obtidas por meio de visitas técnicas realizadas em três fábricas de embalagens de vidro no Brasil: X, Y e Z⁷. As visitas técnicas proporcionaram a criação de um vínculo entre os conhecimentos teóricos com o universo profissional, possibilitando compartilhamento de experiência entre Universidade e Indústria. Cabe ressaltar que os dados fornecidos pela fábrica Z foram utilizados para validar o modelo matemático e métodos propostos no segundo caso de estudo, apresentado na [Seção 3.2](#).

Fábrica X

A fábrica X está dividida em três fábricas (plantas) no Brasil, e o principal segmento da fábrica X é embalagens de vidro para bebidas e alimentos como vinhos, refrigerantes, cervejas e azeites. No dia 18 de março de 2015, foi realizada a primeira visita técnica à fábrica X. O processo de fabricação do vidro nessa empresa se inicia pelo setor de depósito, na área externa da fábrica, onde os materiais para a composição de derretimento são armazenados, sendo este o mesmo local onde são despejados os cacos de vidro reciclados. Este material já chega limpo ao local, sem resíduo de rótulos ou material orgânico. Porém, mesmo assim, há um risco de danificação ou má qualidade no produto final, uma vez que não há como garantir a qualidade dos cacos reutilizados na composição final da embalagem.

O controle do forno desta fábrica gerencia apenas um forno que foi instalado em 1997, reformado em 2008 e totalmente reconstruído 17 anos depois em 2014. Um total de 70 dias foi necessário para a reconstrução do forno, com 25 homens trabalhando durante 24 horas por dia. Toda demanda existente neste período foi enviada para uma outra unidade fabril.

Este forno possui duas “gargantas” que alimentam três máquinas e fica ligado 24 horas por dia, durante 365 dias por ano, ou seja, não pode ser desligado. Sua capacidade de fusão pode ser utilizada na máxima ou na mínima. O aquecimento do forno é feito por sensores elétricos,

⁷ Para preservar a imagem das fábricas visitadas serão adotados nomes fictícios para as mesmas.

presentes tanto na parte de baixo como no fundo do forno, que tem duas aberturas para entrada ou saída. Tais aberturas são aquecidas por maçaricos acesos por meio de gás. As aberturas funcionam de forma alternada para manter a temperatura do material do vidro em estado líquido ou em pasta. Toda fumaça produzida pelo forno é filtrada e não é expelida para o meio ambiente, obedecendo às regras sobre poluição de ar.

Todas as máquinas ligadas ao forno possuem o tipo de boca DG, com distâncias entre os centros de 5"1/2, sendo uma máquina com 16 seções e duas máquinas IS, que são mais rápidas, uma com 12 seções e outra com 8 seções. A fábrica faz seus produtos por meio de dois processos de fabricação, o BB e o NNPB. Cada máquina produz um tipo diferente de embalagem, porém, de uma mesma cor já que utiliza apenas um forno. A pasta de vidro escorre pelo tipo de boca e chega nas seções com os moldes. A embalagem é formada e colocada na esteira.

Com as embalagens na esteira, é iniciado processo de inspeção. A primeira vistoria de controle de qualidade das embalagens é feita por meio de uma máquina que digitaliza a imagem da garrafa em busca de algum dano, como falha ou bolha. Quando é identificado algum defeito, a embalagem é descartada de imediato. Em seguida, há outra supervisão feita por um funcionário experiente nesta função. A terceira supervisão é realizada por uma máquina equipada por sensores, que verifica a existência de alguma irregularidade (ondulações ou rachaduras) na espessura do vidro e analisa a qualidade de acordo com as normas do padrão do fundo e boca da embalagem. Caso exista algo que diminua a qualidade da embalagem, esta é descartada. Após estas três supervisões, o processo de controle de qualidade é finalizado.

Posteriormente, as embalagens são banhadas por uma cera para diminuir o atrito entre elas, facilitando o processo de embalagem. Na esteira em que todas as embalagens estão prontas para serem comercializadas ou entregues aos clientes, a cada duas paletas cheias, o sensor de um robô identifica e vem buscá-las. As paletas são empilhadas e levadas até uma máquina que as plastificam a vácuo.

Fábrica Y

Essa fábrica fornece embalagens para o envase de perfumaria (perfumes em gerais e difusores de ambientes), cosméticos (esmaltes, loções, etc.) e farmacêuticos (conta gotas, injetáveis e frascos). Apesar das linhas de perfumaria e farmacêutica proverem o maior lucro da empresa, atualmente há investimentos em outros segmentos como utilidades domésticas (pratos, copos, etc) e serviços de decoração em embalagens de vidro (pintura, rotulagem, etc).

No dia 23 de julho de 2015, foi feita a visita técnica à fábrica Y. Essa fábrica possui uma única planta com quatro fornos (A, B, C e D) com capacidade de produção de 1 bilhão de frascos por ano ou aproximadamente 310 toneladas de vidro por dia. Porém, no momento da visita, o forno D estava desligado devido a uma queda na demanda. Além disso, o forno C seria desligado em breve. Assim, visitou-se apenas os fornos A e B.

O forno A estava produzindo apenas embalagens da cor âmbar. Ele possui uma capacidade de fusão de 90 toneladas/dia e abastece sete máquinas. O forno B só produzia embalagens na cor branca, porém, possui dois alimentadores para alterar as cores dos produtos. Esse forno abastece seis máquinas e tem a capacidade de fusão de 80 toneladas/dia. No total, há 21 linhas de produção e 4 alimentadores para colorir, incluindo o forno desligado e o forno C, não visitado na ocasião.

Os processos de fabricação nessa fábrica são: soprado-soprado, prensado-soprado e prensas rotativas, no processo prensado. Um diferencial dessa fábrica é o fato do grupo possuir um fabricante particular de máquinas e equipamentos para indústrias vidreiras. Dessa forma, os custos de instalação de máquinas são menores quando comparado aos custos das fábricas que precisam de terceiros para a realização da mesma tarefa.

Fábrica Z

Trata-se de uma fábrica focada na produção de ampolas de vidro para garrafas térmicas, mas também produz potes, copos e jarras. A primeira visita técnica à fábrica Z ocorreu no dia 26 de setembro de 2017, possibilitando um conhecimento geral sobre a estrutura da mesma. Esta fábrica tem uma única planta com um forno que possui três alimentadores com capacidade de derreter mais de 40 toneladas de vidro por dia. O forno fica ligado 24 horas por dia, durante 365 dias por ano, com três máquinas ligadas a esse forno, sendo duas responsáveis pela produção de ampolas térmicas e uma exclusiva para produção de potes.

As máquinas que produzem as ampolas são eletrônicas com quatro seções e SG, enquanto a máquina que produz potes é mecânica com seis seções e DG. O processo de inspeção é semelhante ao descrito para a fábrica X.

No dia 15 de novembro de 2017, visitou-se a fábrica Z pela segunda vez, em companhia do professor orientador desta pesquisa. Nessa ocasião foram delimitadas as etapas de execução deste trabalho e apresentada aos representantes da fábrica uma proposta para a elaboração de uma ferramenta de apoio à tomada de decisão. Essa ferramenta seria capaz de realizar o planejamento da produção como um método alternativo para a comissão do PCP. Atualmente, o planejamento é realizado na empresa por macros executadas no Excel, baseadas no histórico da produção. Enquanto que a ferramenta proposta é baseada nos dados do ano anterior, proporcionando à empresa uma segunda opção para o planejamento.

O primeiro modelo matemático elaborado para a produção de ampolas de vidro e as soluções alcançadas foram apresentadas a uma equipe da fábrica Z em 21 de julho de 2018, através de uma video-conferência. Houve alguns questionamentos por parte da equipe em relação a produção das ampolas nas máquinas, pois a parte interna e externa são produzidas em máquinas distintas. Além disso, também foram levantadas questões de como calibrar melhor a produção final e usar o *ramp-up* (aumento na produção de uma empresa antes dos aumentos previstos na

demanda por produtos).

A última visita técnica à fábrica Z foi realizada no dia 25 de julho de 2018, em companhia do professor orientador e de uma aluna do curso de doutorado do ICMC - USP, que a princípio dará continuidade a esta pesquisa. O objetivo principal dessa visita era apresentar a primeira versão da ferramenta proposta para o planejamento de produção de ampolas. Os representantes da fábrica Z aceitaram a proposta da ferramenta, porém fizeram algumas sugestões sobre as saídas de resultados nas planilhas, como disponibilizar gráficos mais simples, e sobre o método que irá resolver o modelo, que deveria ser um método não comercial.

Como perspectiva futura, considera-se disponibilizar a versão atual dessa ferramenta para a realização de testes na fábrica. Com este propósito, a fábrica Z disponibilizou o acesso aos dados reais de produção das ampolas, que foram fundamentais para criação das instâncias aleatórias artificiais e reais.

2.4 Trabalhos relacionados

Produção na indústria de vidro

No contexto de problemas da produção na indústria de vidro, uma simulação computacional é apresentada por Paul (1979). Os autores estudam o problema de programar linhas de produção paralelas na indústria de embalagens de vidro com uma restrição de recursos imposta pela taxa de fusão do forno. Os resultados do modelo de simulação são combinados com aspectos relevantes da teoria de programação para se chegar à conclusão de que uma regra de despacho, baseada no menor tempo de processamento, provavelmente fornece uma política operacional mais eficiente.

Boyd, Tolley e Pang (2002) apresenta uma metodologia e resultados empíricos relacionados à produtividade, enquanto tratava a poluição do processo produtivo como uma saída indesejável. As estimativas mostram que a mudança técnica contribuiu para o crescimento da produtividade e do desempenho ambiental na IEV. Sarwar e Armitage (2003) introduz o processo NNPB para obter o melhor controle sobre a distribuição de vidro na embalagem sem afetar o desempenho mecânico. Um componente chave no processo é o êmbolo, usado para formar a cavidade no parison⁸ durante o estágio de formação. A função do êmbolo é distribuir uniformemente o vidro dentro da cavidade do molde vazio e auxiliar na remoção de energia térmica da superfície interna do parison.

O trabalho de Vellini e Savioli (2009) examina as necessidades energéticas, seu impacto ambiental associado à influência da reciclagem e à reutilização das embalagens de vidro no consumo de energia e emissão de poluentes. O objetivo é determinar o melhor percentual de

⁸ Definição apresentada em <https://www.britannica.com/technology/parison>

reciclagem para embalagens de vidro do ponto de vista do consumo de energia e minimização de emissões poluentes, durante o processo de produção de embalagens de vidro para bebidas.

[Farina et al. \(2010\)](#) apresenta uma coletânea de modelos matemáticos para fabricação de vidro, definindo os domínios físicos nos quais uma máquina de formação de vidro pode ser subdividida. Além disso, descreve os aspectos físicos da formação de vidro em um modelo, apresentando um modelo de simulação numérica para o processo de BB e para o fluxo de vidro, modelando o fluxo de ar, descrevendo várias técnicas para simulações de processo. O autor apresenta também um modelo matemático para a prensa parison, descrevendo o movimento do pistão por uma equação diferencial ordinária. Um modelo matemático para a prensa direta (em inglês, *direct press*) também é apresentado, onde os recursos do modelo de sopro e do modelo de prensa parison são combinados no modelo de prensa direta. Porém, não é abordado modelos sobre a construção de fornos, as configurações de máquinas ou sobre planejar a produção de embalagens de vidro.

[Sardeshpande, Gaitonde e Banerjee \(2007\)](#) apresentam uma abordagem baseada em modelos para *benchmarking* de processos industriais intensivos em energia e ilustra essa abordagem para fornos industriais de vidro. Um modelo de simulação para um forno de vidro é desenvolvido usando balanços de massa e energia, equações de perda de calor para as diferentes zonas e equações empíricas baseadas em práticas operacionais. Os fornos reais operando nessas escalas de produção têm um potencial de redução no consumo de energia de cerca de 20 a 25%. Os resultados do modelo mostram o potencial de melhoria e o impacto de diferentes preferências operacionais e de design no consumo específico de energia.

Os autores em [El-Behery et al. \(2017\)](#) abordam a capacidade do forno de fusão de 24 toneladas por dia equipado com dois regeneradores operados alternativamente, onde uma atenção especial foi dada ao efeito da limpeza do regenerador. Medições foram feitas antes e depois da limpeza do regenerador para as temperaturas do ar e gases de combustão na entrada e na saída, taxas de fluxo de massa de combustível e ar de combustão e a composição do gás de combustão. Verificou-se que a limpeza do regenerador aumentou a eficácia durante o período de resfriamento em cerca de 3%.

Um estudo tridimensional de um forno de fusão de vidro regenerativo, de porta lateral a gás, foi apresentado por [Abbassi e Khoshmanesh \(2008\)](#). O forno é dividido em três regiões: espaço de combustão, tanque de vidro e manta de lote. O espaço de combustão é simulado separadamente, enquanto o tanque de vidro e a manta de lote são acoplados como um todo. Para acoplar as três regiões, é proposto um novo método que é mais flexível e mais rápido que os métodos convencionais existentes. As temperaturas calculadas são comparadas com valores reais medidos em diferentes locais nas superfícies do forno. Os resultados indicam que o erro relativo máximo é menor que 7.6%. Este trabalho pode formar a base para a análise paramétrica do forno para reduzir seu consumo de combustível.

No âmbito de fornos para vidro, [Huisman \(2002\)](#) propõem uma aplicação de observadores

para fornos de fusão de vidro em que apenas algumas variáveis, as mais importantes para a qualidade do vidro, possam ser medidas. É demonstrado como modelos matemáticos de baixa complexidade podem ser usados para estimar as outras variáveis que não podem ser medidas.

Dimensionamento de lotes e programação da produção

No contexto de problemas de dimensionamento de lotes na indústria de recipiente de vidro, os autores em [Almada-Lobo \(2007\)](#) abordam problemas das IEV que podem ser tratados como um problema de sequenciamento e planejamento da produção. [Almada-Lobo, Oliveira e Carravilla \(2008\)](#) tratam um sistema da produção com múltiplas instalações, no qual cada unidade (planta) tem um conjunto de fornos, onde o material derretido de vidro será produzido. [Almada-Lobo et al. \(2010\)](#) e [Toledo, Oliveira e França \(2013\)](#) propuseram métodos para o planejamento da produção em curto prazo em uma única planta industrial com um único forno.

No caso do problema de planejamento de curto prazo estudado por [Almada-Lobo et al. \(2010\)](#), busca-se satisfazer ordens da produção diárias sem *backlogging*, o qual consiste em um problema simultâneo de dimensionamento e escalonamento de lotes. Neste caso, a planta industrial tem apenas um forno, e deve ser decidida as seguintes configurações: quando o forno será ativado, os produtos atribuídos às máquinas conectadas ao forno, o número de cavidades de molde ativas em uma máquina dedicado a produzir algum produto, o estoque de produtos e o sequenciamento de produtos dentro de cada período de tempo. Em seguida, uma heurística baseada na Decomposição Lagrangeana ([GUIGNARD; KIM, 1987](#)) é desenvolvida para resolver instâncias de tamanho pequeno a médio. No entanto, apenas instâncias de pequeno a médio porte (máximo de 15 tipos de embalagens) foram solucionadas.

Os autores em [Toledo et al. \(2013a\)](#) dão continuidade ao trabalho de [Almada-Lobo et al. \(2010\)](#), apresentando uma reformulação para o modelo matemático anteriormente proposto e uma meta-heurística híbrida para solucionar o problema. A meta-heurística híbrida combina algoritmo genético, *simulated annealing* e uma heurística gulosa. O modelo e a meta-heurística conseguem soluções para instâncias de médio e grande porte.

O processo da produção a longo prazo em uma IEV é tratado por [Almada-Lobo, Oliveira e Carravilla \(2008\)](#), em que uma formulação de PLIM é introduzida com variáveis de decisão e restrições descrevendo o nível tático do processo da produção. No entanto, a complexa formulação do PLIM não pode ser aplicada para encontrar um planejamento da produção, e uma busca VNS (do inglês, *Variable Neighbourhood Search*) foi proposta. Esse processo de produção foi estendido por [Toledo et al. \(2016\)](#), ao incluir instalações múltiplas. Além disso, plantas industriais com fornos únicos ou múltiplos foram simultaneamente considerados em [Toledo et al. \(2016\)](#), onde o tamanho do lote de produtos transferidos entre plantas é obtido juntamente com as decisões de programação para cada forno. Um modelo de programação linear inteiro misto foi formulado, bem como heurísticas e meta-heurísticas foram propostas.

Em relação ao sistema de fabricação de uma IEV, [Auer, Bey e Schäfer \(2017\)](#) relatam um estudo de caso, onde foi utilizado uma *Eco-Care-Matrix* (ECM) para comparar as mudanças no sistema de fabricação ao instalar um novo forno. Neste caso, o sistema hidráulico e pneumático anterior das máquinas de seções individuais é atualizado por meio de técnicas eletrônicas de servo conversores e controle de movimento. Esse estudo comparativo mostra uma melhoria em relação ao impacto ambiental, bem como os custos incorridos.

Um redesenho da cadeia de suprimentos é relatado por [Varsei e Polyakovskiy \(2017\)](#) em um estudo de caso para a indústria do vinho na Austrália, onde foi proposto e customizado um modelo multiobjetivo de programação inteira mista. Esse modelo permitiu avaliar diversos cenários de sustentabilidade para a cadeia de suprimentos, reduzindo o custo em torno de 15%.

O problema abordado por [Toledo et al. \(2013a\)](#) foi estendido por [Fachini, Esposto e Camargo \(2017\)](#), que consideraram os tempos de aquecimento e as variações de extração do forno. As configurações podem levar a custos e tempos de aquecimento dependentes da sequência, bem como variações de extração do forno.

Dentro de um escopo mais geral, existem várias revisões na literatura sobre problemas de dimensionamento de lotes e planejamento da produção como [Drexler e Kimms \(1997\)](#) e [Karimi, Ghomi e Wilson \(2003\)](#). Segundo [Jans \(2009\)](#), o planejamento da produção está se tornando cada vez mais sofisticado e capaz de permitir maior flexibilidade nas operações da produção. Dessa forma, tal planejamento consegue refletir as possíveis especificidades dos processos industriais.

Na revisão de [Díaz-Madroño, Mula e Peidro \(2014\)](#), sobre modelos de otimização para planejamento da produção, foram identificadas 250 obras na literatura e observou-se que o planejamento da produção é frequentemente modelado como um PLIM e resolvido por algoritmos exatos de solucionadores comerciais, como CPLEX ou Lindo/Lingo. Os autores também relataram que, na maioria dos trabalhos, os experimentos são realizados com instâncias criadas aleatoriamente. Existe apenas um pequeno número de métodos validados através de dados reais fornecidos por empresas/indústrias.

No livro de [Ramya et al. \(2019\)](#), o problema de dimensionamento de lote é definido para ambientes práticos nos processos industriais. Esses processos exigem, muitas vezes, que a produção de um produto ocorra imediatamente após sua configuração e que o produto seja produzido continuamente sem qualquer interrupção, permitindo a manufatura contínua. O aspecto de manufatura contínua está aqui presente uma vez que o forno nas IEV não pode ser constantemente desligado, fazendo com que o processo de escoamento do vidro para a produção de embalagens não pare. Logo, as IEV apresentam problemas de dimensionamento de lote e sequenciamento no processo da produção, cuja resolução depende da capacidade do forno e das configurações das máquinas que fabricarão as embalagens de vidro.

Uma perspectiva sobre o problema de dimensionamento de lote e suas variantes pode ser encontrada em resenhas presentes na literatura. Dentre os diversos trabalhos disponíveis,

destacam-se [Quadt e Kuhn \(2008\)](#) e [Buschkühl et al. \(2010\)](#), que apresentam formulações matemáticas e abordagens de solução para extensões do problema de dimensionamento de lote capacitado, as quais foram avaliadas por [Jans e Degraeve \(2008\)](#) a partir de modelos operacionais, táticos e estratégicos. [Jans \(2009\)](#) apresenta uma revisão de modelos propostos para o problema de dimensionamento de lotes .

[Brahimi et al. \(2017\)](#) apresenta uma revisão atualizada para o problema de dimensionamento de lote dinâmico de item único, onde trabalhos relacionados à complexidade do problema, abordagens exatas e heurísticas foram avaliados. Os autores também classificaram extensões do problema, considerando as demandas, as restrições de recursos e as estruturas do problema. [Copil et al. \(2017\)](#) também apresentam uma revisão recente sobre o dimensionamento de lotes e problemas de sequenciamento, destacando os modelos mais atuais e abordagens de solução, bem como os principais avanços combinando o dimensionamento de lotes e sequenciamento.

Métodos de resolução

No cenário dos métodos, de forma geral, técnicas baseadas em programação matemática envolvem métodos construtivos e métodos de melhoria. O método construtivo *Relax-and-Fix* (R&F) resolve uma sequência parcialmente relaxada ([POCHET; WOLSEY, 2006](#)), na qual parte das variáveis binárias otimizadas é fixada, enquanto outra parte é otimizada e o restante permanece relaxada. Logo, as variáveis binárias são progressivamente fixadas nos valores obtidos em iterações anteriores. A heurística *Fix-and-Optimize* (F&O) é um método de melhoria iterativa ([POCHET; WOLSEY, 2006](#)). As variáveis inteiras são fixadas no melhor valor encontrado anteriormente, exceto por um conjunto limitado de tais variáveis que passa a ser reotimizado.

