

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA**

VINÍCIUS LUDWIG

**PROPOSTA DE UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA O SEQUENCIAMENTO
DA PRODUÇÃO DO SETOR DE MOLDAGEM DE UMA FUNDIÇÃO**

CAXIAS DO SUL

2020

VINÍCIUS LUDWIG

**PROPOSTA DE UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA O SEQUENCIAMENTO
DA PRODUÇÃO DO SETOR DE MOLDAGEM DE UMA EMPRESA DE FUNDIÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Produção da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Produção.

Orientador Prof. Dr. Leonardo Dagnino Chiwiacowsky.

CAXIAS DO SUL

2020

VINÍCIUS LUDWIG

**PROPOSTA DE UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA O SEQUENCIAMENTO
DA PRODUÇÃO DO SETOR DE MOLDAGEM DE UMA EMPRESA DE FUNDIÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Produção da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Produção.

Aprovado em

Banca Examinadora

Prof. Dr. Leonardo Dagnino Chiwiacowsky
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Leandro Luís Corso
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Gabriel Vidor
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Dedico este trabalho à minha família por me acompanhar durante essa jornada e pelo incentivo e apoio que me motivaram a continuar os estudos.

“A alegria está na luta, na tentativa, no sofrimento envolvido e não na vitória propriamente dita.”

Mahatma Gandhi

RESUMO

A concorrência crescente entre as empresas faz com que elas busquem constantemente meios de se destacarem nos mercados em que atuam. Por vezes, as estratégias adotadas estão relacionadas com a redução de estoques e atendimento de prazos de entrega, sendo que o adequado sequenciamento da produção possui papel fundamental para o sucesso dessas estratégias. Este trabalho propõe um modelo matemático que possa ser utilizado para realizar o sequenciamento da produção no setor de moldagem de uma empresa de fundição, oferecendo uma metodologia científica para realização de tal tarefa. A construção do modelo matemático proposto seguiu etapas que se baseiam na bibliografia existente sobre resolução de problemas utilizando a Pesquisa Operacional. Para verificar a eficácia da aplicação do modelo proposto, foram criados cenários que simulam situações reais e possíveis de acontecerem na prática na empresa estudada. Por meio da análise dos resultados obtidos, após a aplicação do modelo matemático para realizar o sequenciamento da produção nos cenários estudados, verificou-se que houve redução de 48% no valor alvo da otimização, que penaliza ordens de fabricação entregues com atraso e adiantamento. Além de oferecer maior assertividade, por garantir que o sequenciamento ótimo está sendo identificado, o modelo proposto também possibilita antecipar eventuais problemas de atendimento pela simulação de diferentes cenários, como o aumento e diminuição de capacidades e demandas, por exemplo, algo que não é possível com a atual metodologia utilizada pela empresa para realização do seu sequenciamento de produção. Sugere-se para trabalhos futuros avaliar os impactos financeiros provenientes da utilização do modelo proposto e a inclusão de restrições adicionais para que ele se aproxime ainda mais da realidade da empresa.

Palavras-chave: Sequenciamento da produção. Pesquisa Operacional. Prazos de entrega. Planejamento e controle de produção. Fundição.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho esquemático das etapas do processo de fundição	18
Figura 2 - Representação do sequenciamento em um ambiente de máquinas paralelas	20
Figura 3 - Exemplo do sequenciamento em um ambiente <i>flow shop</i>	20
Figura 4 - Ilustração do sequenciamento em um ambiente <i>job shop</i>	21
Figura 5 - Etapas para resolução de problemas de pesquisa operacional	27
Figura 6 - Classificação geral dos algoritmos de otimização	28
Figura 7 - Exemplos de peças produzidas pela empresa	32
Figura 8 - Exemplos de machos tipo <i>shell</i> utilizados no processo	33
Figura 9 - Exemplo de sopradora de moldes em <i>cold box</i>	33
Figura 10 - Molde produzido pelo processo <i>cold box</i>	34
Figura 11 - Moldes montados em árvores prontos para o vazamento	35
Figura 12 - Exemplo da organização dos dados das ordens de fabricação.....	42
Figura 13 - Dados das ordens de fabricação utilizadas para validação do modelo	44