Uma revisão sobre as heurísticas baseadas em programação matemática é apresentada por [Ball \(2011\)](#), enquanto outra revisão considerando meta-heurísticas aplicadas a problemas de dimensionamento de lotes pode ser encontrada em [Jans e Degraeve \(2007\)](#). Essas abordagens foram aplicadas com sucesso por diversos autores, como [Araujo, Arenales e Clark \(2008\)](#), que aplicaram a heurística R&F para resolver um problema de dimensionamento de lotes na indústria de fundição. Uma abordagem semelhante é aplicada por [Toso, Morabito e Clark \(2009\)](#) e [Clark, Morabito e Toso \(2010\)](#) para um problema de dimensionamento de lotes na indústria de nutrição animal. F&O foi aplicada por [Sahling et al. \(2009\)](#) e [Helber e Sahling \(2010\)](#) para resolver variantes do problema multiestágio de dimensionamento de lotes e planejamento da produção. Enquanto que, [Ferreira, Morabito e Rangel \(2009\)](#) e [Ferreira et al. \(2012\)](#) utilizaram a técnica de R&F e F&O na resolução de um problema da produção na indústria de bebidas.

Um algoritmo de colônia de formigas foi utilizado para definir as variáveis binárias de um problema de dimensionamento de lotes multinível por [Almeder \(2010\)](#), enquanto a solução exata do modelo matemático definiu as variáveis contínuas. Em [Toledo et al. \(2013a\)](#) e [Toledo et al. \(2016\)](#), um algoritmo evolutivo foi proposto para definir as variáveis de decisão inteira, enquanto os métodos exatos ou aproximados foram responsáveis por definir os valores para as

variáveis contínuas. Além disso, [Toledo et al. \(2013a\)](#) introduziu uma heurística feita sob medida para lidar com as restrições específicas do problema, visando melhorar o desempenho geral do método.

[Toledo et al. \(2013b\)](#) e [Toledo, Oliveira e França \(2013\)](#) combinaram o F&O e o Algoritmo Genético (AG) em uma meta-heurística híbrida para solucionar o problema multiestágio de dimensionamento de lotes, sendo que no AG proposto por [Toledo, Oliveira e França \(2013\)](#) cada indivíduo determina uma configuração para as variáveis binárias do modelo inteiro misto e as variáveis contínuas relacionadas ao indivíduo foram definidas na resolução do modelo linear. Uma busca na vizinhança dos melhores indivíduos também é executada aplicando a heurística F&O. Essa heurística soluciona o submodelo inteiro misto do problema a partir da configuração binária estabelecida no melhor indivíduo do AG.

No entanto, [Toledo et al. \(2013a\)](#) propõem outra formulação matemática para o mesmo problema, além de um algoritmo genético híbrido multi-população (MPGA) para resolvê-lo. As melhorias de modelagem desenvolvidas por [Toledo et al. \(2013a\)](#) permitiram resolver instâncias pequenas, médias e grandes usando o método exato do solver CPLEX. Contudo, o AGMP híbrido supera o método exato, que retorna melhores soluções para instâncias maiores dentro de um tempo computacional reduzido.

[Wei et al. \(2017\)](#) propuseram duas extensas formulações para o PLIM, descritas como orientadas a sequência e a produtos, inspirados pelo planejamento da produção em uma IEV. As formulações abordam o nível tático dos problemas de sincronização ao combinar o planejamento da produção e a distribuição. A solução é obtida por meio de modificações nas heurísticas R&F e F&O. O problema abordado por [Fachini, Esposto e Camargo \(2017\)](#), apresenta uma formulação de PLIM, onde foi aplicada uma busca VNS, sendo que os resultados foram reportados para um estudo de caso conduzido em uma IEV.

[Amorim et al. \(2017, 2018a, 2018c, 2018b\)](#) estudou o problema de planejamento da produção na indústria de embalagem de vidro, resolvendo-o por meio de tipos diferentes de algoritmos genéticos (simples e multi-populacionais) com estruturas em árvore e grade. Além do método exato, CPLEX. Um compilado destes trabalhos e novos resultados são apresentados no [Capítulo 5](#).

Diferente de [Auer, Bey e Schäfer \(2017\)](#) e [Varsei e Polyakovskiy \(2017\)](#), a presente tese não considera explicitamente o impacto ambiental e a sustentabilidade ao decidir sobre o redesenho do sistema de manufatura. O novo forno e sua máquina acoplada serão otimizados visando a redução dos custos. Aspectos relacionados ao impacto ambiental podem ser implicitamente adicionados aos custos. No entanto, semelhante a [Auer, Bey e Schäfer \(2017\)](#) e [Varsei e Polyakovskiy \(2017\)](#), as decisões de reformulação serão avaliadas com base em seus efeitos no planejamento da produção de curto prazo, nos quais são considerados os problemas de dimensionamento e planejamento de lote.

As abordagens propostas para a resolução dos modelos desenvolvidos consiste no método exato da ferramenta CPLEX com o *Branch & Cut* (B&C), entre outros, uma heurística Filtro Guloso (FG) combinada com meta-heurísticas como Algoritmo Genético Simples (AGS), Algoritmo Genético Multi-Populacional (AGMP) e um Algoritmo Genético Modificado (AGM), detalhados no [Capítulo 4](#). O AGMP apresentado é similar ao AGMP híbrido proposto por [Toledo et al. \(2016\)](#), onde os indivíduos são hierarquicamente estruturados em árvores com base em seu valor de adequação. O AGM foi desenvolvido baseado com o algoritmo proposto por [Gonçalves e Resende \(2011\)](#), porém sem a chave aleatória.

FORMULAÇÕES MATEMÁTICAS

Esse capítulo tem como objetivo principal apresentar quatro formulações matemáticas para os problemas nas indústrias de embalagens de vidro, cuja modelagem é obtida pela combinação do dimensionamento de lotes para o planejamento da produção. As duas primeiras formulações, denominadas de *Problema de Instalação de um Novo Forno* (PINF) e *Problema de Instalação de Múltiplos Fornos* (PIMF), baseiam-se em problemas reais para a construção ou reforma de forno(s), juntamente com as configurações das máquinas ligadas a este(s) forno(s). Enquanto que as duas últimas formulações, referem-se ao planejamento e controle da produção de ampolas de garrafas térmicas, desenvolvidas a partir de dois estudos de casos.

3.1 Construção ou reforma de fornos e configurações de máquinas

Nessa seção são apresentados os modelos matemáticos que representam a construção ou a reforma de fornos e as configurações de máquinas em uma fábrica de vidro em geral. Consideramos duas variações desse problema: o Problema de Instalação de um Novo Forno (PINF) ([Subseção 3.1.1](#)) e o Problema de Instalação de Múltiplos Fornos (PIMF) ([Subseção 3.1.2](#)).

Nos dois casos são descritas as configurações das máquinas que estarão ligadas ao novo forno instalado, e os modelos propostos consideram a construção e a reforma de fornos, sendo que a única diferença é o fato do PINF considerar apenas um forno e o PIMF múltiplos fornos. Frisando que os modelos não tratam distinção entre os tipos de fornos, mas apenas a capacidade de derretimento do mesmo.

A notação adotada na formulação matemática dos modelos PINF e PIMF é apresentada na [Tabela 3](#).

Tabela 3 – Notação matemática dos modelos PINF e PIMF.

Dados de Entrada:	
<i>Índices de Conjuntos:</i>	
f	Fornos a serem construídos ($f = 1, \dots, F$).
i	Produtos a serem fabricados ($i = 1, \dots, I$).
m	Máquinas disponíveis ($m = 1, \dots, M$).
t	Horizonte de tempo ($t = 1, \dots, T$).
<i>Parâmetros:</i>	
AC_{im}	Parâmetro binário que indica se o produto i é aceito na máquina m .
AC_{fim}	Parâmetro binário que indica se o produto i é aceito na máquina m e está conectado ao forno construído f .
Cap	Custo da capacidade de fusão utilizada no forno.
CC_f	Custo para construir o forno f .
CI_m	Custo para instalar a máquina m .
D_{it}	Demanda esperada do produto i no período t .
$M_{ax}M$	Número máximo de máquinas suportadas pelo forno.
$M_{in}M$	Número mínimo de máquinas suportadas pelo forno.
$M_{ax}F$	Número máximo de fornos que podem ser construídos.
NS_m	Número de seções por máquina m .
P_i	Peso do produto i .
R_i	Rendimento por cavidade do produto i .
TB_m	Tipo de boca por máquina m .
η_m	Eficiência da máquina m .
<i>Variáveis de Decisão:</i>	
T_{imt}	Tempo gasto no período t em que a máquina m ficou dedicada à produção do produto i (fração entre 0 e 1).
T_{fimt}	Tempo gasto no período t em que a máquina m ficou dedicada à produção do produto i em cada forno f (fração entre 0 e 1).
K_f	Capacidade de fusão utilizada em cada forno f construído.
KF	Capacidade de fusão utilizada no único forno construído.
PE_{imt}	Produção esperada do produto i na máquina m no período t .
PE_{fimt}	Produção esperada do produto i na máquina m no período t em cada forno f .
Y_m	Variável binária que vale 1 se a máquina m estiver instalada, 0 caso contrário.
Y_{fm}	Variável binária que vale 1 se a máquina m estiver instalada em cada forno f , 0 caso contrário.
Z_f	Variável binária que vale 1 se o forno f estiver instalado, 0 caso contrário.

Fonte: Dados da pesquisa.

3.1.1 Problema de instalação de um novo forno

Nas indústrias de embalagens de vidro, a maneira de decidir sobre a construção ou reforma de um forno é dada pela necessidade de ampliação, renovação ou criação de uma planta. Existem vários fatores que influenciam na instalação de um novo forno, por exemplo, o estado

do forno e a logística. Um forno sofre um desgaste natural ao longo de sua vida útil e o tempo médio de confiabilidade pode variar de 5 a 15 anos (HUBERT, 2015). Além disso, o mau uso ou o desligamento pode acelerar o desgaste do forno.

As indústrias de embalagens de vidro que foram visitadas durante a realização dessa pesquisa forneceram dados reais sobre os custos e as configurações de máquinas, mas não forneceram os dados relativos ao planejamento da produção executada. Logo, não foi possível fazer uma comparação com os resultados reais. Todavia, o modelo proposto não visa revelar uma determinada produção executada, porém balizar a tomada de decisão, baseada em um histórico de demandas ou previsões de demandas futuras, quando se fizer necessária a construção de um novo forno.

Para fazer parte do processo da produção, a Figura 17 ilustra um novo forno com capacidade de fusão utilizada KF para ser integrado a planta. Durante o processo de decisão sobre o novo forno, um conjunto de várias configurações de máquinas ($M_{ax}M, m = 1, \dots, M$) precisam ser atribuídas para tomar a decisão sobre o dimensionamento de lotes. Nesse exemplo, consideramos $m = 1$ com $NS_1 = 8$ e TG , $m = 2$ com $NS_2 = 10$ e DG , $m = 3$ com $NS_3 = 6$ e QG , $m = 4$ com $NS_4 = 10$ e QG , $\dots, M$ com $NS_M = 10$ e SG ; que são máquinas conectadas ($Y_m = 1$) ao forno. As linhas não contínuas representam as possibilidades de máquinas que podem ser conectadas a esse forno, salientado que na realidade um forno pode alimentar no mínimo uma máquina e no máximo oito.

Figura 17 – Exemplo do processo de decisão sobre o novo forno.

Fonte: Elaborada pela autora.

A aceitabilidade dos produtos nas máquinas define o nível de eficiência para atender às demandas do produto, ou seja, uma máquina pode não ser capaz de produzir um produto, logo este não será designado à mesma. Por exemplo, na Figura 18, a máquina $m = 4$ seria totalmente dedicada à produção do segundo produto, enquanto a máquina $m = 1$ poderia fabricar o primeiro e o terceiro produto, nesse cenário, as configurações definem a aceitação (AC_{im}). Decisões sobre como a demanda será satisfeita também devem ser levadas em conta, por exemplo, com base na previsão de demandas futuras para os produtos ou em seu histórico dos últimos anos (D_{it}). As linhas contínuas, que partem do forno, mostram as máquinas ($m = 1, m = 2$ e $m = 4$) que podem atender a demanda de acordo com a aceitabilidade do(s) produto(s). E as linhas não contínuas, que ligam os produtos as máquinas (direita para esquerda), representam quais produtos podem ser produzidos por quais máquinas.

Figura 18 – Exemplo de aceitabilidade dos produtos nas máquinas.

Fonte: Elaborada pela autora.

No entanto, também é necessário determinar o dimensionamento de lotes dos produtos i na máquina m no período t (PE_{imt}), e o tempo gasto no período t no qual a máquina m foi dedicada para produzir um produto i (T_{imt}) conforme ilustrado na Figura 19. Ao mesmo tempo, a capacidade KF do novo forno deve ser capaz de derreter vidro suficiente para satisfazer as demandas dos produtos. As linhas não contínuas mostram uma máquina que não seria instalada, pois o produto que ela seria capaz de produzir também pode ser fabricado por outra máquina ($m = 1$).

Figura 19 – Exemplo de dimensionamento de lotes dos produtos.

Fonte: Elaborada pela autora.

Assim, a Figura 20 representa a configuração final, onde um forno será construído e conectado a duas máquinas ($m = 1$ e $m = 4$) que serão capazes de produzir três tipos de embalagens de vidro. A máquina $m = 1$ produzirá o primeiro e o terceiro produto, e a máquina $m = 4$ produzirá somente o segundo produto.

Figura 20 – Exemplo de configuração final do forno.

Fonte: Elaborada pela autora.

Modelo matemático para o PINF

O modelo matemático PLIM para o PINF tem por objetivo determinar um novo forno na indústria de embalagens de vidro a um custo mínimo, determinando diferentes configurações

de máquinas que devem ser ligadas a este forno, de modo a atender a demanda e satisfazer as restrições do processo produtivo. A seguir, a formulação matemática é detalhada.

A função objetivo (FO) (Equação 3.1) consiste em minimizar os custos envolvidos na tomada de decisão, que ocorre na capacidade de fusão (KF) do forno e no custo de implantação (CI_m) das máquinas.

$$\min \sum_{m=1}^M CI_m \cdot Y_m + Cap \cdot KF. \quad (3.1)$$

A restrição (Equação 3.2) representa o limite de máquinas que podem ser instaladas no único forno, por isso, utiliza a variável Y_m com índice apenas para as máquinas.

$$\sum_{m=1}^M Y_m \leq M_{ax}M. \quad (3.2)$$

As restrições (Equação 3.3) verifica se o tempo gasto t na produção do produto i apenas se a máquina m for instalada.

$$T_{imt} \leq Y_m, \quad \forall(i, m, t). \quad (3.3)$$

As restrições (Equação 3.4) correspondem à produção do produto i , apenas se esse for aceito na máquina m , como ilustrado na Figura 18.

$$T_{imt} \leq AC_{im}, \quad \forall(i, m, t). \quad (3.4)$$

As restrições (Equação 3.5) descrevem a fração do tempo de produção, que é distribuído entre os produtos i em cada máquina m no período t , caso a máquina tenha sido instalada ($Y_m = 1$).

$$\sum_{i=1}^I T_{imt} = Y_m, \quad \forall(m, t). \quad (3.5)$$

As restrições (Equação 3.6) apresentam o cálculo da produção, ou seja, o dimensionamento de lote do produto i na máquina m no período t em toneladas .

$$PE_{imt} = T_{imt} \cdot (R_i \cdot P_i \cdot NS_m \cdot TB_m \cdot \eta_m), \quad \forall(i, m, t). \quad (3.6)$$

As restrições (Equação 3.7) garantem o atendimento da demanda, onde a produção de cada item PE_{imt} acumulada até o período t deve ser maior ou igual a demanda (D_{it}) acumulada do item até o mesmo período.

$$\sum_{\tau=1}^t \sum_{m=1}^M PE_{im\tau} \geq \sum_{\tau=1}^t D_{i\tau}, \quad \forall(i, t). \quad (3.7)$$

As restrições (Equação 3.8) definem a capacidade (KF) do forno necessária para atender a demanda.

$$\sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M PE_{imt} \leq KF, \quad \forall(t). \quad (3.8)$$

As restrições (Equação 3.9) e (Equação 3.10) apresentam os respectivos domínios das variáveis de decisão.

$$KF, PE_{imt}, T_{imt} \geq 0 \quad (3.9)$$

$$Y_m \in \{0, 1\}. \quad (3.10)$$

3.1.2 Problema de instalação de múltiplos fornos

Uma extensão natural do PINF (Subseção 3.1.1) consiste em considerar o problema em que se deve construir ou reformar vários fornos em uma mesma planta, cada um deles conectado a várias máquinas. Nesse cenário, consideramos a Figura 21 para ilustrar vários fornos que podem ser instalados ($M_{ax}F$, $f = 1, f = 2, f = 3, \dots, F$) e ligados a máquinas com diversas configurações. No caso da configuração das máquinas, temos $f = 1$ e $m = 1$ com $NS_1 = 8$ e TG , $f = 1$ e $m = 2$ com $NS_2 = 10$ e DG , $f = 2$ e $m = 1$ com $NS_1 = 6$ e QG , $f = 3$ e $m = 1$ com $NS_1 = 8$ e TG , $f = 3$ e $m = 2$ com $NS_2 = 10$ e QG , $f = 3$ e $m = 3$ com $NS_3 = 10$ e DG , $\dots, F$ e $m = 1$ com $NS_1 = 10$ e SG .

Figura 21 – Exemplo de planta com vários fornos.

Fonte: Elaborada pela autora.

Modelo matemático para o PIMF

O modelo matemático para o PIMF tem por objetivo determinar a melhor configuração de fornos e máquinas a um custo mínimo. Logo, um conjunto de fornos, parâmetros e variáveis com índices de forno f foram apresentados na Tabela 3. A seguir, a formulação matemática para o PIMF é detalhada.

A função objetivo (Equação 3.11) minimiza os custos relacionados ao aumento da capacidade de fusão do forno, juntamente com o custo das máquinas ligadas ao forno e o custo para construir um forno.

$$\min \sum_{f=1}^F Cap \cdot K_f + \sum_{m=1}^M \sum_{f=1}^F CI_m \cdot Y_{fm} + \sum_{f=1}^F CC_f \cdot Z_f. \quad (3.11)$$

Um conjunto com várias configurações de máquinas precisam ser atribuído a cada forno para tomar a melhor decisão, como ilustrado anteriormente na Figura 17. Nas restrições (Equação 3.12) o número de máquinas conectadas a um forno f deve obedecer os limites mínimo e máximo, conectando a máquina somente se o forno for construído.

$$M_{in}M \cdot Z_f \leq \sum_{m=1}^M Y_{fm} \leq M_{ax}M \cdot Z_f, \quad \forall(f). \quad (3.12)$$

A restrição (Equação 3.13) limita o número de fornos f a ser construído.

$$\sum_{f=1}^F Z_f \leq M_{ax}F. \quad (3.13)$$

As restrições (Equação 3.14) permitem a produção somente se o produto i for aceito na máquina m e ligada a cada forno f .

$$T_{fimt} \leq Y_{fm}, \quad \forall(i, m, t, f). \quad (3.14)$$

A aceitação do produto na i máquina m , com base no processo de fabricação, são representadas pelas restrições (Equação 3.15).

$$T_{fimt} \leq AC_{fim}, \quad \forall(i, m, t, f). \quad (3.15)$$

As restrições (Equação 3.16) fornecem o tempo total gasto para a produção dos itens na máquina m , se tiver sido instalado no forno f .

$$\sum_{i=1}^I T_{fimt} \leq Y_{fm}, \quad \forall(m, t, f). \quad (3.16)$$

A quantidade esperada da produção do produto i na máquina m , dentro do período t para cada forno f , é representada pelas restrições (Equação 3.17), levando em conta o tamanho do lote do produto, o número de seções e o tipo de boca.

$$PE_{fimt} = T_{fimt} \cdot (R_i \cdot P_i \cdot NS_m \cdot TB_m \cdot \eta_m), \quad \forall(i, m, t, f). \quad (3.17)$$

As restrições (Equação 3.18) garantem que a produção esperada atende as demandas em cada produtos em cada período t .

$$\sum_{\tau=1}^t \sum_{m=1}^M \sum_{f=1}^F PE_{fimt} \geq \sum_{\tau=1}^t D_{i\tau}, \quad \forall(i, t). \quad (3.18)$$

A produção esperada do produto deve obedecer a capacidade de fusão do forno como estabelecido na restrição (Equação 3.19).

$$\sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M PE_{fimt} \leq K_f, \quad \forall(t, f). \quad (3.19)$$

As restrições (Equação 3.20) e (Equação 3.21) apresentam os respectivos domínios das variáveis de decisão.

$$K_f, PE_{fimt}, T_{fimt} \geq 0, \quad (3.20)$$

$$Y_{fm}, Z_f \in \{0, 1\}. \quad (3.21)$$

3.2 Planejamento e controle da produção de ampolas

Nesta seção, são apresentados os modelos matemáticos que representam o planejamento e o controle da produção de ampolas. O modelo matemático para o *Estudo de Caso 1* (EC1) (Subseção 3.2.1), caracteriza uma primeira representação de um cenário real da produção de ampolas térmicas. Esse modelo descreve preliminarmente o planejamento e o controle da produção de ampolas. Uma abordagem mais completa, para esse mesmo cenário real, é feita pelo modelo matemático no *Estudo de Caso 2* (EC2) (Subseção 3.2.2).

Os modelos apresentados para os dois estudos de casos foram obtidos com base em dados reais fornecidos pela fábrica Z (Seção 2.3). Devido a um contrato de confidencialidade entre o grupo de pesquisa do orientador e a fábrica, os valores do eixo das ordenadas (y) será omitido em todos gráficos desta tese.

A notação adotada na formulação matemática dos modelos EC1 e EC2 é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Notação matemática dos modelos do EC1 e EC2.

Dados de Entrada:	
<i>Índices de Conjuntos:</i>	
i	Produtos (ampolas) a serem fabricados(as) ($i = 1, \dots, I$).
m	Máquinas disponíveis ($m = 1, \dots, M$).
s	Dias de <i>ramp-up</i> ($s = 1, \dots, S$).
t	Horizonte de tempo ($t = 1, \dots, T$).
<i>Parâmetros:</i>	
Cap	Custo da capacidade de fusão utilizada no forno.
C_i	Custo real do produto i .
D_{it}	Demanda do produto i no período t .
ES_i	Estoque de segurança do produto i .
I_{i0}	Estoque inicial do produto i .
L_{is}	Taxa de <i>ramp-up</i> do produto i no dia s .
B	Valor positivo suficientemente grande (<i>Big M</i>).
P_i	Peso do produto i (ton.).
Q_{im}	Quantidade de extração da ampola i na máquina m .
Q_i	Quantidade de extração da ampola i .
Re_{it}	Refugo do produto i no período t .
<i>Variáveis de Decisão:</i>	
U	Número de vezes que o estoque de segurança foi ultrapassado.
I_{it}	Estoque do produto i no período t .
PL_{itm}	Produção líquida do produto i no período t na máquina m .
PL_{it}	Produção líquida do produto i no período t .
PT_{itm}	Produção total do produto i no período t na máquina m .
PT_{it}	Produção total do produto i no período t .
S_{itm}	Variável binária que vale 1 se iniciou a produção do produto i no período t na máquina m , 0 caso contrário.
S_{it}	Variável binária que vale 1 se iniciou a produção do produto i no período t , 0 caso contrário.
V_{its}	Variável auxiliar para linearização.
W_{its}	Variável binária que vale 1 se houver <i>set-up</i> do produto p no período t no dia s , 0 caso contrário.
X_{itm}	Variável binária que vale 1 se existe produção do produto i no período t na máquina m , 0 caso contrário.
X_{it}	Variável binária que vale 1 se existe produção do produto i no período t , 0 caso contrário.

Fonte: Dados da pesquisa.

3.2.1 Estudo de caso 1

Na empresa analisada, são fabricadas cinco tipos de ampolas, que variam de acordo com:

(i) peso, (ii) custo, (iii) estoque de segurança, (iv) refugo (desperdício diário), (v) número de

peças extraídas por máquina, (vi) estoque no início do período e (vii) demanda empurrada do produto, ou seja, em que há uma incerteza. Quando ocorre uma troca entre ampolas é necessário o *set-up*, ou seja, a preparação da máquina para o próximo produto. Um horizonte de tempo curto é tomado como base para o planejamento operacional, um horizonte de tempo médio é utilizado no planejamento tático e um horizonte de tempo longo no planejamento estratégico.

Figura 22 – Exemplo da planta real da fábrica Z para ampolas.

Fonte: Elaborada pela autora.

Os aspectos relacionados a planta real para ampolas e suas configurações são ilustrados na Figura 22. Existe um único forno regenerativo de porta traseira com capacidade de derretimento limitado, o qual alimenta duas máquinas que possuem a mesma configuração de quatro seções e *DG*. Estas, por sua vez, trabalham em conjunto, uma produz a parte interna enquanto a outra é responsável pela produção da parte externa das ampolas.

A demanda prevista pela empresa foi determinada pelo PCP e comparada com a produção alcançada por quatro tipos de ampolas (P1, P2, P3 e P4) durante um trimestre é apresentada na Figura 23. Observa-se que ocorrem quedas na produção em alguns dias, indicados por uma seta, tal fato acontece devido ao *set-up*, ou seja, a preparação da máquina para produzir outro tipo de ampola.

Figura 23 – Demanda do PCP e a produção realizada em um trimestre.

Fonte: Elaborada pela autora.

O refugo é a taxa de desperdício por dia do produto que está sendo feito e a eficiência é a taxa (dia/produto) de produtos que foram aprovados no controle, ou seja, produtos sem defeitos. A Figura 24 apresenta o refugo e a eficiência na produção, considerando os mesmos produtos e período de tempo adotados na Figura 23. Observe que acontece uma variação maior do refugo em dias consecutivos, após a ocorrência de troca dos produtos, sendo que a eficiência é complementar ao refugo.

Figura 24 – Refugo e eficiência durante um trimestre.

Fonte: Elaborada pela autora.

Modelo matemático para o EC1

O modelo matemático tem por objetivo descrever um planejamento para o máximo da produção líquida (produção bruta menos o desperdício) de ampolas, de modo a atender a demanda, satisfazendo as restrições de balanço de estoque (Equação 3.23 e Equação 3.24) e capacidade de fusão do forno (Equação 3.25). A seguir, a formulação matemática preliminar para o planejamento e controle da produção de ampolas é detalhada.

A função objetivo (Equação 3.22) maximiza o lucro com a produção líquida.

$$\max \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M PL_{itm} \cdot C_i. \quad (3.22)$$

As restrições (Equação 3.23) e (Equação 3.24) representam a equação de balanço de estoque.

$$I_{it} = \sum_{m=1}^M PL_{itm} - D_{it} + I_{i(t-1)}, \quad \forall (i, t > 1). \quad (3.23)$$

$$I_{it} = \sum_{m=1}^M PL_{itm} - D_{it} + I_{i0}, \quad \forall (i, t = 1). \quad (3.24)$$

As restrições (Equação 3.25) limitam a produção total de acordo com a capacidade diária de derretimento do forno para as ampolas.

$$\sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M PT_{itm} \cdot P_i \leq Cap, \quad \forall(t). \quad (3.25)$$

As restrições (Equação 3.26) afirmam que a produção líquida das ampolas será a produção total menos a quantidade de ampolas que foram perdidas no refugo durante o processo da produção, considerando se houve *set-up* no dia. Assume-se que 1/3 equivale a 8 horas de *set-up*, e nesse caso se obtém 2/3 da produção total.

$$PL_{itm} = PT_{itm} \cdot (1 - Re_{it}) + Q_{im} \cdot S_{itm} \cdot (-1 + Re_{it})/3, \quad \forall(i, t, m). \quad (3.26)$$

As restrições (Equação 3.27) afirmam que a produção total deve ser igual a capacidade produtiva da máquina em um dia normal t , somente se existir a produção do produto i . A produção será zero, caso o produto não esteja ativo na máquina m .

$$PT_{itm} = Q_{im} \cdot X_{itm}, \quad \forall(i, t, m). \quad (3.27)$$

As restrições (Equação 3.28) permitem que se tenha apenas um produto ativado (sendo produzido) na máquina por vez.

$$\sum_{i=1}^I X_{itm} = 1, \quad \forall(t, m). \quad (3.28)$$

As restrições (Equação 3.29) e (Equação 3.30) representam o *set-up*, onde a diferença entre o produto ativo no período atual e no período anterior determina se ocorre ou não o *set-up*.

$$S_{itm} \geq X_{itm} - X_{i(t-1)m}, \quad \forall(i, t > 1, m). \quad (3.29)$$

$$S_{itm} = X_{itm}, \quad \forall(i, t = 1, m). \quad (3.30)$$

As restrições (Equação 3.31) afirmam que deve ser produzido um mesmo produto nas máquinas, ou seja, um produto i tem que ser produzido em todas as máquinas.

$$X_{itm} = X_{it(m-1)}, \quad \forall(i, t, m > 1). \quad (3.31)$$

As restrições (Equação 3.33) e (Equação 3.32) apresentam os respectivos domínios das variáveis de decisão.

$$I_{it}, PL_{itm}, PT_{itm} \geq 0, \quad (3.32)$$

$$X_{itm}, S_{itm} \in \{0, 1\}. \quad (3.33)$$

3.2.2 Estudo de caso 2

A extensão do EC1 para o EC2 consiste em estudar detalhes na produção que o EC1 não englobou como, por exemplo, alterar a função objetivo de maximizar a produção líquida para o problema de minimização *set-up*'s. Isso significa tratar o efeito do *ramp-up* que ainda não tinha sido considerado. Diariamente, existe um desperdício na produtividade chamado de refugo, como dito antes. Logo, nos três primeiros dias subsequentes ao *set-up* ocorre o *ramp-up*.

Nesse cenário, a Figura 25 representa o *ramp-up*, que é uma influência maior do refugo agindo sobre a produção após o *set-up*, conforme destacados pelas elipses tracejadas. No período de *ramp-up*, há uma queda na produção durante alguns dias. Isso acontece devido ao *set-up* entre produtos e período de *ramp-up*. A produção se estabilizará após aproximadamente 72 horas.

Figura 25 – Comportamento do *ramp-up* na produção real.

Fonte: Elaborada pela autora.

Uma comparação entre a produção fornecida pelo modelo EC2 e a produção de um tipo de ampola no início de um trimestre (P1_iTrim - preto) e no final desse trimestre (P1_fTrim - azul) é apresentada na Figura 26. Observe que as taxas médias utilizadas no *ramp-up* do modelo EC2 são representativas em relação aos dados fornecidos pela fábrica Z, visto que a variação na produção da ampola é baixa.

Figura 26 – O *ramp-up* real comparado com o modelado.

Fonte: Elaborada pela autora.

A produção líquida no modelo EC2 considera as informações procedentes da fábrica Z, em que é calculada a ação do refugo e do *ramp-up*, baseando-se em médias anuais do processo de produção. Em um ambiente fabril, alguns aspectos devem ser levados em consideração como: as oscilações do refugo diariamente e as alterações do *ramp-up* após cada *set-up*, mesmo que seja para um produto já produzido antes.

Modelo matemático para o EC2

O modelo matemático no EC2 tem por objetivo determinar um planejamento real para um cenário com menos *set-up*, com *ramp-up* a um custo mínimo e considerando somente uma máquina. Com a finalidade de determinar um planejamento competitivo com o adotado pelo PCP, de modo a atender a demanda e a satisfazer as restrições do processo produtivo, o balanço de estoque e o estoque de segurança. A formulação matemática completa para o planejamento e controle da produção de ampolas é detalhada a seguir.

A função objetivo Equação 3.34 minimiza os custos de *set-up*, *ramp-up* e equilibra o estoque de segurança para evitar a produção exagerada de um mesmo produto com a taxa 0.01, após o atendimento da demanda.

$$\min \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S W_{its} \cdot Q_i \cdot (1 - L_{is}) \cdot C_i + 0.01 \cdot U \cdot \sum_i ES_i \cdot C_i. \quad (3.34)$$

As restrições (Equação 3.35) e (Equação 3.36) representam as equações de balanceamento de estoque.

$$I_{it} = PL_{it} - D_{it} + I_{i(t-1)}, \quad \forall (i, t > 1). \quad (3.35)$$

$$I_{it} = PL_{it} - D_{it} + I_{i0}, \quad \forall (i, t = 1). \quad (3.36)$$

As restrições (Equação 3.37) equilibram o estoque de segurança, penalizando na função objetivo o maior número de vezes E que esse estoque foi ultrapassado.

$$\frac{I_{it}}{ES_i} \leq U, \quad \forall (i, t). \quad (3.37)$$

As restrições (Equação 3.38 - Equação 3.41) representam a linearização para $V_{its} = W_{its} \cdot PT_{it}$.

$$V_{its} \geq PT_{it} - B \cdot (1 - W_{its}). \quad (3.38)$$

$$V_{its} \leq PT_{it} + B \cdot (1 - W_{its}). \quad (3.39)$$

$$W_{its} \cdot B \geq V_{its}. \quad (3.40)$$

$$-W_{its} \cdot B \leq V_{its}. \quad (3.41)$$

As restrições (Equação 3.42) obtêm a produção líquida de ampolas da seguinte forma: se houver *set-up* do produto, então a influência do *ramp-up* ocorre durante aproximadamente três

dias, ou seja, $PL_{it} = \sum_{s=1}^S V_{its} \cdot L_{is}$ onde L_{is} é uma porcentagem de PT_{it} . Caso não haja *set-up* do produto, então $PL_{it} = (PT_{it} - \sum_{s=1}^S V_{its}) \cdot (1 - Re_i)$ e, assim, temos apenas a influência do refugo na produção das ampolas.

$$PL_{it} = \sum_{s=1}^S V_{its} \cdot L_{is} + (PT_{it} - \sum_{s=1}^S V_{its}) \cdot (1 - Re_i), \quad \forall(i, t). \quad (3.42)$$

As restrições (Equação 3.43) afirmam que a produção total deve ser igual a quantidade de extração da ampola i em um dia normal t , somente se o produto estiver ativado.

$$PT_{it} = Q_i \cdot X_{it}, \quad \forall(i, t). \quad (3.43)$$

As restrições (Equação 3.44) permitem que se tenha apenas um produto ativado na máquina por vez.

$$\sum_{i=1}^I X_{it} = 1, \quad \forall(t). \quad (3.44)$$

As restrições (Equação 3.45) e (Equação 3.46) representam o *set-up*, onde a diferença entre o produto ativo no período atual e no período anterior determinam se ocorre ou não o *set-up*.

$$S_{it} \geq X_{it} - X_{i(t-1)}, \quad \forall(i, t > 1). \quad (3.45)$$

$$S_{it} = X_{it}, \quad \forall(i, t = 1). \quad (3.46)$$

As restrições (Equação 3.47) determinam os estágios do *ramp-up* após a ocorrência de *set-up* do produto.

$$S_{it} = W_{i(t+s)s}, \quad \forall(i, s, t < T - s). \quad (3.47)$$

As restrições (Equação 3.48) e (Equação 3.49) representam os domínios das variáveis.

$$I_{it}, PL_{it}, PT_{it}, V_{its}, U \geq 0, \quad (3.48)$$

$$X_{it}, S_{it}, W_{its} \in \{0, 1\}. \quad (3.49)$$

Os modelos propostos neste capítulo são resolvidos de maneira exata pelo método CPLEX, além de uma heurística de Filtro Guloso e as meta-heurísticas como o Algoritmo Genético Simples, o Algoritmo Genético Multi-Populacional e o Algoritmo Genético Modificado, descritos no Capítulo 4, cujos resultados computacionais são apresentados no Capítulo 5.

METODOLOGIA ADOTADA

Esse capítulo tem como objetivo principal apresentar a metodologia adotada nessa pesquisa, a qual é baseada na concepção de modelos e métodos de resolução para os problemas abordados. Essa concepção combina o dimensionamento de lotes para o planejamento da produção em indústrias de embalagens de vidro, estabelecendo uma tomada de decisão a partir da elaboração de expressões algébricas, utilizadas na grande área de Pesquisa Operacional e na subárea de Otimização Combinatória.

Para avaliar e/ou validar os modelos propostos, de acordo com as características específicas de cada problema, foram elaborados grupos de instâncias aleatórias ou baseadas em dados reais. Os bancos de dados utilizados nessa pesquisa estão disponíveis para *download* em <https://joflaviana.wixsite.com/flavianamsamorim/database-phd> (disponível a partir de 2020).

Os modelos de Programação Linear Inteiro-Misto (PLIM) propostos foram resolvidos utilizando as ferramentas *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio* na versão 12.8 (IBM, 2019c) (resumidamente, *solver* CPLEX), que suporta a linguagem de programação de otimização (OPL, do inglês, *Optimization Programming Language*). Após os modelos serem testados pelo CPLEX, eles foram implementados na ferramenta *Professional Optimization Framework* (ProOF) (ARANTES, 2013), proposta em Arantes (2014). As interfaces das ferramentas CPLEX e ProOf são apresentadas, respectivamente, na Figura 27.

Figura 27 – Imagens das telas iniciais das ferramentas CPLEX e ProOf.

Fonte: Elaborada pela autora.

As linguagens utilizadas são OPL no CPLEX e Java no ProOF, nessa última ferramenta são implementados todo os modelos e os métodos heurístico e meta-heurísticos. Os experimentos computacionais são executados usando um computador Intel Xeon E5-2680v2 com 2,8 GHz e 128 GB de RAM no Linux.

4.1 Instâncias para os modelos

Nesta seção serão detalhadas as principais características contidas em cada conjunto de instância gerado para cada modelo proposto no [Capítulo 3](#). As instâncias avaliadas nos modelos PINF e PIMF foram criadas por um gerador aleatório que definiu os parâmetros a partir de dados fornecidos por indústrias de embalagens de vidro localizadas no Brasil e em Portugal, que tem o papel de fornecer dados para elaborar os modelos e suas respectivas instâncias. As instâncias avaliadas nos modelos de EC1 e EC2 foram elaboradas de forma empírica com base nos dados reais fornecidas pela fábrica Z, uma das fábricas onde foram realizadas visitas técnicas ([Seção 2.3](#)).

4.1.1 Construção ou reforma de fornos e configurações de máquinas

Geração de instâncias para o PINF

Para o PINF, dois grupos de instâncias foram elaboradas como *Machine-Based* (MB) e *Horizon-Based* (HB), a fim de avaliar o desempenho dos métodos ao aumentar dois parâmetros principais do problema: número de máquinas disponíveis (M) e horizonte de tempo (T). No conjunto de instâncias MB, para um horizonte de tempo fixo, aumentamos os diferentes tipos de máquinas disponíveis. Por outro lado, aumentamos o horizonte de tempo para instâncias HB a partir de um número fixo de tipos de máquinas. O conjunto MB e HB com instâncias de pequeno porte (em inglês, *Small*) será nomeado como SMB e SHB, enquanto as instâncias de grande porte (em inglês, *Large*) serão nomeadas como LMB e LHB. A [Tabela 5](#) mostra os conjuntos de instâncias. Um total de cinco subgrupos de instâncias foram criados para cada caso, em que cada subgrupo contém dez instâncias.

Tabela 5 – Instâncias para o PINF.

Instâncias pequenas						Instâncias grandes					
Instâncias	M	T	Instâncias	M	T	Instâncias	M	T	Instâncias	M	T
SMB100	100	8	SMB04	300	4	LMB1000	1000	8	LMB04	3000	4
SMB200	200		SMB06		6	LMB2000	2000		LMB06		6
SMB300	300		SMB08		8	LMB3000	3000		LMB08		8
SMB400	400		SMB10		10	LMB4000	4000		LMB10		10
SMB500	500		SMB12		12	LMB5000	5000		LMB12		12

Fonte: Elaborada pela autora.

Os grupos de instâncias foram criados utilizando um gerador aleatório de instâncias, desenvolvido a partir de valores de parâmetros da seguinte forma:

- AC_{im} aleatoriamente selecionado entre $\{0 \text{ ou } 1\} \mid \sum_m AC_{im} \geq 1 \text{ e } \sum_i AC_{im} \geq 1$;
- $Cap \in U[500.0, 600.0]$;
- $CI_m \in U[9.0, 11.0] \times 100000$ (\$);
- $M_{ax}M = 6$;
- $NS_m \in \{6, 8, 10, 12, 16, 20\}$;
- $P_i \in U[0.067, 1.233]/1000$;
- $R_i \in U[1.0, 5.0] \times 60 \times 24 \times 365/P_i$;
- $TB_m \in \{1, 2, 3\}$;
- $\eta_m \in U[0.878, 0.925]$.

Os valores de cada parâmetro são selecionados de um conjunto de valores fornecidos pelas IEV. Esses valores são obtidos aleatoriamente seguindo uma distribuição uniforme dentro de um intervalo $U[a, b]$ ou um subconjunto de valores inteiros. O único parâmetro fixo é o número máximo de máquinas suportadas pelo forno, $M_{ax}M$.

No subconjunto SMB, aumentamos M seguindo valores $\{100, 200, 300, 400, 500\}$ para $T = 8$. Assim, um máximo de $M_{ax}M = 6$ tipos de máquinas será selecionado dentre as M disponíveis. Esses subconjuntos são nomeados como SMB100, SMB200, ..., SMB500. Adotamos $T \in \{4, 6, 8, 10, 12\}$ e $M = 300$ para subconjuntos SHB nomeados como SHB04, ..., SHB12. A mesma ideia é usada para gerar instâncias de grande porte nos subconjuntos LMB e LHB. Os parâmetros aplicados para criar instâncias para o subconjunto LMB são $M \in \{1000, 2000, 3000, 4000, 5000\}$ com $T = 8$, cujos nomes dos subconjuntos são LMB1000, LMB2000, ..., LMB5000. Para instâncias do LHB, os parâmetros são $T \in \{4, 6, 8, 10, 12\}$ com $M = 3000$ e subconjuntos nomeados como LHB04, LHB06, ..., LHB12. O gerador cria 10 instâncias para cada subconjunto de instâncias pequena e grande, o que significa um total de 200 instâncias.