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Significado dos símbolos atribuídos a α_1	22
Quadro 2 - Características das tarefas e recursos atribuídos a β	22
Quadro 3 - Principais critérios de otimização atribuídos a γ	23
Quadro 4 - Valores atribuídos aos parâmetros de entrada.....	44
Quadro 5 - Valores resultantes após resolução do modelo.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condição de atendimento das restrições do modelo	45
Tabela 2 - Parâmetros de entrada utilizados em cada cenário estudado.....	47
Tabela 3 - Resultados obtidos para cada cenário estudado	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIFA	Associação Brasileira de Fundição
APS	<i>Advanced planning and scheduling</i>
BPMN	<i>Bussiness process model and notation</i>
DD	Data devida
ERP	<i>Enterprise resource planning</i>
FIFO	<i>First in, first out</i>
LIFO	<i>Last in, first out</i>
LOT	<i>Longest operation time</i>
PCP	Planejamento e controle de produção
PL	Programação linear
PO	Pesquisa operacional
RS	Rio Grande do Sul
SOBRAPO	Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional
SOT	<i>Shortest operation time</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	JUSTIFICATIVA	13
1.2	OBJETIVOS	14
1.2.1	Objetivo geral.....	15
1.2.2	Objetivos específicos	15
1.3	ABORDAGEM E DELIMITAÇÃO DO TRABALHO	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	PROCESSO DE FUNDIÇÃO	17
2.2	SEQUENCIAMENTO DE PRODUÇÃO	18
2.2.1	Notação em problemas de sequenciamento.....	21
2.2.2	Sequenciamento em empresas de fundição	24
2.3	PESQUISA OPERACIONAL	25
2.3.1	Modelos de otimização	27
2.3.1.1	Modelos de programação linear.....	29
3	PROPOSTA DE TRABALHO	31
3.1	DESCRIÇÃO DA EMPRESA	31
3.1.1	Estrutura produtiva.....	32
3.1.2	Apresentação do problema	35
3.2	ETAPAS DO ESTUDO.....	36
3.3	MODELO CONCEITUAL.....	37
3.4	MODELO MATEMÁTICO	38
3.5	MODELO COMPUTACIONAL.....	41
4	RESULTADOS	42
4.1	COLETA E TRATAMENTO DOS DADOS	42
4.2	VALIDAÇÃO DO MODELO	44
4.3	EXPERIMENTOS E RESULTADOS	46
4.3.1	Cenários de teste	46
4.3.2	Resultados dos cenários.....	47

5	CONCLUSÃO.....	50
	REFERÊNCIAS	52
	APÊNDICE A – Processo de fundição de peças	56

1 INTRODUÇÃO

As empresas de fundição representam um importante setor da economia, sendo sua atuação bastante significativa para a atividade industrial brasileira. Segundo dados da Associação Brasileira de Fundição (ABIFA, 2020), o setor apresentou grande crescimento nos últimos anos, chegando à produção de 2,28 milhões de toneladas e empregando mais de 55 mil profissionais em 2019. As indústrias que produzem itens em ferro fundido representam 80% desse volume.

Conforme levantamento da Modern Casting (2019), o Brasil ocupa a 9ª colocação entre os maiores produtores mundiais em peso produzido pelas indústrias de fundição possuindo 1.024 empresas atuando nesse ramo. Os principais clientes do setor no Brasil são as indústrias automotivas, de máquinas rodoviárias e ferroviárias e os setores de infraestrutura e de bens de consumo (ABIFA, 2020).

Empresas desse segmento, como em qualquer outro, enfrentam forte concorrência e precisam adotar estratégias que as favoreçam no mercado global. Uma estratégia utilizada por parte das empresas é trabalhar com o conceito de sistema produtivo baseado em lotes. Para Tubino (2017), esse sistema é apropriado quando há médio volume de bens produzidos e se exige uma flexibilidade em relação às tarefas executadas.

Em um sistema de processamento em lote, há uma sequência de operações predefinida onde a operação seguinte deve ser programada conforme as anteriores são processadas. A área de Planejamento e Controle de Produção (PCP) possui papel fundamental nesse sistema produtivo, já que seu foco deve ser de planejamento da produção e sequenciamento das ordens de fabricação (TUBINO, 2017).

Pinedo (2012) trata o processo de sequenciamento da produção como *scheduling* e o define como um processo decisório usado pelas indústrias visando otimizar um ou vários objetivos por meio da alocação de recursos (sejam eles máquinas, pessoas ou matérias-primas) respeitando períodos predefinidos.