Geração de instâncias para o PIMF

Para o PIMF foram elaboradas dois tipos de instâncias: *Machine*₁₀₀ (M100) e *Product*₁₀₀ (P100). No tipo M100, o número de máquinas é fixado em 100, enquanto o número de produtos varia. No tipo P100, o número de produtos é 100, enquanto o número de máquinas varia. Os dados fornecidos por uma IEV são usados para gerar tais instâncias:

- AC_{fim} aleatoriamente selecionado entre $\{0 \text{ ou } 1\} \mid \sum_m AC_{fim} \geq 1 \text{ e } \sum_i AC_{fim} \geq 1$;

- $Cap \in U[500.0, 600.0]$;
- $CC_f \in U[70.0, 90.0] \times 100000$ (\$);
- $CI_m \in U[5.0, 40.0] \times 100000$ (\$);
- NS_m aleatoriamente selecionado em $\{6, 8, 10, 12, 16, 20\}$;
- $M_{in}M = 1$, $M_{ax}M = 8$ e $M_{ax}F = 5$;
- $P_i \in U[0.067, 1.233] / 1000$;
- $R_i \in U[1.0, 5.0] \times 60 \times 24 \times 365 / W_i$;
- TB_m aleatoriamente selecionado entre $\{1, 2, 3, 4\}$.
- $\eta_m \in U[0.878, 0.925]$.

Um total de sete conjuntos de instâncias foi criado para o tipo M100 e outros sete para o tipo P100. Cada conjunto possui 10 instâncias, o que significa um total de 140 instâncias. A [Tabela 6](#) apresenta esses conjuntos de instâncias. No M100, temos o conjunto de instâncias M100-P025 que significa instâncias com 100 máquinas e 25 produtos. Os sete conjuntos são M100-P025, -P050, -P075, -P125, -P150, -P175 e -P200. A mesma ideia de notação é aplicada para P100 com conjuntos P100-M025, -M50, -M75, -M125, -M150 e -M200.

Tabela 6 – Instâncias para o PIMF.

Conjuntos de Instâncias					
Instâncias M100	M	P	Instâncias P100	P100	M
M100-P025	100	025	P100-M025	100	025
M100-P050		050	P100-M050		050
M100-P075		075	P100-M075		075
M100-P125		125	P100-M125		125
M100-P150		150	P100-M150		150
M100-P175		175	P100-M175		175
M100-P200		200	P100-M200		200

4.1.2 Planejamento e controle da produção de ampolas

Geração de instâncias para o EC1

Por questão de sigilo, as informações sobre os dados reais obtidos junto à fábrica Z não serão apresentados na íntegra. As instâncias elaboradas possuem a seguinte estrutura de entrada:

- $i \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$;
- $t \in \{7, 30, 90\}$;

- $M_{in}M = M_{ax}M = 2$;
- $Cap > 10000$;
- $C_i \in \{\text{R\$ } 1.00 - \text{R\$ } 2.50\}$;
- $D_{it} \in \{60 - 13000\}$;
- $I_{t0} \in \{\text{Valor } (E1) \text{ e Valor } (E2)\}$;
- $P_i \in \{0.150\text{g} - 0.600\text{g}\}$;
- $Q_{im} \in \{6.500 - 17.000\}$;
- $Re_{it} \in \{19\% - 33\%\}$.

Três conjuntos com 10 instâncias cada são definidos com a quantidade de ampolas representada por A e seu correspondente valor variando entre 1 e 5. $E1$ representa o estoque de novembro e $E2$ denota o estoque de dezembro de 2017, combinado com os períodos de sete dias, sendo que $T7$ representa o período de planejamento operacional. Em seguida, é combinado com $T30$ que representa o período de planejamento tático. O $T90$ representa o período de planejamento estratégico. A [Tabela 7](#) apresenta como foram combinados os dados das instâncias para resolver os problemas. Assim, um total de 30 instâncias foi utilizado como entrada para avaliar os modelos propostos.

Tabela 7 – Instâncias para o EC1.

Conjuntos de Instâncias			
Instâncias	Operacional	Tático	Estratégico
A1E1	T7	T30	T90
A1E2	T7	T30	T90
A2E1	T7	T30	T90
A2E2	T7	T30	T90
A3E1	T7	T30	T90
A3E2	T7	T30	T90
A4E1	T7	T30	T90
A4E2	T7	T30	T90
A5E1	T7	T30	T90
A5E2	T7	T30	T90

Por exemplo, a instância A3E2T7 representa que os dados de entradas são compostos por três ampolas diferentes com o estoque do mês de dezembro de 2017 para o período de planejamento operacional.

Geração de instâncias para o EC2

Para a geração de instância para o EC2 também foram utilizados os dados reais disponibilizados pela fábrica Z, os quais, por questão de sigilo assinado em um contrato de confidencialidade, não serão apresentados na íntegra. As instâncias elaboradas possuem a seguinte estrutura de entrada:

- $i \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$;
- $t = 90$;
- $s = 3$ (número de dias de *ramp-up*);
- $C_i \in \{\text{R\$ 1.00} - \text{R\$ 2.50}\}$;
- $D_{it} \in \{\text{Valor A e Valor B}\}$;
- $ES_i \in \{600 - 120 \text{ mil}\}$;
- $I_{i0} \in \{9 \text{ mil} - 600 \text{ mil}\}$;
- $L_{is} \in \{30\% - 75\%\}$;
- $B = 1000000$ (*Big M*);
- $P_i \in \{0.150\text{g} - 0.600\text{g}\}$;
- $Q_{im} \in \{15 \text{ mil} - 31 \text{ mil}\}$;
- $Re_{it} \in \{19\% - 33\%\}$.

Os dados para preparar os conjuntos de instâncias são do ano de 2018, considerando combinações de trimestres com o período rolante e considerando uma única máquina. No intuito de ponderar o período anual, foram considerados os trimestres Janeiro+Fevereiro+Março (JFM), Fevereiro+Março+Abril (FMA) até o trimestre Outubro+Novembro+Dezembro (OND), como apresentados na [Tabela 8](#). Foram elaboradas 10 instâncias considerando a demanda planejada pelo PCP (Valor A) e outras 10 instâncias considerando a produção alcançada pela fábrica Z (Valor B).

Tabela 8 – Instâncias para o EC2.

Trimestres	Demandas	
1-JFM	PCP	Produzido
2-FMA		
3-MAM		
4-AMJ		
5-MJJ		
6-JJA		
7-JAS		
8-ASO		
9-SON		
10-OND		

O planejamento previsto pelo PCP para o ano de 2019 foi disponibilizado para teste no modelo. Utilizando os dados reais da empresa e considerando os dados históricos, foi alcançado pelo CPLEX uma sequência nova do planejamento, apresentada no [Capítulo 5](#) na [Seção 5.2](#).

4.2 Métodos aplicados aos modelos

Nesta seção são apresentados informações sobre a ferramenta do método exato CPLEX, a heurística Filtro Guloso (FG) que avalia previamente uma solução para verificar sua viabilidade e as meta-heurísticas como o Algoritmo Genético Simples, o Algoritmo Genético Multi-Populacional e o Algoritmo Genético Modificado, que são os métodos adotados para resolver os modelos propostos no [Capítulo 3](#).

4.2.1 Exato

O primeiro método adotado nessa pesquisa está relacionada ao estudo dos modelos matemáticos propostos, que foram implementados e inicialmente testados na ferramenta de otimização *IBM® ILOG® CPLEX® Optimization Studio*.

O CPLEX consiste em um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE, do inglês, *Integrated Development Environment*) comercial e com versão acadêmica, que reúne um conjunto abrangente de ferramentas para modelagem e solução de problemas de otimização. O ambiente permite um rápido desenvolvimento e implementação de modelos de otimização usando programação matemática com restrições (IBM, 2019b).

Essa ferramenta usa a tecnologia de otimização de decisão para desenvolver e implementar modelos de otimização que podem melhorar significativamente os resultados de problemas de planejamento. Funciona nos sistemas operacionais *Linux* e *Windows*, suporta a linguagem OPL e um conjunto de APIs (do inglês, *Application Programming Interface*), como Python, Java, C++ e C# (IBM, 2019a).

O desempenho do CPLEX é avaliado com base na diferença (do inglês, *GAP*) entre o Limite Superior (LS) e o Limite Inferior (LI) obtido pelo *solver* CPLEX. A [Equação 4.1](#) define essa diferença.

$$GAP_{exato}(\%) = 100 \times \frac{LS_{CPLEX} - LI_{CPLEX}}{LS_{CPLEX}} \quad (4.1)$$

Para os outros métodos, os desempenhos são comparados similarmente ao GAP_{exato} , considerando a [Equação 4.2](#).

$$GAP_{meta}(\%) = 100 \times \frac{LS_{Meta} - LI_{CPLEX}}{LS_{Meta}} \quad (4.2)$$

4.2.2 Heurística

Segundo [Dorigo e Stützle \(2004\)](#), heurísticas são procedimentos construtivos ou de refinamento por meio dos quais é possível encontrar soluções de alta qualidade para problemas difíceis de otimização combinatória dentro de um tempo razoável. Dada uma solução corrente e estabelecendo-se um determinado tipo de alteração local (movimento), a ser aplicada à solução corrente, define-se o conjunto de (novas) soluções que podem ser produzidas (vizinhança). Uma solução vizinha à solução corrente é escolhida, passando a constituir a nova solução corrente. O procedimento é repetido até que algum critério de parada seja satisfeito.

No [Algoritmo 1](#), é descrita a heurística *FG*. Esse método avalia previamente uma solução para verificar sua viabilidade, onde alguns critérios são adotados para identificar e penalizar soluções inviáveis. Os critérios são resumidos a seguir:

- Não há forno construído;
- Não há máquina instalada;
- A quantidade de máquinas instaladas viola o número mínimo e máximo de máquinas por forno;
- Existem demandas de produtos, mas não há máquinas capazes de produzir esses produtos;
- Um procedimento guloso é aplicado para atender demandas, se os critérios anteriores não identificarem a inviabilidade. No entanto, a solução é penalizada quando o procedimento guloso não satisfaz as demandas.

A heurística *FG* reduz o tempo computacional, evitando resolver modelos lineares relacionados para soluções inviáveis. Se a inviabilidade anterior não for encontrada por meio das

linhas 1-14 no [Algoritmo 1](#), a heurística tentará definir o dimensionamento de lotes que atende a demanda do último período para o primeiro. Este procedimento segue ideias semelhantes a heurística *cavity* proposta por [Toledo et al. \(2013a\)](#). Se a solução codificada como um indivíduo não satisfizer todas as condições gulosas a serem penalizadas, teremos uma solução promissora. Neste caso, as variáveis binárias codificadas podem ser fixadas no modelo matemático. Em seguida, o modelo PL relacionado é resolvido e as variáveis contínuas são obtidas na otimalidade para tal configuração binária, ou seja, com o uso do CPLEX.

Essa heurística é utilizada pelos algoritmos genéticos propostos como parte do procedimento *avaliar()*, evitando lidar com soluções inviáveis ao resolver o modelo PL. Isso é feito avaliando previamente a representação do indivíduo, seguindo um procedimento construtivo guloso. Primeiro, avalia-se o número de máquinas definidas pela codificação com base nas restrições de problemas, tais como: se a quantidade de máquinas instaladas não respeitar o limite superior; e se houver demanda para um produto, mas se não houver nenhuma máquina aceitando (linhas 2 -7). Se essas restrições forem violadas, a função de aptidão (em inglês, *fitness*) do indivíduo é penalizada.

Caso contrário, um procedimento guloso é aplicado para determinar o dimensionamento de lotes dos produtos para atender às demandas. Esse procedimento começa do último até o primeiro período de tempo t , seguindo cada máquina m em ordem crescente de aceitabilidade dos produtos $\sum_{i=1}^I AC_{im}$ (linhas 15-17). Primeiro, um dimensionamento de lotes é definido, escolhendo o produto i em ordem crescente de $\frac{1}{R_i \cdot W_i \cdot NS_m \cdot TG_m \cdot \eta_m}$ (linhas 19-26). As máquinas e a capacidade do forno são atualizadas e, se algumas demandas não forem satisfeitas, a solução é penalizada (linhas 30-47).

O método retorna a função de aptidão para tal indivíduo e, se foi penalizado, encontramos uma solução inviável. Caso contrário, temos uma representação binária viável da qual vale a pena resolver o modelo de PL relacionado. Neste caso, a solução viável encontrada é definida como a solução inicial para o modelo PL, onde os valores binários são fixos, para encontrar os valores contínuos ótimos relacionados a essa representação. Finalmente, o valor da adequação é atualizada agora pelo valor da função objetivo retornado pelo modelo PL.

Por fim, a heurística *FG* apresenta condições para penalizar uma solução antecipadamente sem a necessidade de solucionar o modelo linear relacionado. Além disso, com a cópia da demanda para uma demanda auxiliar (temporária), a heurística busca atendê-la com a produção necessária para cada período decrescente. Isso ocorrerá apenas quando existir alguma máquina instalada e período suficiente. Assim, a demanda temporária será atendida e atualizada com uma solução gulosa. Caso a solução codificada em um indivíduo não satisfaça tais condições de penalização, temos uma codificação de variáveis inteiras promissora que será fixada no modelo matemático para a resolução do modelo linear.

Algoritmo 1 – Heurística de Filtro Guloso.

```

1: para todo forno  $f$  onde  $\exists m \mid Y_{fm} = 1$ ; faça
2:   se  $\sum_{m=1}^M Y_{fm} > M_{ax}M$  ou  $\sum_m Y_{fm} < M_{in}M$  então  $\triangleright$  Se as máquinas instaladas estiverem fora dos limites
3:     retorne penaliza;
4:   fim se
5: fim para
6: para todo produto  $i$ ; faça
7:   se  $\sum_{t=1}^T D_{it} > 0$  e  $\sum_{f=1}^F \sum_{m=1}^M Y_{fm} \cdot AC_{fim} = 0$  então  $\triangleright$  Existe demanda mas não existe aceitabilidade nas máquinas
8:     retorne penaliza;
9:   fim se
10: fim para
11: Demanda  $\underline{S}$  ser satisfeita
12:  $S_{it} \leftarrow D_{it}; \quad \forall(i, t)$   $\triangleright$  Capacidade restante da máquina
13:  $R_{fmt} \leftarrow 1; \quad \forall(f, m, t)$ 
14:  $K_f \leftarrow 0; \quad \forall(f)$   $\triangleright$  Capacidade de fusão utilizada em cada forno
15: para todo período  $t$  em ordem decrescente; faça
16:    $TK \leftarrow 0;$   $\triangleright$  Capacidade temporária do forno
17:   para todo forno  $f$  e máquina  $m$  em ordem crescente de  $\sum_{i=1}^I AC_{fim}$ ; faça
18:     se  $Y_{fm} = 1$  &  $R_{fmt} > 0$  então
19:       para todo  $i$  em ordem crescente de  $\frac{1}{R_i \cdot W_i \cdot NS_m \cdot TG_m \cdot \eta_m}$  faça
20:          $pt \leftarrow R_{fmt} \cdot (R_i \cdot W_i \cdot NS_m \cdot TG_m \cdot \eta_m);$   $\triangleright$  Quantidade possível
21:          $dt \leftarrow S_{it};$   $\triangleright$  Quantidade desejada
22:          $q \leftarrow \min(pt, dt);$   $\triangleright$  Quantidade a ser produzida
23:          $S_{it} \leftarrow S_{it} - q;$   $\triangleright$  Satisfazendo a demanda
24:          $R_{fmt} \leftarrow R_{fmt} - \frac{q}{R_i \cdot W_i \cdot NS_m \cdot TG_m \cdot \eta_m};$   $\triangleright$  Usando a capacidade
25:          $TK \leftarrow TK + q;$   $\triangleright$  Atualiza a capacidade temporária do forno
26:       fim para
27:     fim se
28:   fim para
29:   Capacidade restante da máquina ser capaz de produzir
30:   para todo forno  $f$  faça
31:     para todo máquina  $m \mid Y_{fm} = 1$  &  $R_{fmt} > 0$ ; faça
32:        $p \leftarrow$  último índice em ordem crescente  $\frac{1}{R_i \cdot W_i \cdot NS_m \cdot TG_m \cdot \eta_m};$ 
33:        $q \leftarrow R_{fmt} \cdot (R_i \cdot W_i \cdot NS_m \cdot TG_m \cdot \eta_m);$ 
34:        $R_{fmt} \leftarrow 0;$ 
35:        $TK \leftarrow TK + q;$ 
36:     fim para
37:      $K_f \leftarrow \min(K_f, TK);$   $\triangleright$  Atualiza a capacidade do forno
38:   fim para
39:   Retendo demanda insatisfeita
40:   para todo produto  $i \mid S_{it} > 0$  faça
41:     se  $t$  é o primeiro período então
42:       retorne penaliza;
43:     senão
44:        $S_{i,t-1} \leftarrow S_{i,t-1} + S_{it};$ 
45:        $S_{it} \leftarrow 0;$ 
46:     fim se
47:   fim para
48:   para todo forno  $f$  faça
49:     se  $\exists m \mid Y_{fm} = 1$  então
50:        $Z_f = 1;$ 
51:     senão
52:        $Z_f = 0;$ 
53:     fim se
54:   fim para
55: fim para
56: retorne  $Cap \cdot \sum_{f=1}^F K_f + \sum_{f=1}^F \sum_{m=1}^M CI_m \cdot Y_{fm} + \sum_{f=1}^F CC_f \cdot Z_f$ 

```

4.2.3 Meta-heurísticas

O termo meta-heurística geralmente remete a um algoritmo estratégico utilizado para otimizar especificamente um problema em particular. Estes métodos possuem características próprias que permitem fugir de ótimos locais em um espaço de solução. Os Algoritmos Genéticos (AG) são meta-heurísticas populacionais baseadas na teoria da evolução de Darwin (PUCHINGER; RAIDL; ROLI, 2011).

Segundo Silva (2006), a versão mais popular dos AGs foi apresentada por J. Holland em 1975 que fez uso de conceitos biológicos como cromossomos, cruzamento, mutação e evolução da população. Os cromossomos ou indivíduos são utilizados nos AGs, em linhas gerais, para representar uma solução do problema. Os operadores genéticos auxiliam no processo de exploração e intensificação na busca por soluções. Os principais operadores em um AG são a seleção, recombinação e mutação. A seleção é utilizada tanto para escolher cromossomos para a reprodução via recombinação, ou para selecionar os cromossomos mais aptos para sobreviver na próxima geração. A recombinação gera novos cromossomos pelo cruzamento de informações entre diferentes cromossomos (soluções). Todavia, a recombinação atua a partir de cromossomos já existentes na população. O operador de mutação introduz um novo material genético em um cromossomo já existente, ou seja, inclui certa diversidade nas características genéticas da população (ENGELBRECHT, 2007).

Os AGs de forma geral evolui sua população, ou seja, o conjunto de indivíduos, por meio de um processo chamado de gerações. A cada nova geração é criada uma nova população pela aplicação dos operadores genéticos. Assim, algumas características serão passadas como herança para a próxima geração, privilegiando, principalmente, características presentes nos melhores cromossomos. Após inicializar a população de soluções candidatas, o próximo passo no algoritmo é avaliar a qualidade de cada indivíduo em relação ao problema a ser resolvido, utilizando a função de aptidão.

Para resolver PINF e PIMF foram implementadas combinações das meta-heurísticas Algoritmo Genético Simples (AGS) e Algoritmo Genético Multi-Populacional (AGMP) com a heurística *FG* e um Algoritmo Genético Modificado (AGM). Os algoritmos AGS e AGMP são avaliados com dois tipos de estrutura populacional: indivíduos hierarquicamente estruturados em árvores, e indivíduos organizados geograficamente em uma estrutura em grade (MOSCATO, 1989). Nessa seção alguns termos presentes nos Algoritmo 2 e Algoritmo 3 são apresentados posteriormente.

Na estrutura em árvore os indivíduos são hierarquicamente organizados (MOSCATO, 1989) como apresentado na Figura 28. Um indivíduo *Líder* e seus *Suportes* definem um *Grupo*, onde o *Líder* deve ter a melhor aptidão do que seus defensores. Portanto, a raiz da árvore contém o melhor indivíduo da população. Nesta estrutura, o procedimento *selecione* escolhe aleatoriamente um *Suportes* e seu *Líder* como pais de um *Grupo*. Essa operação simples é executada mais

rapidamente com a complexidade $O(1)$. O procedimento *organize* é mais complexo, pois deve definir todos os indivíduos como um *min-heap* (uma estrutura de dados de árvore binária completa) que apresenta complexidade $O(n \log n)$. A estrutura hierárquica da árvore para os indivíduos é justificada, pois representa naturalmente o mecanismo de filogenia (história evolutiva de uma espécie), no qual indivíduos localizados em ramos próximos podem se reproduzir.

Figura 28 – Exemplo de uma estrutura em árvore.

Fonte: Elaborada pela autora.

Na natureza é esperado que um par de indivíduos localizados geograficamente próximos tenham maiores chances de se reproduzirem (cruzarem) do que dois indivíduos separados por distâncias maiores. Com base nesse princípio, é implementada uma estrutura em grade para organizar os indivíduos como exemplificado na [Figura 29](#).

Figura 29 – Exemplo de uma estrutura em grade.

Fonte: Elaborada pela autora.

Uma ligação entre indivíduos é assumida e, a partir dela, estabelece-se uma estrutura de vizinhança entre os indivíduos. Neste caso, cada *Indivíduo* tem no máximo quatro *Vizinhos*, localizados nas posições superior, inferior, esquerda e direita como ilustrado na [Figura 29](#). Uma das vantagens nesse tipo de estrutura é a baixa complexidade computacional ao se fazer as operações de seleção e adição de novos indivíduos na população.

Cada indivíduo (cromossomo) representa uma solução baseada no vetor de máquinas Y_m . As máquinas para instalação são aleatoriamente escolhidas (atribuindo o valor 1) no procedimento *inicialize(ind)* de acordo com a quantidade máxima de máquinas a serem instaladas ($M_{ax}M$). Isso garante a instalação de pelo menos uma e no máximo $M_{ax}M$ máquinas. A Figura 30 exemplifica os operadores genéticos para o PINF, onde as máquinas Y_2 , Y_4 e Y_{M-2} são escolhidas para serem instaladas.

Figura 30 – Operadores genéticos para o PINF.

Fonte: Elaborada pela autora.

O operador de *cruzamento* verifica os pais selecionados (*ind1* e *ind2*) que já têm máquinas instaladas. O novo indivíduo (*filho*) manterá as máquinas comuns de *ind1* e *ind2*. As outras máquinas disponíveis em *ind1* e *ind2* são selecionadas aleatoriamente, mas sem ultrapassar o valor máximo $M_{ax}M$. A Figura 30 ilustra a união de máquinas de *ind1* e *ind2*, entradas Y_1, Y_2, Y_4, Y_{M-1} e Y_M , onde a interseção é apenas uma entrada Y_{M-1} . O filho terá a interseção Y_{M-1} e um subconjunto selecionado aleatoriamente da união, que neste exemplo são Y_2 e Y_4 .

O operador de *mutação* (*mut*) seleciona aleatoriamente duas entradas e altera seus valores como visto na Figura 30. Nesse caso, as entradas selecionadas são Y_2 e Y_{M-2} com seus valores alterados de 0 para 1 e de 1 para 0, respectivamente. A aptidão é calculada resolvendo o modelo linear quando as variáveis binárias são fixadas no modelo PLIM a partir das máquinas selecionadas na codificação (indivíduo). Assim, os valores ótimos das variáveis contínuas são encontrados para o conjunto binário de valores (configuração da máquina). Este novo indivíduo (*filho*) é adicionado à população, se for melhor do que seu pior pai. O método converge quando um filho não é inserido na população atual. Neste caso, um operador de migração envia o melhor indivíduo da população atual para a próxima a ser evoluída.

As variáveis binárias são inicializadas aleatoriamente em cada indivíduo, mas sem violar as restrições (Equação 3.12) e (Equação 3.15) no AGS e AGMP implementados para o PIMF. Por exemplo, máquinas do tipo Y_{12}, Y_{14} e Y_{17} são inicializadas no forno $f = 1$ na Figura 31.

Figura 31 – Inicialização para o PIMF.

	Y_{fm}	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=4$	$m=5$	$m=6$	$m=7$	
<i>ind</i>	$f=1$	1	0	1	0	1	0	0	1
	$f=2$	0	0	0	0	0	0	0	0

Inicialização

Fonte: Elaborada pela autora.

O operador de *cruzamento* é aplicado sobre dois indivíduos gerando um filho (herdeiro) no AGS e AGMP. Primeiro, os mesmos fornos ativos de *ind1* e *ind2* são herdados pelo *filho*. Em seguida, o filho receberá as máquinas pertencentes simultaneamente a *ind1* e *ind2* para tais fornos ativos. Os outros fornos e máquinas incomuns são selecionados aleatoriamente, uma vez que as restrições (Equação 3.12) não são violadas.

Na *mutação* é escolhido aleatoriamente cinco fornos no *filho* para serem ativados ou não. Se um forno se torna ativo após a mutação, pelo menos uma máquina é selecionada aleatoriamente e anexada ao forno. Se um forno ativo for escolhido, uma entrada Y_{fm} é selecionada aleatoriamente e seu valor muda fazendo $Y_{fm} = 1 - Y_{fm}$. A Figura 32 ilustra os operadores de cruzamento e mutação para o PIMF.

Figura 32 – Operadores genéticos para o PIMF.

	Y_{fm}	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=4$	$m=5$	$m=6$	$m=7$	
<i>ind1</i>	$f=1$	1	0	0	1	0	0	0	
	$f=2$	0	0	0	0	0	0	0	
	$f=3$	1	0	1	0	0	0	0	1
	$f=4$	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>ind2</i>	$f=1$	0	0	0	0	0	0	0	
	$f=2$	1	0	0	0	1	0	1	0
	$f=3$	1	0	0	1	0	0	0	1
	$f=4$	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>filho</i>	$f=1$	0	0	0	0	0	0	0	
	$f=2$	1	0	0	0	1	0	0	
	$f=3$	1	0	1	0	0	0	0	1
	$f=4$	0	0	0	0	0	0	0	0
Cruzamento									
	Y_{fm}	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=4$	$m=5$	$m=6$	$m=7$	
	$f=1$	1	0	0	0	1	0	0	
	$f=2$	1	0	0	1	0	0	0	
	$f=3$	1	0	0	0	0	0	1	
Mutação									

Fonte: Elaborada pela autora.

Algoritmo genético simples

O AGS implementado possui operadores e função de aptidão conforme a descrição no Algoritmo 2. O procedimento *inicialize(ind)* escolhe aleatoriamente as máquinas a serem

instaladas em cada forno, definindo o valor de 1 com base no número mínimo e máximo de máquinas ($M_{in}M$ e $M_{ax}M$). Isso garante a instalação de uma máquina no mínimo e no máximo de $M_{ax}M$. A *seleção* para reprodução é aplicada de acordo com a estrutura populacional. O torneio de três indivíduos é aplicado na população para o AGS como seleção para recombinação.

Algoritmo 2 – Algoritmo Genético Simples.

```

1: para todo ind na população faça
2:   inicialize (ind);
3:   avalie (ind);
4: fim para
5: repita
6:   selecione (pais);
7:   filho  $\leftarrow$  cruzamento (pais);
8:    $\lambda \leftarrow$  um valor aleatório  $\in [0.0, 1.0]$ ;
9:   se  $\lambda \leq$  taxa de mutação então
10:    mutacao (filho);
11:   fim se
12:   avalie (filho);
13:   adicione (filho na população);
14: até critério (tempo de parada)

```

Algoritmo genético multi-populacional

O [Algoritmo 3](#) descreve o AGMP onde a seleção para reprodução *selecione* (pais) seleciona indivíduos a partir dos grupos, conforme explicado anteriormente. Os procedimentos *inicialize* (ind) e *adicione* são os mesmos explicados para o AGS.

Algoritmo 3 – Algoritmo Genético Multi-Populacional.

```

1: repita
2:   para pop na população faça
3:     para ind na pop faça
4:       inicialize (ind);
5:       avalie (ind);
6:     fim para
7:     repita
8:       para j = 1 até número de cruzamento faça
9:         selecione (pais);
10:        filho  $\leftarrow$  cruzamento (pais);
11:         $\lambda \leftarrow$  um valor aleatório  $\in [0.0, 1.0]$ ;
12:        se  $\lambda \leq$  taxa de mutação então
13:          mutacao (filho);
14:        fim se
15:        avalie (filho);
16:        adicione (filho na pop);
17:      fim para
18:    até convergir (pop)
19:  fim para
20:  para pop na população faça
21:    migracao (pop);
22:  fim para
23: até critério (tempo de parada)

```

Algoritmo genético modificado

Neste algoritmo os operadores de inicialização e cruzamento são os mesmos aplicados no [Algoritmo 2](#) e [Algoritmo 3](#), conforme apresentados nas [Figura 31](#) e [Figura 32](#). A população é formada pelo grupo elite que é um grupo pequeno que contém as melhores soluções e o grupo não-elite que é formado pelos remanescentes. A diferença entre os operadores dos genéticos é que no AGM a mutação utilizada reinicializa indivíduos em uma parte da população não-elite, que é um percentual da população ordenada da melhor para pior solução. Além disso, a seleção para o cruzamento é aplicada combinando um indivíduo da população elite e outra da não elite.

O fluxograma na [Figura 33](#) apresenta a sequência do algoritmo que inicia com a geração de soluções aleatórias para o problema, depois fixa a solução e salva o resultado do PL relacionado. Em seguida, verifica se o tempo limite foi alcançado na execução, se sim, pára a execução; senão, segue para o próximo passo que é a organização da população a partir da função de aptidão em elite e não-elite.

Uma cópia da população elite é conservada para a próxima geração. O cruzamento é realizado entre a solução elite (*ind1*) e não elite (*ind2*) como ilustrado na [Figura 32](#), em sequência gera-se novas soluções mutantes e retorna ao passo de fixar, salvar o resultado do PL.

Figura 33 – Fluxograma do AGM.

Fonte: Elaborada pela autora.

Uma ordenação mesclando as populações elite e não-elite é feita e, em seguida, a população é ordenada e dividida em dois grupos de indivíduos (um elite e outro não-elite). Uma cópia da população elite é feita para a próxima geração. Há também uma geração da população mutante, uma combinação entre os indivíduos da população elite e os da não-elite, ou seja, o cruzamento. A [Figura 34](#) apresenta um exemplo de evolução do método. Após ordenar os indivíduos aptos e cruzar os grupos, novos indivíduos são gerados aleatoriamente seguindo a taxa de mutação que dá origem ao conjunto de soluções mutantes.

Figura 34 – Exemplo de evolução no AGM.

Fonte: Elaborada pela autora.

A mutação consiste em substituir uma parcela de indivíduos da população não-elite por novos indivíduos gerados aleatoriamente, da mesma forma empregada para a geração dos indivíduos da população inicial. A taxa de mutação (porcentagem da população não-elite que será substituída) foi definida por meio de experimentos empíricos e é mantida fixa ao longo de todas as gerações.

A avaliação de cada filho (ou novo indivíduo) gerado é realizada resolvendo um modelo de PL. Cada gene representa uma configuração de máquina possível a ser anexada no forno. Se o valor do gene for 1, a máquina nesse gene será ativada ($Y_m = 1$). Caso contrário, será desativado ($Y_m = 0$). Os genes estão fornecendo uma configuração possível para o forno, definindo as variáveis binárias do modelo matemático proposto. Assim, a aptidão será o valor da função objetivo, que resolve o modelo de PL relacionado e retorna as variáveis contínuas.

As combinações das meta-heurísticas com estruturas e com a heurística *FG* formam o Algoritmo Genético Simples com heurística Filtro Guloso (AGS-FG), Algoritmo Genético Multi-Populacional com estrutura árvore (AGMPa), Algoritmo Genético Multi-Populacional com estrutura grade (AGMPg), Algoritmo Genético Multi-Populacional em estrutura de árvore com heurística Filtro Guloso (AGMPa-FG) e Algoritmo Genético Multi-Populacional em estrutura de grade com heurística Filtro Guloso (AGMPg-FG).

4.2.4 Análises estatísticas

Segundo [Morettin e Bussab \(2017\)](#) existem dois tipos de análises estatísticas, as descritivas e as conclusivas. As descritivas são utilizadas para organizar e resumir os dados, sendo apresentadas por meio de gráficos e tabelas; para uma compreensão dos dados de maneira significativa. As conclusivas estudam os dados coletados de forma objetiva e específica por meio de processos analíticos, permitindo a aplicação de testes de hipóteses para se entender e interpretar os resultados analisados.

Nesse trabalho, considera-se os dois tipos de análises estatísticas. Elas foram realizadas

com a ferramenta *Action* (ESTATCAMP, 2018c), que possui um ambiente virtual de aprendizado que ampara a pesquisa de maneira ágil (ESTATCAMP, 2018a).

A análise estatística conclusiva foi utilizada por meio do teste de Anderson-Darling (AD) que mede se os dados seguem uma distribuição específica. Nesse estudo, foi analisado se os dados dos resultados dos métodos aplicados aos modelos PINF e PIMF seguiam uma distribuição normal. Em geral, quanto melhor a distribuição se ajusta aos dados, menor é valor da estatística do teste AD. Os p -valores calculados a partir da estatística AD ajudam a determinar se os dados podem ser analisados por meio de testes paramétricos (ou testes t) ou não paramétricos. Existem outros testes para verificar a normalidade dos dados, como os descritos pela ESTATCAMP (2018e).

As hipóteses para o teste Anderson-Darling são:

- H_0 : os dados seguem uma distribuição normal.
- H_1 : os dados não seguem uma distribuição normal.

Se o p -valor do teste de AD for menor do que o nível de significância escolhido (normalmente 0,05 ou 0,10), infere-se que os dados não seguem a distribuição especificada. Assim, os dados poderão ser avaliados por um teste não paramétrico. Nessa pesquisa, adotou-se o teste Kruskal-Wallis (KW) (MORETTIN; BUSSAB, 2017). Os dados de entrada são feitos por meio da leitura de colunas nomeadas, uma para os métodos que são os *grupos* para a ferramenta e uma outra coluna para as *variável resposta* (Gap, FO e o tempo) com os valores que são comparados, ativando a comparação múltipla. Na Figura 35 são apresentadas as impressões de telas da planilha, exemplificando como fazer o teste de normalidade (Figura 35 (a)) e o teste não paramétrico (Figura 35(b)).

Figura 35 – Impressão da tela da planilha com a ferramenta *Action*.

Fonte: Elaborada pela autora.

O teste de *KW* é uma extensão do teste de Wilcoxon-Mann-Whitney que é baseado nos postos dos valores obtidos combinando-se as duas amostras e não coloca nenhuma restrição sobre a comparação. É um teste não paramétrico utilizado para comparar três ou mais populações, por isso foi adotado nesta pesquisa. Segundo [Estatcamp \(2018d\)](#), este método é usado para testar a hipótese nula de que todas as populações possuem funções de distribuição iguais contra a hipótese alternativa de que ao menos duas das populações possuem funções de distribuição diferentes.

As hipóteses para o teste Kruskal-Wallis são:

- H_0 : todas as populações possuem funções de distribuição iguais.
- H_1 : ao menos duas das populações possuem funções de distribuição diferentes.

Após a aplicação do teste de normalidade *AD* e da verificação que os dados não seguem uma distribuição normal, aplicou-se o teste não paramétrico de *KW*, pois este permite comparar três ou mais populações, ou seja, é o método adequado para a quantidade de comparações existentes nos métodos aplicados em cada modelo. Porém para a comparação de múltiplos dados, existem vários métodos. Nessa pesquisa foi utilizado o Simes-Hochberg (*SH*), pelo mesmo motivo da escolha do *AD*, ou seja, por serem as principais opções na ferramenta *Action*. O *SH* apresenta os resultados dos métodos aplicados aos modelos de forma agrupada e ranqueada (ordenados de maneira decrescente) com um nível de significância de 5%, classificados entre os piores (grupo *A*) e os melhores (grupos *B*, *C* ou *D* ou *E*), após a comparação pareada ([ESTATCAMP, 2018b](#)).

No modelo *PINF* o *KW* avalia a hipótese nula (H_0) de que todas as amostras têm funções de distribuição iguais, com p -valor $\geq 0,05$, versus a hipótese alternativa de que pelo menos uma das amostras tem diferentes funções de distribuição (H_1). As hipóteses são apresentadas na [Equação 4.3](#).

$$KW_{PINF} = \begin{cases} H_0 : CPLEX = AGS = AGS - FG = AGMPa = AGMPg = AGMP - FG = AGMPg - FG, \\ H_1 : CPLEX \neq AGS \neq AGS - FG \neq AGMPa \neq AGMPg \neq AGMPa - FG \neq AGMPg - FG. \end{cases} \quad (4.3)$$

No modelo *PIMF* também foi realizado o teste *KW* na análise estatística conclusiva. O teste avalia a hipótese nula (H_0) que todas as amostras têm funções de distribuição iguais, com p -valor $\geq 0,05$, comparado com a hipótese alternativa de que pelo menos uma das amostras tem funções de distribuição diferentes (H_1). As hipóteses são apresentadas na [Equação 4.4](#).

$$KW_{PIMF} = \begin{cases} H_0 : CPLEX = AGS = AGMP = AGM, \\ H_1 : CPLEX \neq AGS \neq AGMP \neq AGM. \end{cases} \quad (4.4)$$

As análises estatísticas descritivas foram utilizadas em todos os modelos descritos e resolvidos nessa tese. Tabelas, gráficos de barras e linhas foram elaboradas para apresentar os resultados alcançados pelos métodos exatos, heurísticos e meta-heurísticos aplicados aos problemas. As tabelas, gráficos e as análises estatísticas são apresentados no [Capítulo 5](#).

RESULTADOS

Os resultados de cada modelo serão apresentados detalhadamente a seguir. De acordo com os testes computacionais, instâncias práticas dos modelos são resolvidos na otimalidade pelo método exato CPLEX em um tempo computacional razoável. Por outro lado, há modelos que apresentam dificuldades de resolução, principalmente em exemplares com mais produtos e/ou períodos. Por essa razão, foram desenvolvidas estratégias como métodos heurístico e meta-heurísticos para resolução, a fim de se obter bons limitantes superiores com um tempo computacional aceitável.

5.1 Construção ou reforma de fornos e configurações de máquinas

Resultados do modelo para o PINF

Um total de sete métodos são propostos para resolver instâncias do PINF: um método exato e seis algoritmos genéticos. O CPLEX, descrito na [Subseção 4.2.1](#). Os seis algoritmos genéticos são dois AGS e quatro AGMP. Os algoritmos genéticos são avaliados com e sem a heurística *FG*, ou seja, utilizando ou não informações específicas do problema para melhorar a exploração do espaço de busca. O AGMP é avaliado com indivíduos dispostos em estruturas de grade e árvore, bem como combinado com e sem heurística *FG*. Os parâmetros para os operadores do genéticos estão apresentados na [Tabela 9](#). Todos os métodos foram executados no tempo limite de 3600 segundos (1 hora) como critério de parada.

Tabela 9 – Valores dos parâmetros dos operadores.

Métodos	Número de Populações	Número de Indivíduos	Taxa de Cruzamento	Taxa de Mutação
AGS	–	39	5.0	0.7
AGS-FG	–	39	5.0	0.7
AGMPa	3	3x13	5.0	0.7
AGMPg	3	3x13	5.0	0.7
AGMPa-FG	3	3x13	5.0	0.7
AGMPg-FG	3	3x13	5.0	0.7

Fonte: Dados da pesquisa.

Instâncias de pequeno porte

Os resultados de todos os métodos, aplicados ao conjunto de instâncias de pequeno porte, estão na [Tabela 10](#). O CPLEX retornou 36 de 100 soluções ótimas, onde apenas o subconjunto SMB100 tinha todas as soluções ótimas encontradas. Nos cenários em que o número de máquinas (SMB) aumenta, o CPLEX encontra 22 soluções ótimas e apenas 14 soluções ótimas para cenários que aumentam o horizonte de tempo (SHB). Os algoritmos genéticos têm um baixo desempenho em busca de soluções ótimas, onde o AGS não encontrou soluções ótimas e os AGMPs encontram um número reduzido de soluções ótimas. Os algoritmos evolutivos apresentam um desempenho ligeiramente melhor ao aplicar a heurística do *FG*. Neste caso, AGS-FG, AGMPa-FG e AGMPg-FG encontram 7, 9 e 9 soluções ótimas, respectivamente.

Tabela 10 – O número de soluções ótimas por método.

Número de soluções ótimas							
Grupos	CPLEX	AGS	AGS-FG	AGMPa	AGMPg	AGMPa-FG	AGMPg-FG
SMB100	10	0	2	1	3	2	2
SMB200	6	0	1	0	0	1	1
SMB300	1	0	2	0	0	2	2
SMB400	5	0	1	1	0	3	3
SMB500	0	0	0	0	0	0	0
Total	22	0	6	2	3	8	8
SHB04	6	0	0	0	0	0	0
SHB06	4	0	0	0	0	0	0
SHB08	2	0	0	0	0	0	0
SHB10	1	0	0	0	0	0	0
SHB12	1	0	1	0	1	1	1
Total	14	0	1	0	1	1	1

Fonte: Dados da pesquisa.

Para cada método, é apresentado o GAP das instâncias ordenado do menor para o

maior na Figura 36. O CPLEX apresenta o menor GAP para a maioria das pequenas instâncias, enquanto o AGS tem o maior desvio. AGMPa-FG e AGMPg-FG têm desempenho similar e não estão tão distantes do desvio do CPLEX.

Figura 36 – Resultados ordenados dos GAPs para instâncias de pequeno porte.

Fonte: Elaborada pela autora.

Os tempos computacionais gastos por cada método para alcançar a melhor solução são apresentados na Figura 37. Esses valores de tempo são classificados do menor para o maior valor, para cada método dentro de cada instância. Os métodos aplicando a heurística *FG* apresentam o melhor desempenho, o que é esperado, uma vez que estão utilizando algum conhecimento prévio do problema para decidir ou não pela resolução do modelo de programação linear no cálculo do *fitness*.

Figura 37 – Resultados ordenados dos tempos para instâncias de pequeno porte.

Fonte: Elaborada pela autora.

Uma análise estatística, aplicando os testes de KW e SH, baseado no valor GAP e no tempo das instâncias de pequeno porte é apresentada na [Tabela 11](#) e na [Tabela 12](#).

Tabela 11 – Análise estatística dos GAPs para instâncias de pequeno porte.

Análise para os GAPs									
Grupos de Instâncias	GAP		Classificação dos métodos						
	KW	P-valor	CPLEX	AGS	AG-FG	AGMPa	AGMPg	AGMPa-FG	AGMPg-FG
SMB100	23.10	0.000	B	A	A	A	AB	AB	AB
SMB200	38.64	0.000	C	A	AB	A	A	BC	BC
SMB300	29.90	0.000	C	A	ABC	A	AB	BC	BC
SMB400	37.44	0.000	E	A	BC	BCD	AB	DE	CDE
SMB500	39.20	0.000	B	A	A	A	A	B	B
SHB04	39.50	0.000	C	A	AB	A	A	BC	BC
SHB06	44.88	0.000	C	A	AB	B	AB	C	C
SHB08	27.37	0.000	C	A	ABC	AB	A	ABC	BC
SHB10	24.94	0.000	B	A	AB	AB	AB	B	B
SHB12	29.68	0.000	BC	A	AB	AB	AB	C	BC

Fonte: Dados da pesquisa.

Os valores de p do teste de KW mostram diferenças significativas, pois são menores que 0.05 (5%), como apresentado na [Tabela 11](#). A comparação pareada indica que o CPLEX, alcança os valores mais baixos na classificação dos grupos e um empate entre AGMPa-FG e AGMPg-FG para os subconjuntos SMB100, SMB200, SMB300, SMB500, SHB04, SHB06 e SHB10. O CPLEX tem o menor valor de classificação em 9 de 10 subconjuntos. O método AGMPa-FG se destaca no grupo SMB400 e SHB12, enquanto o AGMPg-FG se destaca pelo grupo SHB08.

Tabela 12 – Análise estatística dos tempos para instâncias de pequeno porte.

Análise para os tempos									
Grupos de Instâncias	Melhores tempos		Classificação dos métodos						
	KW	P-valor	CPLEX	AGS	AGS-FG	AGMPa	AGMPg	AGMPa-FG	AGMPg-FG
SMB100	35.47	0.000	BC	AB	BC	A	A	C	C
SMB200	28.40	0.000	A	A	BC	A	AB	C	BC
SMB300	28.46	0.000	A	AB	C	A	A	BC	C
SMB400	32.97	0.000	A	A	B	A	A	B	B
SMB500	40.70	0.000	A	BC	D	AB	AB	CD	CD
SHB04	17.01	0.009	AB	AB	B	A	AB	B	AB
SHB06	26.00	0.000	A	AB	AB	A	A	B	B
SHB08	24.39	0.000	A	B	B	AB	AB	B	B
SHB10	19.52	0.003	A	AB	B	A	A	AB	AB
SHB12	29.38	0.000	A	BC	C	AB	AB	BC	ABC

Fonte: Dados da pesquisa.

A análise estatística baseada no menor tempo computacional para alcançar a melhor solução para cada instância é apresentada na [Tabela 12](#). O teste de KW encontra uma diferença significativa novamente, pois todos os valores de p são menores que 0.05 (5 %). O CPLEX não alcança os valores mais baixos na classificação dos grupos. Os algoritmos genéticos combinados

com a heurística *FG* geralmente são os métodos que convergem mais rapidamente para suas melhores soluções. Este é um comportamento esperado por um algoritmo evolutivo, principalmente quando se utiliza o conhecimento prévio do problema, como determinado pela heurística *FG* neste caso. Assim, AGMPa-FG vinculado com AGMPg-FG para SMB100, SMB400, SHB06 e SHB08. AGS-FG empatado com AGMPg-FG para SMB300 e SHB08, e com AGMPa-FG para SMB400 e SHB04.

Instâncias de grande porte

O número de soluções possíveis encontradas por cada método no conjunto de instâncias de grande porte são apresentados na [Tabela 13](#). Observa-se que nenhum dos métodos foi capaz de encontrar soluções ótimas dentro do limite de tempo de execução, mas todos os algoritmos genéticos retornaram soluções viáveis para todas as instâncias. O CPLEX retorna 26 de 100 soluções possíveis, onde apenas no subconjunto LMB1000 todas as soluções possíveis foram encontradas. Para as instâncias do conjunto LMB, CPLEX encontrou 15 soluções viáveis contra apenas 11 para cenários LHB, ou seja, aumentando o horizonte de tempo (LHB).

Tabela 13 – O número de soluções factíveis por métodos.

Número de soluções factíveis							
Grupos	CPLEX	AGS	AG-FG	AGMPa	AGMPg	AGMPa-FG	AGMPg-FG
LMB1000	10	10	10	10	10	10	10
LMB2000	4	10	10	10	10	10	10
LMB3000	0	10	10	10	10	10	10
LMB4000	1	10	10	10	10	10	10
LMB5000	0	10	10	10	10	10	10
Total	15	50	50	50	50	50	50
LHB04	7	10	10	10	10	10	10
LHB06	2	10	10	10	10	10	10
LHB08	1	10	10	10	10	10	10
LHB10	1	10	10	10	10	10	10
LHB12	0	10	10	10	10	10	10
Total	11	50	50	50	50	50	50

Fonte: Dados da pesquisa.

A [Figura 38](#) mostra o tempo gasto para encontrar a melhor solução, de modo análogo a [Figura 37](#). Os métodos que aplicam a heurística *FG* apresentam o menor tempo como esperado e o método CPLEX atinge poucas soluções para instâncias grandes.

Figura 38 – Resultados ordenados dos tempos para instâncias de grande porte.

Fonte: Elaborada pela autora.

A próxima análise não consideram os resultados CPLEX para instâncias grandes, já que o método não conseguiu encontrar soluções viáveis para todas as instâncias. A análise estatística é baseada nos valores da FO e tempo, mas aplica-se o teste não paramétrico porque esses valores não satisfazem o teste de normalidade.

Tabela 14 – Análise estatística dos valores das FOs para as instâncias de grande porte.

Análise dos valores da função objetivo								
Grupos de Instâncias	GAP		Classificação dos métodos					
	KW	P-valor	AGS	AGS-FG	AGMPa	AGMPg	AGMPa-FG	AGMPg-FG
LMB1000	1.64	0.949	A	A	A	A	A	A
LMB2000	0.67	0.984	A	A	A	A	A	A
LMB3000	1.00	0.961	A	A	A	A	A	A
LMB4000	1.30	0.934	A	A	A	A	A	A
LMB5000	1.12	0.952	A	A	A	A	A	A
LHB04	2.56	0.861	A	A	A	A	A	A
LHB06	1.43	0.920	A	A	A	A	A	A
LHB08	0.64	0.985	A	A	A	A	A	A
LHB10	0.91	0.968	A	A	A	A	A	A
LHB12	1.35	0.929	A	A	A	A	A	A

Fonte: Dados da pesquisa.

Não há diferença significativa entre os algoritmos genéticos, uma vez que todos os valores de p são maiores que 0.05 (5%) para os valores das FOs como mostra a [Tabela 14](#). Além disso, todos os métodos estão no mesmo grupo de classificação do teste SH. Assim, os algoritmos genéticos retornam valores de função objetivo (aptidão) similares para todas as instâncias grandes. Por outro lado, a [Tabela 15](#) mostra uma diferença significativa avaliando o tempo para alcançar a melhor solução.

Tabela 15 – Análise estatística para os tempos das instâncias de grande porte.

Análise para os tempos								
Grupos de Instâncias	GAP		Classificação dos métodos					
	KW	P-valor	AGS	AGS-FG	AGMPa	AGMPg	AGMPa-FG	AGMPg-FG
LMB1000	20.04	0.002	B	AB	A	A	AB	AB
LMB2000	14.78	0.011	B	AB	A	AB	AB	B
LMB3000	19.12	0.001	C	A	AB	ABC	BC	ABC
LMB4000	13.96	0.015	AB	A	AB	AB	AB	B
LMB5000	16.94	0.004	AB	A	AB	AB	B	B
LHB04	30.67	0.000	D	ABC	AB	ABC	CD	BCD
LHB06	21.25	0.000	C	A	ABC	AB	BC	BC
LHB08	16.23	0.006	B	A	AB	AB	A	AB
LHB10	24.62	0.000	CD	A	ABC	AB	D	BCD
LHB12	24.81	0.000	AB	A	ABC	BC	C	BC

Fonte: Dados da pesquisa.

O teste Simes-Hochberg indica um melhor desempenho do AGS para os subconjuntos LMB1000, LMB2000 e LMB3000, enquanto o AGMPg-FG é melhor para o LMB4000 e está junto ao AGMPa-FG para o LMB5000. Um comportamento similar acontece resolvendo instâncias de LHB, onde AGS é melhor para LHB04, LHB06, LHB08, enquanto AGMPa-FG é melhor para resolver LHB10 e LHB12. Em termos de tempo, para alcançar a melhor solução, uma abordagem simples como o AGS parece ser mais eficiente até 3000 máquinas e até 8 períodos. O AGMPa-FG e AGMPg-FG são melhores para cenários com 4000 e 5000 máquinas e grandes horizontes com 10 e 12 períodos.

Para tornar esse trabalho viável, as empresas forneceram dados reais sobre os custos e configurações de máquinas, mas não forneceram os dados de planejamento de produção. Portanto, não foi possível fazer uma comparação com os resultados reais. No entanto, o modelo proposto não pretende refletir uma determinada produção realizada, mas sim tomar a decisão, com base no histórico de demanda ou previsão de demanda futura, sobre o layout da planta ao se construir um novo forno.

Resultados do modelo para o PIMF

Um total de quatro métodos foram propostos para resolver as instâncias criadas para o PIMF, o CPLEX e três genéticos que são: AGS, AGMP e AGM (descritos no [Capítulo 4](#)). O AGMP é avaliados com heurística *FG* e os indivíduos dispostos na estrutura árvore (AGMPa-FG). Os parâmetros para os operadores dos algoritmos genéticos estão nas [Tabela 16](#) e [Tabela 17](#). O critério de parada para todos os métodos é de 10.800 segundos (3 horas) para executar cada método em cada instância, sendo que cada algoritmo genético foi executado dez vezes em cada instância. Os valores na [Tabela 16](#) são baseados nos melhores resultados relatados por [Toledo et al. \(2013a\)](#).

Tabela 16 – Valores dos parâmetros dos operadores.

Parâmetros dos operadores				
Métodos	Tamanho da população	Número de indivíduos	Taxa de cruzamento	Taxa de mutação
AGS	–	39	5.0	0.7
AGMPa-FG	3	3x13	5.0	0.7

Fonte: Dados da pesquisa.

O desempenho do AGM depende dos valores atribuídos aos parâmetros de controle. Assim, a [Tabela 17](#) apresenta as configurações de parâmetro para o AGM que estão baseadas nos melhores valores reportados por [Gonçalves e Resende \(2011\)](#).

Tabela 17 – Parâmetros do AGM.

Parâmetros	Descrição	Valores
p	Tamanho da população	100
p_e	Tamanho da população elite	0.20
p_m	Tamanho da população mutante	0.10
ρ_e	Probabilidade de herança do alelo de elite	0.70

Fonte: Dados da pesquisa.

Os resultados encontrados pelo CPLEX são apresentados na [Tabela 18](#), podendo ser uma solução ótima (SO), uma solução factível (SF) (melhor solução encontrada dentro do limite de tempo) ou sem solução (SS) para cada grupo de instâncias. O CPLEX obtém apenas 12 soluções ótimas entre 140 soluções possíveis.

Tabela 18 – Soluções obtidas.

Tipos de Soluções	M100	P100	Total
SO	5	7	12
SF	31	36	67
SS	34	27	61

Fonte: Dados da pesquisa.

Os resultados obtidos pelos métodos para cada grupo de instância é apresentado na [Tabela 19](#). O CPLEX não retorna SO para 12 grupos, porém encontra SF exceto para P100-M175 e P100-M200. Os algoritmos evolutivos encontram soluções viáveis para todas as instâncias dentro de todas as 10 execuções.

Tabela 19 – Soluções dos métodos.

Instâncias	Resultados do CPLEX			Resultados do AGS			Resultados do AGMPa-FG			Resultados do AGM		
	SO	SF	SS	SO	SF	SS	SO	SF	SS	SO	SF	SS
M100-P025	4	5	1	0	10	0	0	10	0	0	10	0
-P050	0	8	2	0	10	0	1	10	0	1	10	0
-P075	0	7	3	0	10	0	0	10	0	0	10	0
-P125	1	5	4	0	10	0	0	10	0	0	10	0
-P150	0	6	4	0	10	0	0	10	0	0	10	0
-P175	0	0	10	0	10	0	0	10	0	0	10	0
-P200	0	0	10	0	10	0	0	10	0	0	10	0
P100-M025	6	4	0	0	10	0	0	10	0	0	10	0
-M050	1	9	0	0	10	0	0	10	0	0	10	0
-M075	0	8	2	0	10	0	0	10	0	0	10	0
-M125	0	6	4	0	10	0	1	10	0	1	10	0
-M150	0	5	5	0	10	0	0	10	0	0	10	0
-M175	0	3	7	0	10	0	0	10	0	0	10	0
-M200	0	1	9	0	10	0	0	10	0	0	10	0

Fonte: Dados da pesquisa.

A média dos GAPs para todas as soluções encontradas é apresentada na [Tabela 20](#). Nesse caso, são considerados os valores do limitante inferior apenas das 79 instâncias (12 ótimas e 67 factíveis) retornados pelo CPLEX. O GAP médio retornado pela AGMPa-FG e AGM se destaca no conjunto P100, superando o GAP do CPLEX.

Tabela 20 – Médias dos GAPs.

Métodos	Grupos	
	M100	P100
GAP_CPLEX	6.28%	6.77%
GAP_AGS	12.43%	9.31%
GAP_AGMPa-FG	8.10%	6.76%
GAP_AGM	7.71%	6.48%

Fonte: Dados da pesquisa.

Análise descritiva para o grupo de instância M100

As soluções alcançadas pela função objetivo de cada método no grupo M100 nos sete subconjuntos de cada uma das 10 instâncias estão representadas na [Figura 39](#), onde destaca-se a qualidade das soluções alcançadas pelos AGMPa-FG e AGM nos subconjuntos -P050, -P150, -P175 e -P200.

Figura 39 – Média das FOs para M100.

Fonte: Elaborada pela autora.

A média ordenada dos melhores tempos para cada subconjunto do grupo M100 é apresentada na Figura 40. Para melhor avaliar o tempo dos métodos, não foram considerados os resultados do método CPLEX, visto que os mesmos sempre ficam próximo do tempo limite. Observe que a média de tempo do AGM se destaca nos subconjuntos -P025, -P050, -P075 e -P125, por ser a menor em relação aos demais métodos, enquanto que no subconjunto -P150 há um empate entre o AGMPa-FG e o AGM. No subconjunto -P175, o AGS possui a menor média e o método AGMPa-FG tem a menor média de tempo no subconjunto -P200.

Figura 40 – Média dos tempos para M100.

Fonte: Elaborada pela autora.

As médias do número de avaliações (cálculos de *fitness*) para cada método no grupo M100 são representadas na Figura 41. Em todos os subconjuntos, o método com maior média foi o AGS que executou mais avaliações que os outros métodos. Os métodos AGMPa-FG e AGM praticamente empatam no subconjunto -P150. O AGM alcança maior média nos subconjuntos -P125, -P175 e -P200 e o AGMPa-FG nos subconjuntos -P025, -P050 e -P075.

Figura 41 – Melhores avaliações para M100.

Fonte: Elaborada pela autora.

A Figura 42 representa uma solução para o grupo M100, especificamente para a instância -P050, onde o CPLEX obteve uma solução factível, que determina a construção de apenas um forno com cinco máquinas. As configurações das máquinas apresentam os números de seções iguais as 8, 10, 12 e 20. Os tipos de bocas são DG e TG.

Figura 42 – Solução representativa para M100.

Fonte: Elaborada pela autora.

Análise descritiva para o grupo de instância P100

As soluções alcançadas pela função objetivo de cada método em cada uma das 10 instâncias, pertencentes aos sete subconjuntos do grupo P100, estão representadas na Figura 43. Observa-se a melhor qualidade das soluções alcançadas pelo método CPLEX, nos subconjuntos -M025e -M075, e pelos genéticos AGMPa-FG e AGM nos subconjuntos -M150, -M175 e -M200.

Figura 43 – Média das FOs para P100.

Fonte: Elaborada pela autora.

A média ordenada dos melhores tempos para cada subconjunto do grupo P100 é representada na [Figura 44](#). Destaca-se a menor média de tempo para o AGM em todos os subconjuntos e o AGS com a pior média.

Figura 44 – Média dos tempos para P100.

Fonte: Elaborada pela autora.

As médias dos números de avaliações para cada método no grupo P100 são representadas na [Figura 45](#). O método AGMPa-FG avaliou mais no subconjunto -M050, porém, o AGM avaliou mais nos demais subconjuntos: -M025, -M125, -M150, -M175 e -M200.

Figura 45 – Melhores avaliações para P100.

Fonte: Elaborada pela autora.

A Figura 46 representa uma solução factível alcançada pelo CPLEX para o grupo P100, especificamente para o subconjunto -M150. A solução mostra a necessidade de instalar dois fornos e seis máquinas com os números de seções 10, 12 e 16. Os tipos de bocas são DG, TG e QG.

Figura 46 – Solução representativa para P100.

Fonte: Elaborada pela autora.

Análise estatística conclusiva

A análise estatística com o teste de *SH* compara as instâncias do grupo M100 e P100 com base nos valores da função objetivo, no GAP, no tempo e na avaliação de cada método. No teste de *SH*, os métodos são classificados entre os piores (grupo **A**) e os melhores (grupos **B** ou **C** ou **D**), após a comparação pareada e classificação.

Os valores alcançados nas funções objetivos dos métodos é apresentada na Tabela 21 para análise estatística, onde é visto a diferença estatística entre eles. Note que o CPLEX alcança melhores valores nos subconjuntos -M075, -M125, -M150 e -M175 do grupo P100. Enquanto

que, no grupo M100 o mesmo método se destaca nos subconjuntos -P075 e -P125. Entre os genéticos, o único subconjunto que se destaca é o -M175 para o AGMPa-FG e AGM, pois ambos ficaram no mesmo grupo **B**. Os grupos (-P175, -P200, -M175 e -M200) sem soluções no CPLEX são representados por (-).

Tabela 21 – Análise estatística das FOs.

Estatística das FO						
Instâncias	KW	P-valor	CPLEX	AGS	AGMPa-FG	AGM
M100-P025	5E+00	2E-01	A	A	A	A
-P050	3E+00	4E-01	A	A	A	A
-P075	8E+00	6E-02	B	A	AB	AB
-P125	2E+01	9E-05	C	A	B	B
-P150	2E+01	1E-04	B	A	B	B
-P175	2E+01	4E-05	-	A	B	B
-P200	2E+01	6E-05	-	A	B	B
P100-M025	2E+00	6E-01	A	A	A	A
-M050	2E+00	6E-01	A	A	A	A
-M075	9E+00	3E-02	B	A	AB	AB
-M125	2E+01	9E-04	B	A	A	A
-M150	1E+01	9E-03	B	A	AB	AB
-M175	1E+01	2E-03	-	A	B	B
-M200	1E+01	6E-03	-	A	B	B

Fonte: Dados da pesquisa.

A [Tabela 22](#) representa a análise estatística para o melhor tempo gasto pelos métodos para encontrar as soluções. Note que o AGM apresenta uma diferença significativa no grupo P100, nos subconjuntos -M025, -M050 (grupo **D**), -M075 e -M200 (grupo **C**). No grupo M100, o AGM também alcançou uma diferença significativa no melhor tempo de execução para os subconjuntos -P050 e -P075.

Tabela 22 – Análise estatística dos tempos.

Estatística dos tempos						
Instâncias	KW	P-valor	CPLEX	AGS	AGMPa-FG	AGM
M100-P025	2E+01	1E-03	A	B	B	B
-P050	2E+01	9E-04	A	A	A	B
-P075	2E+01	1E-03	A	A	A	B
-P125	5E+00	2E-01	A	A	A	A
-P150	3E+00	5E-01	A	A	A	A
-P175	5E+00	8E-01	-	A	A	A
-P200	4E+00	2E-01	-	A	A	A
P100-M025	3E+01	2E-07	A	B	C	D
-M050	3E+01	3E-07	A	B	C	D
-M075	2E+01	1E-04	A	A	B	C
-M125	9E+00	3E-02	AB	A	AB	B
-M150	1E+01	8E-03	AB	A	AB	B
-M175	2E+01	7E-05	-	A	B	B
-M200	2E+01	1E-05	-	A	B	C

Fonte: Dados da pesquisa.

A análise estatística para as avaliações dos algoritmos genéticos é apresentada na [Tabela 23](#). Observa-se uma diferença significativa alcançada pelo AGS nos subconjunto -M200 do grupo P100 e nos subconjuntos -P150, -P175 e -P200 do grupo M100.

Tabela 23 – Análise estatística das avaliações.

Estatística das avaliações					
Instâncias	KW	P-valor	AGS	AGMPa-FG	AGM
M100-P025	9E-01	6E-01	A	A	A
-P050	1E+00	6E-01	A	A	A
-P075	1E+00	6E-01	A	A	A
-P125	1E+00	5E-01	A	A	A
-P150	1E+01	2E-03	B	A	A
-P175	1E+01	1E-03	B	A	A
-P200	2E+01	3E-05	C	B	A
P100-M025	5E-02	1E+00	A	A	A
-M050	4E+00	1E-01	A	A	A
-M075	4E-01	8E-01	A	A	A
-M125	2E+00	4E-01	A	A	A
-M150	2E+00	3E-01	A	A	A
-M175	4E+00	4E-01	A	A	A
-M200	9E+00	1E-02	B	AB	A

Fonte: Dados da pesquisa.

5.2 Planejamento e controle da produção de ampolas

Resultados do modelo para o EC1

Neste primeiro estudo, um modelo real (Modelo-R) e um modelo alternativo (Modelo-A) foram elaborados para descrever tal problema. O Modelo-R é fidedigno às informações inicialmente fornecidas pela fábrica Z. O Modelo-A foi elaborado visando a obtenção de ganho na produtividade, no qual considera-se a mesma FO com todas as restrições que seguem, exceto a restrição [Equação 3.31](#) do Modelo-R. Essa alteração proporcionará mais flexibilidade para o processo produtivo da empresa.

Nos experimentos computacionais, as 30 instâncias foram resolvidas na otimalidade pelos dois modelos. A seguir os resultados são apresentados por categoria de planejamento: operacional, tático e estratégico ([SOBRAL; PECI, 2008](#)). Nesse caso, operacional considera o curto prazo (7 dias), tático assume um plano de médio prazo (1 mês) e o estratégico assim um plano de longo prazo (1 trimestre).

Resultados para o planejamento operacional

Os valores de cada FO da instância correspondente aos respectivos modelos são apresentadas na [Tabela 24](#), bem como a diferença entre elas e o percentual de ganho. As instâncias A2E1T7, A3E2T7, A4E2T7 e A5E2T7 foram destacadas por apresentarem ganhos ao serem resolvidas pelo Modelo-A. No período de planejamento operacional, o ganho chega a R\$ 57.324,37 por semana.

Tabela 24 – Planejamento operacional.

Resultado dos Modelos no Planejamento Operacional				
Instâncias	FO Modelo-R	FO Modelo-A	Diferença	% de Ganho
A1E1T7	355480.27	355480.27	0.00	0.00
A1E2T7	355480.27	355480.27	0.00	0.00
A2E1T7	392216.57	401103.57	8887.01	2.27
A2E2T7	419610.05	419610.05	0.00	0.00
A3E1T7	419610.05	419610.05	0.00	0.00
A3E2T7	361492.78	384527.39	23034.61	6.37
A4E1T7	419610.05	419610.05	0.00	0.00
A4E2T7	309969.94	367294.31	57324.37	18.49
A5E1T7	419610.05	419610.05	0.00	0.00
A5E2T7	333566.32	372526.07	38959.75	11.68

Fonte: Dados da pesquisa.

Na [Figura 47](#), são comparados os valores obtidos na FO de cada um dos modelos para o período de planejamento operacional. Observa-se também que para as instâncias A1E1T7, A1E2T7, A2E2T7, A3E1T7, A4E1T7 e A5E1T7, o Modelo-R é similar ao Modelo-A. Dentre os

resultados, destaca-se a instância A4E2T7 que alcança o valor R\$ 57.324,37. São apresentados também os percentuais de ganho para as instâncias destacadas: A2E1T7, A3E2T7, A4E2T7 e A5E2T7, com ganhos de 2.27%, 6.37%, 18.49% e 11.68%, respectivamente.

Figura 47 – FO e ganhos no planejamento operacional.

Fonte: Elaborada pela autora.

O tempo total de execução para cada instância em ambos os modelos no período de planejamento operacional é apresentado na Figura 48, onde destacam-se as instâncias A2E2T7 e A4E1T7 com menor tempo no Modelo-A comparado ao Modelo-R.

Figura 48 – Tempo no planejamento operacional.

Fonte: Elaborada pela autora.

Resultados para o planejamento tático

Os valores de cada FO da instância correspondente no respectivo modelo são apresentados na Tabela 25, a diferença entre elas e o percentual de ganho. Destacam-se as instâncias A2E1T30, A3E2T30, A4E2T30 e A5E2T30 por apresentarem ganhos ao serem resolvidas pelo Modelo-A.

Tabela 25 – Planejamento tático.

Resultado dos Modelos no Planejamento Tático				
Instâncias	FO Modelo-R	FO Modelo-A	Diferença	% de Ganho
A1E1T30	1581887.21	1581887.21	0.00	0.00
A1E2T30	1581887.21	1581887.21	0.00	0.00
A2E1T30	1781877.78	1834329.04	52451.26	2.94
A2E2T30	1867264.71	1867264.71	0.00	0.00
A3E1T30	1867264.71	1867264.71	0.00	0.00
A3E2T30	1749130.33	1799823.44	50693.11	2.90
A4E1T30	1867264.71	1867264.71	0.00	0.00
A4E2T30	1697607.49	1774062.02	76454.53	4.50
A5E1T30	1867264.71	1867264.71	0.00	0.00
A5E2T30	1748724.08	1791745.94	43021.86	2.46

Fonte: Dados da pesquisa.

A [Figura 49](#) apresenta uma comparação entre os valores obtidos na FO de cada um dos modelos no período de planejamento operacional, onde descreve-se os ganhos oferecidos para cada uma destas instâncias à empresa, caso sejam adotadas como entradas no Modelo-A. Observa-se que o Modelo-R é similar ao Modelo-A para as instâncias A1E1T30, A1E2T30, A2E2T30, A3E1T30, A4E1T30 e A5E1T30. Destacando a instância A4E2T30 que alcança o valor R\$ 76.454,53. Os percentuais de ganho para as instâncias também são apresentados, sendo que A2E1T7, A3E2T7, A4E2T7 e A5E2T7 alcançam valores de 2.94%, 2.90%, 4.5% e 2.46%, respectivamente.

Figura 49 – FO e ganhos no planejamento tático.

Fonte: Elaborada pela autora.

O tempo total de execução para cada instância, em ambos modelos no período de planejamento tático, é representado na [Figura 50](#). Nota-se que as instâncias A4E1T30 e A5E2T30 alcançam os menores tempos e a A4E2T30 alcança o melhor percentual de ganho em um menor tempo no Modelo-A comparado ao Modelo-R.

Figura 50 – Tempo no planejamento tático.

Fonte: Elaborada pela autora.

Resultados para o planejamento estratégico

Os valores de cada FO da instância correspondente no respectivo modelo, a diferença entre elas e o percentual de ganho são apresentadas na [Tabela 26](#). As instâncias A2E1T90, A3E1T90, A3E2T90, A4E1T90, A4E2T90 e A5E2T90 foram destacadas neste planejamento por apresentarem ganhos ao serem resolvidas pelo Modelo-A. No período de planejamento estratégicos, o ganho mínimo chega a R\$ 13.198,33 trimestral.

Tabela 26 – Planejamento estratégico.

Resultado dos Modelos no Planejamento Estratégico				
Instâncias	FO Modelo-R	FO Modelo-A	Diferença	% de Ganho
A1E1T90	4781209.66	4781209.66	0.00	0.00
A1E2T90	4781209.66	4781209.66	0.00	0.00
A2E1T90	5519890.35	5548154.62	28264.26	0.51
A2E2T90	5643755.15	5643755.15	0.00	0.00
A3E1T90	5552364.67	5565563.00	13198.33	0.24
A3E2T90	5436807.43	5483438.43	46630.99	0.86
A4E1T90	5552364.67	5565563.00	13198.33	0.24
A4E2T90	5346031.66	5457677.00	111645.34	2.09
A5E1T90	5552364.67	5552364.67	0.00	0.00
A5E2T90	5452096.46	5491056.21	38959.75	0.71

Fonte: Dados da pesquisa.

Uma comparação entre os valores obtidos na FO de cada um dos modelos para o período de planejamento operacional é apresentada na [Figura 51](#). A instância A4E2T90 atinge o valor de R\$ 111.645,34. Os percentuais de ganho para as instâncias destacadas, A2E1T90, A3E1T90, A3E2T90, A4E1T90, A4E2T90 e A5E2T90, são 0.51%, 0.24%, 0.86%, 0.24%, 2.09% e 0.71%, respectivamente.

Figura 51 – FO e ganhos no planejamento estratégico.

Fonte: Elaborada pela autora.

O tempo total de execução para cada instância em ambos os modelos no período de planejamento estratégico é apresentado na Figura 52. A instância A5E2T90 descreve um percentual de ganho em um tempo menor no Modelo-A quando comparado ao Modelo-R.

Figura 52 – Tempo no planejamento estratégico.

Fonte: Elaborada pela autora.

Resultados do modelo para o EC2

Neste segundo estudo, o modelo elaborado descreve de forma fidedigna às últimas informações fornecidas pela fábrica Z. Nos experimentos computacionais, as 20 instâncias foram resolvidas na otimalidade pelo modelo. A seguir são apresentados os resultados por grupos de instâncias.

A quantidade de *set-up* em cada trimestre é apresentada na Tabela 27. O número de *set-up*'s na coluna *Real* mostra a quantidade de preparações feitas nas trocas entre as ampolas. A partir dos dados reais do PCP, foram obtidas as quantidades apresentadas na coluna *EC2-PCP*. Enquanto que, na coluna *EC2-Prod*, são retratados os dados da produção alcançada pela fábrica Z. Destacam-se os trimestres 1-JFM, 2-FMA, 4-AMJ, 8-ASO, 9-SON e 10-OND, em que o número de *set-ups* obtidos pelo modelo, com as instâncias geradas a partir dos dados do PCP e da Produção, foram iguais ou menores aos números de *set-ups* reais da fábrica Z.

Tabela 27 – Número de *set-up* por trimestre.

Trimestres	Número de Set-up's		
	Real	EC2-PCP	EC2-Prod
1-JFM	4	3	3
2-FMA	4	4	3
3-MAM	3	3	3
4-AMJ	4	3	3
5-MJJ	3	3	3
6-JJA	3	3	3
7-JAS	3	3	3
8-ASO	4	3	3
9-SON	4	2	2
10-OND	4	3	2

Fonte: Dados da pesquisa.

Apresentando a produção líquida alcançada pelo modelo EC2 no trimestre 7-*JAS*, a [Figura 53](#) indica o resultado para três ampolas que foram planejadas pelo PCP (preto) e produzido (vermelho). O modelo decide produzir por 30 dias cada ampola e garante o atendimento da demanda, porém a fábrica Z opta produzir por mais dias a primeira e segunda ampola, reduzindo o tempo para terceira.

Figura 53 – Resultado de um trimestre.

Fonte: Elaborada pela autora.

O comportamento do *ramp-up* apresentado na [Figura 53](#) é coerente com a produção inicial nas duas últimas ampolas. Note que existe a queda de produção na troca entre ampolas produzida que após três dias se estabiliza.

O planejamento do PCP para o ano de 2018 está representado na [Figura 54](#) pelos retângulos azuis, em que existem nove *set-ups* durante esse ano. Observa-se que o quinto produto (P5) é produzido em três meses não sequenciais, nos meses de maio, setembro e dezembro.

Figura 54 – Sequência do planejamento do PCP.

Produtos	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
P1												
P2												
P3												
P4												
P5												

Fonte: Elaborada pela autora.

A sequência do planejamento alcançado pelo método CPLEX, considerando os dados do ano de 2019 usados no PCP, está representada na [Figura 55](#) pelos retângulos vermelhos. O número de *set-up's* durante o ano cai para cinco. Nesse caso, destaca-se novamente o quinto produto (P5) que foi produzido em três meses sequenciais: maio, junho e julho.

Figura 55 – Sequência do planejamento do CPLEX.

Produtos	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
P1												
P2												
P3												
P4												
P5												

Fonte: Elaborada pela autora.

Uma interseção das sequências do planejamento do PCP com o CPLEX para os dados do ano de 2019 é ilustrada na [Figura 56](#). Os retângulos verdes representam os meses nos quais o planejamento do PCP coincide com o resultado do modelo, sendo que foram adotados os mesmos dados utilizados pelo PCP. Novamente, destaca-se o quinto produto (P5), cuja produção se inicia no mês de maio tanto no planejamento real do PCP, quanto no resultado do modelo proposto.

Figura 56 – Interseção dos planejamentos.

Produtos	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
P1												
P2												
P3												
P4												
P5												

Fonte: Elaborada pela autora.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente tese apresentou modelos matemáticos para o planejamento da produção em indústrias de embalagens de vidro, baseados no dimensionamento de lotes. Os primeiros modelos (PINF e PIMF) apresentam tomadas de decisões relacionadas a instalação de fornos e configurações de máquinas. Enquanto que os modelos de estudo de caso (EC1 e EC2) referem-se ao planejamento e ao controle da produção de ampolas para garrafas térmicas.

6.1 Construção ou reforma de fornos e configurações de máquinas

Conclusões sobre o PINF

O problema de instalação de um novo forno ([Subseção 3.1.1](#)) é considerado como um problema de otimização com programação linear inteira mista. Para a análise do PINF foram geradas 200 instâncias a partir dos dados fornecidos pelas IEV visitadas, sendo que os valores crescentes de parâmetros (número de máquinas e horizonte de tempo) foram usados na definição dos cenários. Essas instâncias foram agrupadas em dois subconjuntos de acordo com o tamanho, pequeno ou grande. A solução das instâncias foi obtida pela aplicação do método CPLEX e de seis algoritmos genéticos híbridos.

O método CPLEX utilizado foi o algoritmo disponibilizado pelo *solver* CPLEX, o qual é aplicado usando a formulação matemática proposta. Os algoritmos genéticos considerados foram: um AGS e um AGMP, com indivíduos dispostos em estruturas árvore ou grade (AGMPa e AGMPg). Todos os algoritmos genéticos foram avaliados em execução com e sem a heurística *FG*.

No conjunto de instâncias de pequeno porte, o método CPLEX e os algoritmos genéticos retornaram algumas soluções ótimas. Todos os métodos foram capazes de alcançar soluções

viáveis, sendo que o CPLEX alcançou essas soluções gastando menos de 2.500 segundos para 55 das 100 instâncias.

Os algoritmos genéticos, que funcionam com a heurística *FG*, atingiram as soluções viáveis para 90 das 100 instâncias, também gastando 2.500 segundos. Os desvios das soluções AG-FG, AGMPg-FG e AGMPt-FG foram inferiores a 5% dos limites inferiores para a grande maioria das instâncias, como mostra a [Figura 37](#). Portanto, os métodos evolutivos com *FG* são uma abordagem satisfatória para resolver as instâncias de pequeno porte. No entanto, o método CPLEX apresenta o melhor *trade-off* entre qualidade da solução (factível e ótima) e o tempo de execução.

No conjunto de instância de grande porte, o CPLEX não encontrou uma solução viável para várias instâncias, enquanto todos os algoritmos genéticos retornam soluções viáveis. Não há diferença estatística significativa entre o desempenho dos algoritmos genéticos quando os valores objetivos são considerados. Esse comportamento pode ser explicado pelo impacto da heurística *FG* na resolução de instâncias grandes. Uma comparação entre a [Figura 37](#) e a [Figura 38](#) fornece uma ideia sobre o tempo gasto na execução nos AG-FG, AGMPt-FG e AGMPg-FG em grandes instâncias. Conclui-se que a heurística *FG* consumiu um tempo relevante do processo evolutivo.

Todavia, uma outra explicação possível, é que um ajuste de parâmetro feito sob medida poderia levar a melhores resultados, uma vez que o mesmo conjunto de parâmetros dos algoritmos genéticos foi aplicado para resolver instâncias pequenas e grandes.

Conclusões sobre o PIMF

O problema de instalação de múltiplo fornos ([Subseção 3.1.2](#)) é uma extensão natural do PINF, sendo que uma formulação de PLIM foi proposta para este modelo. A análise do PIMF foi realizada em um conjunto de número total de instâncias geradas a partir de dados reais de IEV. Para a solução desse modelo, foram aplicados o método CPLEX e três algoritmos genéticos híbridos, combinados com a técnica de programação matemática e uma heurística *FG*.

O método CPLEX resolveu 12 de 140 instâncias, retornando soluções ótimas. Enquanto os AGS, AGMPt-FG e AGM conseguiram encontrar soluções viáveis para todas as instâncias. Inclusive nos subconjuntos em que o CPLEX não encontrou solução, como em -P175 e -P200.

A partir dos resultados é possível concluir que o AGM é o melhor método, visto que foi capaz de retornar soluções de boa qualidade dentro de um tempo computacional razoável. Esta melhora no desempenho, deve-se a combinação do método com a heurística *FG* proposta.

Além disso, o AGS destaca-se no grupo M100 por ter realizado mais avaliações que os outros algoritmos genéticos. Enquanto que no grupo P100, o AGM avaliou mais e dispendeu menos tempo que o AGS.

6.2 Planejamento e controle da produção de ampolas

Conclusões sobre o EC1

No Estudo de Caso 1 ([Subseção 3.2.1](#)) são apresentadas duas propostas de modelos matemáticos para o planejamento e controle da produção de ampolas de vidro para garrafas térmicas, considerando um cenário real de produção. A formulação para o Modelo-R apresentou uma modelagem com base nas informações iniciais e nos dados reais fornecidas pela empresa. A formulação para o Modelo-A consiste em uma modelagem alternativa na qual é permitido a produção de ampolas diferentes, ao se retirar uma restrição ([Equação 3.31](#)) do modelo.

A resolução exata dos modelos matemáticos, aplicando o CPLEX, é capaz de resolver todas as instâncias na otimalidade. No entanto, o Modelo-A se mostra competitivo em relação ao Modelo-R, pois apresenta melhorias em várias instâncias nos períodos de planejamento operacional, tático e estratégicos.

Porém, a abordagem do Modelo-A foi considerada um equívoco pelos representantes da empresa que disponibilizou os dados. Apesar de existirem duas máquinas na empresa, elas devem sempre fabricarem o mesmo tipo de ampola, pois como as ampolas são compostas por duas partes (externa e interna), cada uma das máquinas é responsável por produzir uma parte. Portanto, a exclusão da restrição ([Equação 3.31](#)) no modelo não faz sentido para o problema real tratado.

Conclusões sobre o EC2

No Estudo de Caso 2 ([Subseção 3.2.2](#)), considerou-se uma modelagem completa de modelo matemático para o planejamento e controle da produção de ampolas de vidro para garrafas térmicas.

A resolução exata do modelo matemático, aplicando o CPLEX, foi capaz de resolver todas as instâncias de 2018 na otimalidade e com menos *set-ups* em seis trimestres de dez.

Os valores utilizados para calibrar o *ramp-up* se mostram eficientes para duas de três ampolas produzidas no trimestre 7-JAS ([Figura 53](#)), porém para a primeira ampola se faz necessário verificar uma melhor maneira de representar as alterações para sua produção.

Para os dados de 2019, obteve-se uma nova sequência de planejamento com menos *set-ups* que o planejamento do PCP da fábrica Z.

Portanto, o modelo proposto é uma representação confiável da realidade da fábrica Z. Dessa forma, obtém-se uma nova possibilidade de criar os planejamentos da produção com base nos resultados alcançados.

6.3 Perspectivas futuras

Para complementar esta pesquisa, é possível sugerir metas que contemplem tanto a formulação dos problemas abordados como as abordagens de resolução.

Em relação ao problema de instalação de fornos nas IEVs (PINF e PIMF), considera-se que poderão ser utilizadas outras abordagens para a modelagem do problema, como o desenvolvimento de modelos estocásticos para previsão de demanda e estoque. Além de estender os modelos, incorporando mais características, como os tipos de embalagens (cores) e a energia em cada tipo de forno, tornando o modelo mais completo.

Outros métodos poderão ser utilizados para resolução destes modelos, como as heurísticas: *Simulating Annealing* (SA), *Iterated Local Search* (ILS), *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP) e *Variable neighborhood search* (VNS).

Os estudos de casos (EC1 e EC2), que abordam o planejamento e o controle de produção de ampolas de vidro para garrafas térmicas, foram realizados com a colaboração da fábrica Z, que disponibilizou os dados para a geração das instâncias. Nesse caso, a fábrica tem interesse na extensão do modelo EC2 para a produção de potes e na elaboração de um modelo que trate a produção de ampolas e potes em conjunto. Além disso, como descrito na [Seção 2.3](#), propôs-se a fábrica Z a elaboração de uma ferramenta alternativa para o planejamento da produção. Atualmente, essa ferramenta encontra-se nos ajustes finais para atender as solicitações dos representantes da empresa, sendo que em breve será apresentada aos mesmos.

Um estudo dos modelos EC1 e EC2, considerando as incertezas e as variações da produção diária, poderá ser realizado com a adição de uma margem de segurança agindo sobre a produção líquida. Dessa forma, seria possível obter alguns cenários de novos planejamentos para atender a demanda prevista. Adicionalmente, em outros casos, é possível considerar uma taxa máxima de risco, sem a necessidade de uma alteração no planejamento da produção. Visto que a fábrica Z não considera em seu planejamento os fatores que podem influenciar esses imprevistos.

Em alguns testes preliminares, os Algoritmos Genéticos mostraram-se eficientes em relação ao tempo. Assim, uma sugestão para abordagens de resolução dos modelos, é utilizar as que combinem os modelos com meta-heurísticas. Além de analisar os resultados com uma heurística que explore um ambiente de solução de incumbência atual, para tentar encontrar uma nova incumbência melhorada, como o *Relaxation Induced Neighborhood Search* (RINS) que procura em ambiente induzido o relaxamento do modelo.

Portanto, observa-se a existência de possibilidades de robusteza nos modelos propostos para lidar com estas abordagens metodológicas bem como considerar o tratamento estocásticos das variações produtivas.

REFERÊNCIAS

ABBASSI, A.; KHOSHMANESH, K. Numerical simulation and experimental analysis of an industrial glass melting furnace. **Applied Thermal Engineering**, v. 28, n. 5, p. 450 – 459, 2008. Citado na página 51.

ALMADA-LOBO, B.; KLABJAN, D.; CARRAVILLA, M. A.; OLIVEIRA, J. F. Multiple machine continuous setup lot sizing with sequence dependent setups. **Computational Optimization and Applications**, v. 47, n. 3, p. 529–552, 2010. Citado na página 52.

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. Citado na página 52.

ALMADA-LOBO, B. S. S. o. **Lotsizing and scheduling in the glass container industry**. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2007. Citado na página 52.

ALMEDER, C. A hybrid optimization approach for multi-level capacitated lot-sizing problems. **European Journal of Operational Research**, v. 200, p. 599–606, 2010. Citado na página 54.

AMORIM, F. M. S.; ARANTES, M. S.; TOLEDO, C. F. M.; FRISCH, P. E.; ARANTES, J. S.; ALMADA-LOBO, B. Genetic algorithms approaches for the production planning in the glass container industry. In: **Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion**. New York, NY, USA: ACM, 2017. (GECCO '17), p. 261–262. Citado na página 55.

AMORIM, F. M. S.; ARANTES, M. S.; TOLEDO, C. F. M.; FRISCH, P. E.; ALMADA-LOBO, B. Hybrid genetic algorithms applied to the glass container industry problem. In: **IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)**. Rio de Janeiro, Brazil: IEEE, 2018. p. 1–8. Citado na página 55.

AMORIM, F. M. S.; ARANTES, M. S.; TOLEDO, C. F. M.; ALMADA-LOBO, B. A mathematical model and heuristic approach for the production planning in the glass container industry. **Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics**, v. 6, n. 1, 2018. Citado na página 55.

AMORIM, F. M. S.; TOLEDO, C. F. M.; ARANTES, M. S.; FERREIRA, M. P. S. Modelo matemático de planejamento da produção na indústria de embalagens de vidro. **Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento**, v. 10, n. 3, p. 146–159, 2018. Citado na página 55.

ARANTES, M. S. **Professional Optimization Framework (ProOF)**. 2013. Version 2.4.0. Disponível em: <<https://github.com/marcio-da-silva-arantes/ProOF/wiki>>. Acesso em: 11/30/2018. Citado na página 73.

ARANTES, M. S. **Ambiente para desenvolvimento de métodos aplicados a problemas de otimização**. Dissertação (Mestrado) — Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos, S.P., 2014. Citado na página 73.

ARAUJO, S. A.; ARENALES, M. N.; CLARK, A. R. Lot sizing and furnace scheduling in small foundries. **Comput. Oper. Res.**, Elsevier Science Ltd., Oxford, UK, v. 35, n. 3, p. 916–932, Mar. 2008. Citado na página 54.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE VIDRO (ABIVIDRO). **As indústrias do vidro associadas á Abividro**. 2019. Disponível em: <<https://abividro.org.br/industria-vidro-associados/>>. Acesso em: 06/04/2019. Citado na página 37.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES E PROCESSADORES DE VIDROS PLANOS (ABRAVIDRO). **O Vidro no Brasil**. 2019. Disponível em: <<https://abravidro.org.br/vidro-no-brasil/>>. Acesso em: 13/08/2019. Citado na página 37.

_____. **Revista o Livro Plano**. 2019. Disponível em: <<https://abravidro.org.br/vidros/vidro-soprado-oco/>>. Acesso em: 06/04/2019. Citado na página 27.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMBALAGEM (ABRE). **Dados do Setor**. 2019. Disponível em: <<http://www.abre.org.br/setor/estudo-macroeconomico-da-embalagem-abre-fgv/>>. Acesso em: 02/04/2019. Citado na página 27.

AUER, J.; BEY, N.; SCHÄFER, J.-M. Combined life cycle assessment and life cycle costing in the eco-care-matrix: A case study on the performance of a modernized manufacturing system for glass containers. **Journal of Cleaner Production**, v. 141, p. 99–109, 2017. Citado nas páginas 53 e 55.

AZINHEIRA, V. P. D. **Controlo de qualidade e ambiente ao nível de uma indústria vidreira**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Coimbra, 2014. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10316/27836>>. Citado nas páginas 28, 36 e 41.

BALL, M. Heuristics based on mathematical programming. **Surveys in Operations Research and Management Science**, v. 16, n. 1, p. 21–38, 2011. Citado na página 54.

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, MCB UP Ltd, v. 22, n. 2, p. 241–264, 2002. Citado na página 33.

BOYD, G. A.; TOLLEY, G.; PANG, J. Plant level productivity, efficiency, and environmental performance of the container glass industry. **Environmental and Resource Economics**, v. 23, n. 1, p. 29–43, Sep. 2002. Citado na página 50.

BRAHIMI, N.; ABSI, N.; DAUZÈRE-PÉRÈS, S.; NORDLI, A. Single-item dynamic lot-sizing problems: An updated survey. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 263, n. 3, p. 838–863, 2017. Citado na página 54.

BUSCHKÜHL, L.; SAHLING, F.; HELBER, S.; TEMPELMEIER, H. Dynamic capacitated lot-sizing problems: a classification and review of solution approaches. **Or Spectrum**, Springer, v. 32, n. 2, p. 231–261, 2010. Citado na página 54.

CICLO VIVO. **6 benefícios do uso do vidro como embalagem**. 2019. Disponível em: <<https://ciclovivo.com.br/vida-sustentavel/bem-estar/6-beneficios-do-uso-do-vidro-como-embalagem/>>. Acesso em: 25/03/2019. Citado na página 27.

CLARK, A.; MORABITO, R.; TOSO, E. Production setup-sequencing and lot-sizing at an animal nutrition plant through atsp subtour elimination and patching. **Journal of Scheduling**, v. 13, n. 2, p. 111–121, 2010. Citado na página 54.

COMPANHIA BRASILEIRA DE CRISTAL. **A História do Vidro**. 2015. Disponível em: <<http://www.cebrace.com.br/v2/vidro>>. Acesso em: 08/07/2015. Citado nas páginas 36 e 37.

COPIL, K.; WÖRBELAUER, M.; MEYR, H.; TEMPELMEIER, H. Simultaneous lotsizing and scheduling problems: a classification and review of models. **OR Spectrum**, v. 39, n. 1, p. 1–64, 2017. Citado na página 54.

DÍAZ-MADROÑERO, M.; MULA, J.; PEIDRO, D. A review of discrete-time optimization models for tactical production planning. **International Journal of Production Research**, Taylor & Francis, v. 52, n. 17, p. 5171–5205, 2014. Citado na página 53.

DORIGO, M.; STÜTZLE, T. **Ant Colony Optimization**. Cambridge, Massachusetts: Bradford, 2004. Citado na página 80.

DREXL, A.; KIMMS, A. Lot-sizing and scheduling – survey and extensions. **European Journal of Operational Research**, v. 99, p. 221–235, 1997. Citado na página 53.

EL-BEHERY, S. M.; HUSSIEN, A.; KOTB, H.; EL-SHAFIE, M. Performance evaluation of industrial glass furnace regenerator. **Energy**, v. 119, p. 1119 – 1130, 2017. Citado na página 51.

ENGELBRECHT, A. P. **Computational Intelligence An Introduction**. [S.l.]: Wiley-Blackwell, 2007. Citado na página 83.

ESTATCAMP - CONSULTORIA EM ESTATÍSTICA E QUALIDADE. **Apostilas Estatísticas**. São Carlos - SP, Brasil, 2018. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/ambiente-virtual-de-aprendizado>>. Acesso em: 09/05/2019. Citado na página 90.

_____. **Manual da ferramenta Action Stat para o teste de Kruskal-Wallis**. São Carlos - SP, Brasil, 2018. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/manual-nao-parametricos/teste-de-kruskal-wallis-para-o-tempo-de-funcionamento-de-diferentes-lampadas>>. Acesso em: 09/05/2019. Citado na página 91.

_____. **Software Action Stat**. São Carlos - SP, Brasil, 2018. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/content/download-action>>. Acesso em: 09/05/2019. Citado na página 90.

_____. **Teste de Kruskal-Wallis**. São Carlos - SP, Brasil, 2018. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/tecnicas-nao-parametricas/teste-de-kruskal-wallis>>. Acesso em: 09/05/2019. Citado na página 91.

_____. **Teste de qualidade de ajuste de Anderson-Darling**. São Carlos - SP, Brasil, 2018. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/confiabilidade/432-teste-de-qualidade-de-ajuste-de-anderson-darling>>. Acesso em: 09/05/2019. Citado na página 90.

FACHINI, R. F.; ESPOSTO, K. F.; CAMARGO, V. C. B. Glass container production planning with warm-ups and furnace extraction variation losses. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, v. 90, n. 1-4, p. 527–543, 2017. Citado nas páginas 53 e 55.

FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO (FAU-USP). **Vidros**. 2015. Disponível em: <<http://www.fau.usp.br/deptecnologia/docs/bancovidros/vidro.htm>>. Acesso em: 27/07/2015. Citado na página 35.

FALORNI TECH GLASS INDUSTRIES EXPERIENCE. **Oxy-fuel**. 2019. Disponível em: <<https://www.falornitech.com/solutions/melting-furnaces/oxy-fuel/>>. Acesso em: 17/04/2019. Citado na página 41.

FARIAS, J. **Soplado de Vidrio**. 2019. 1 fotografia. Disponível em: <<https://mxcity.mx/wp-content/uploads/2015/11/vidrio.jpg>>. Acesso em: 06/04/2019. Citado na página 28.

FARINA, A.; KLAR, A.; MATTHEIJ, R. M. M.; MIKELIC, A.; SIEDOW, N. **Mathematical Models in the Manufacturing of Glass**. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. (C.I.M.E. Foundation Subseries). Citado na página 51.

FERREIRA, D.; CLARK, A. R.; ALMADA-LOBO, B.; MORABITO, R. Single-stage formulations for synchronised two-stage lot sizing and scheduling in soft drink production. **International Journal of Production Economics**, v. 136, n. 2, p. 255 – 265, 2012. Citado na página 54.

FERREIRA, D.; MORABITO, R.; RANGEL, S. Solution approaches for the soft drink integrated production lot sizing and scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, v. 196, n. 2, p. 697–706, 2009. Citado na página 54.

FRIENDS OF GLASS. **8 Facts about glass and circular economy worth knowing**. 2019. Disponível em: <<https://www.friendsofglass.com/ecology/8-facts-about-glass-circular-economy-worth-knowing/>>. Acesso em: 16/08/2019. Citado na página 27.

FRISCH, P. E. **Curso de Tecnologia de Produção de Vidros**. [S.l.], 2019. Documentos internos. Citado nas páginas 39, 40, 41 e 42.

GLASS GLOBAL CONSULTING (GGC). **Glass Melting Furnaces**. 2019. Disponível em: <<https://www.glassglobal.com/consulting/reports/technology/>>. Acesso em: 07/04/2019. Citado na página 39.

GLASS PACKAGING INSTITUTE (GPI). **Recycling and Energy Policies**. 2019. Disponível em: <<http://www.gpi.org/advocacy/recycling-energy-policies>>. Acesso em: 02/04/2019. Citado na página 27.

GONÇALVES, J. F.; RESENDE, M. G. C. Biased random-key genetic algorithms for combinatorial optimization. **Journal of Heuristics**, v. 17, n. 5, p. 487–525, 2011. Citado nas páginas 56 e 100.

GUIGNARD, M.; KIM, S. Lagrangean decomposition: A model yielding stronger lagrangean bounds. **Mathematical programming**, Springer, v. 39, n. 2, p. 215–228, 1987. Citado na página 52.

HELBER, S.; SAHLING, F. A fix-and-optimize approach for the multi-level capacitated lot sizing problem. **International Journal of Production Economics**, v. 123, p. 247–256, 2010. Citado na página 54.

HOTWORK INTERNATIONAL. **Electric Melting / Boosting**. 2018. Disponível em: <<https://www.hotwork.ag/products/glass/electric-melting-boosting/>>. Acesso em: 17/04/2019. Citado na página 40.

HUBERT, M. **Basics of industrial glass melting furnaces**: Lecture Notes. Course on Processing in Glass (lecture 3). 2015. 75 slides. Disponível em: <https://www.lehigh.edu/imi/teched/GlassProcess/Lectures/Lecture03_Hubert_industglassmeltfurnaces.pdf>. Acesso em: 03/04/2019. Citado na página 59.

HUISMAN, L. Estimation of process variables in a glass melting furnace. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 35, n. 1, p. 355 – 360, 2002. 15th IFAC World Congress. Citado na página 51.

INFOPÉDIA. **Vidro Oco Soprado em Artigos de Apoio Infopédia**. 2019. Disponível em: <[https://www.infopedia.pt/apoio/artigos/\\$vidro-oco-soprado](https://www.infopedia.pt/apoio/artigos/$vidro-oco-soprado)>. Acesso em: 06/04/2019. Citado na página 27.

INTERNATIONAL BUSINESS MACHINES CORPORATION (IBM). **CPLEX Optimization Studio Fundamentals Tutorial**. 2019. Disponível em: <<https://www.ibm.com/cloud/garage/dte/tutorial/cplex-optimization-studio-fundamentals-tutorial>>. Acesso em: 06/05/2019. Citado na página 79.

_____. **IBM ILOG CPLEX Optimization Studio**. 2019. Disponível em: <<https://www.ibm.com/br-pt/products/ilog-cplex-optimization-studio>>. Acesso em: 06/05/2019. Citado na página 79.

_____. **IBM ILOG CPLEX Optimization Studio - CPLEX Users' Manual. Version 12, Release 6**. 2019. Disponível em: <<https://www.ibm.com/analytics/cplex-optimizer>>. Acesso em: 26/04/2019. Citado na página 73.

JAIME, S. B. M.; DANTAS, F. B. H. **Embalagens de vidro para alimentos e bebidas: propriedades e requisitos de qualidade**. [S.l.]: CETEA, 2009. Citado na página 41.

JANS, R. Solving lot-sizing problems on parallel identical machines using symmetry-breaking constraints. **INFORMS Journal on Computing**, v. 21, n. 1, p. 123–136, 2009. Citado nas páginas 53 e 54.

JANS, R.; DEGRAEVE, Z. Metaheuristics for dynamic lot sizing: A review and comparison of solution approaches. **European Journal of Operational Research**, v. 177, p. 1855–1875, 2007. Citado na página 54.

_____. Modeling industrial lot sizing problems: a review. **International Journal of Production Research**, Taylor & Francis, v. 46, n. 6, p. 1619–1643, 2008. Citado na página 54.

KARIMI, B.; GHOMI, S. M. T. F.; WILSON, J. M. The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms. **Omega**, v. 31, p. 365–378, 2003. Citado na página 53.

LANDIM, A. P. M.; BERNARDO, C. O.; MARTINS, I. B. A.; FRANCISCO, M. R.; SANTOS, M. B.; MELO, N. R. Sustentabilidade quanto às embalagens de alimentos no brasil. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, SciELO, v. 26, 2016. Citado nas páginas 27 e 28.

MARTINS, T. **Ciclo Infinito do Vidro**. 2016. 1 imagem. Disponível em: <<http://anguloscidadania.blogspot.com/2016/10/ciclo-infinito-do-vidro-thiago.html>>. Acesso em: 14/04/2019. Citado na página 37.

MILLER, G. L.; PACEY, A. Impact of mechanization in the glass container industry: The dominion glass company of montreal, a case study. **Historical Archaeology**, Society for Historical Archaeology, v. 19, n. 1, p. 38–50, 1985. Citado na página 45.

- MORABITO, R.; PUREZA, V. Modelagem e simulação. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**, v. 2, p. 169–198, 2012. Citado na página 33.
- MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. O. **Estatística básica**. [S.l.]: Saraiva, 2017. Citado nas páginas 89 e 90.
- MOSCATO, P. **On Evolution, Search, Optimizaton, Genetic Algorithms and Martial Arts: Towards Memetic Algorithms**. California, USA, 1989. Citado na página 83.
- MULLINGER, P.; JENKINS, B. **Industrial and process furnaces: principles, design and operation**. [S.l.]: Elsevier, 2014. Citado na página 39.
- PAUL, R. A production scheduling problem in the glass-container industry. **Operations Research**, INFORMS, v. 27, n. 2, p. 290–302, 1979. Citado na página 50.
- PGP GLASSWORKS. **Manufacture – PGP Glassworks**. 2019. 1 fotografia. Disponível em: <<http://pgpglass.com/en/manufacture/>>. Acesso em: 16/04/2019. Citado na página 43.
- POCHET, Y.; WOLSEY, L. A. **Production planning by mixed integer programming**. New York, Berlin: Springer, 2006. (Operations Research and Financial Engineering). Citado na página 54.
- PUCHINGER, J.; RAIDL, G.; ROLI, A. Hybrid metaheuristics in combinatorial optimization: A survey. **Applied Soft Computing**, v. 11, p. 4135–4151, 2011. Citado na página 83.
- QUADT, D.; KUHN, H. Capacitated lot-sizing with extensions: a review. **4OR**, Springer, v. 6, n. 1, p. 61–83, 2008. Citado na página 54.
- RAMYA, R.; RAJENDRAN, C.; ZIEGLER, H.; MOHAPATRA, S.; GANESH, K. **Capacitated Lot Sizing Problems in Process Industries**. [S.l.]: Springer, 2019. Citado na página 53.
- RECICLOTECA. **Vidro: história, composição, tipos, produção e reciclagem**. 2015. Disponível em: <<http://www.recicloteca.org.br/material-reciclavel/vidro/>>. Acesso em: 28/07/2015. Citado na página 36.
- SAHLING, F.; BUSCHKÜHL, L.; TEMPELMEIER, H.; HELBER, S. Solving a multi-level capacitated lot sizing problem with multi-period setup carry-over via a fix-and-optimize heuristic. **Computers Operations Research**, v. 37, p. 2546–2553, 2009. Citado na página 54.
- SARDESHPANDE, V.; GAITONDE, U.; BANERJEE, R. Model based energy benchmarking for glass furnace. **Energy Conversion and Management**, v. 48, n. 10, p. 2718 – 2738, 2007. Citado na página 51.
- SARWAR, M.; ARMITAGE, A. Tooling requirements for glass container production for the narrow neck press and blow process. **Journal of Materials Processing Technology**, Elsevier, v. 139, n. 1-3, p. 160–163, 2003. Citado nas páginas 45 e 50.
- SILVA, L. N. de C. **Fundamentals of natural computing: basic concepts, algorithms, and applications**. [S.l.]: Chapman & Hall/CRC, 2006. Citado na página 83.
- SOBRAL, F.; PECI, A. **Administração: teoria e prática no contexto brasileiro**. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2008. Citado na página 108.

- TOLEDO, C. F. M.; ARANTES, M.; HOSSOMI, M. Y. B.; ALMADA-LOBO, B. Mathematical programming-based approaches for multi-facility glass container production planning. **Computers Operations Research**, v. 74, p. 92–107, 2016. Citado nas páginas 52, 54 e 56.
- TOLEDO, C. F. M.; ARANTES, M.; OLIVEIRA, R.; ALMADA-LOBO, B. Glass container production scheduling through hybrid multi-population based evolutionary algorithm. **Applied Soft Computing**, v. 13, n. 3, p. 1352–1364, 2013. Citado nas páginas 52, 53, 54, 55, 81 e 99.
- TOLEDO, C. F. M.; HOSSOMI, M. Y. B.; ARANTES, M. S.; FRANÇA, P. M. Genetic algorithm, MIP and improvement heuristic applied to the MLCLP with backlogging. In: **IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1483–1490. Citado na página 55.
- TOLEDO, C. F. M.; OLIVEIRA, R. R. R.; FRANÇA, P. M. A hybrid multi-population genetic algorithm applied to solve the multi-level capacitated lot sizing problem with backlogging. **Computers & Operations Research**, v. 40, n. 4, p. 910 – 919, 2013. Citado nas páginas 52 e 55.
- TOSO, E.; MORABITO, R.; CLARK, A. Lot sizing and sequencing optimisation at an animal-feed plant. **Computers Industrial Engineering**, v. 57, n. 3, p. 813–821, 2009. Citado na página 54.
- VARSEI, M.; POLYAKOVSKIY, S. Sustainable supply chain network design: A case of the wine industry in australia. **Omega**, Elsevier, v. 66, p. 236–247, 2017. Citado nas páginas 53 e 55.
- VELLINI, M.; SAVIOLI, M. Energy and environmental analysis of glass container production and recycling. **Energy**, Elsevier, v. 34, n. 12, p. 2137–2143, 2009. Citado na página 50.
- VERALLIA. **Processo de Fabricação**. 2019. Disponível em: <<https://br.verallia.com/o-vidro/processo-de-fabricacao>>. Acesso em: 16/04/2019. Citado nas páginas 44 e 45.
- VIDROPORTO S.A. **História do Vidro**. 2015. Disponível em: <<http://www.vidroporto.com.br/historia-do-vidro.php>>. Acesso em: 08/07/2015. Citado na página 35.
- WEI, W.; GUIMARÃES, L.; AMORIM, P.; ALMADA-LOBO, B. Tactical production and distribution planning with dependency issues on the production process. **Omega**, Elsevier, v. 67, p. 99–114, 2017. Citado na página 55.