A priorização de ordens de fabricação feita por meio do sequenciamento impacta diretamente sobre os prazos de entrega, o tempo de produção das ordens de fabricação e os níveis de estoque. Por conta disso, é preciso tratar os problemas de sequenciamento como de caráter estratégico para uma organização (CORRÊA; GIANESI; CAON, 2019).

Este trabalho busca apresentar uma proposta de solução para o problema de sequenciamento de produção em uma empresa de fundição. A empresa trabalha com o sistema

de produção baseado em lotes, portanto, a observação ao atendimento de prazos de entrega é de suma importância e deve ser considerada na abordagem a ser utilizada.

1.1 JUSTIFICATIVA

Empresas estão cada vez mais interessadas na implantação de métodos que tornem mais eficazes e rápidas as tarefas de planejamento e controle da produção. Problemas de sequenciamento compõem essas tarefas, pois são vistos como oportunidade de reduzir desperdícios advindos de ociosidades e estoques. Além disso, a diminuição dos prazos de entrega é vista como ponto chave para o sucesso das organizações.

A aplicação na prática do sequenciamento da produção geralmente apresenta um alto grau de complexidade, por conta das muitas variáveis e restrições que devem ser consideradas. Empresas maiores resolvem esse problema por meio do emprego de *softwares* robustos frequentemente denominados *Advanced Planning and Scheduling* (APS). A questão é que estes *softwares* possuem licenças pagas e, devido ao seu custo financeiro, muitas vezes o seu uso não compensa para uma organização de menor porte. Outro ponto a ser destacado é que para oferecer recursos mais avançados, por vezes, os sistemas APS são desenvolvidos de forma a se distanciarem da realidade da empresa, ou seja, levando-se em conta aplicações genéricas.

Por conta disso, pequenas e médias empresas buscam soluções de baixo custo para seus problemas complexos de sequenciamento que permitam a modelagem o mais próximo possível da sua realidade. Essas soluções devem ser focadas tanto à realidade da empresa quanto ao uso de técnicas consagradas da Pesquisa Operacional (PO).

Para Virgillito (2018), é necessário às indústrias a utilização de modelos matemáticos para tomadas de decisão. Segundo Pinedo (2009), é essencial ao planejamento e programação da produção a utilização da matemática técnica e de métodos heurísticos para a alocação adequada de atividades à recursos limitados. Tal aplicação deve levar em conta os objetivos da empresa para que suas metas sejam alcançadas.

É crescente a utilização de técnicas da PO para esse fim dentro de áreas produtivas. A comprovação disso é o grande número de trabalhos acadêmicos elaborados recentemente e que apresentam estudos de caso com aplicação prática em diferentes setores industriais. Além da diversidade de contexto, as técnicas de PO são usadas para atingir diferentes objetivos. Exemplos dessas aplicações são encontrados nos trabalhos de Basso e Varas (2017), Bergamini (2019) e Martins (2017).

Jalalian e Defersha (2019) propõem a utilização de um algoritmo genético, tendo em vista o sequenciamento da produção de um processo semicontínuo em uma empresa do ramo alimentício. No modelo em questão, foram consideradas variáveis relacionadas à eficiência de máquinas, balanceamento de linhas e atendimento de demandas. Os resultados encontrados apresentaram melhora de 4,5% no objetivo principal que era reduzir o desbalanceamento da linha de produção. No entanto, o maior ganho nesse estudo foi no tempo dispendido para fazer o sequenciamento da produção. Anteriormente, demorava dias para encontrar a melhor solução com uso de um método manual, já com o emprego do algoritmo esse tempo foi reduzido para menos de uma hora.

Silva *et al.* (2019) utilizam técnicas da PO no sequenciamento de produção na indústria química para minimizar a soma dos tempos de *setup*. O estudo de caso ocorreu em um ambiente *flow shop* com *setups* assimétricos e dependentes da sequência de produção. O modelo usado foi desenvolvido por meio da Programação Linear Inteira Mista Binária e implantado com uso do suplemento Solver do *software* Excel. Os resultados obtidos apresentaram redução de 37% do tempo total destinado a *setups* na empresa.

Também é possível encontrar exemplos de otimização no sequenciamento de ordens de fabricação em empresas do ramo metalmeccânico. Rocha (2017) aplica a heurística denominada “agendamento de lista” em uma empresa fabricante de peças de aço, que trabalha com a estratégia *make to order* visando a minimizar o *makespan*. No estudo em questão, a autora utiliza o *software* Lingo e encontra resultados satisfatórios com baixo tempo de processamento.

A motivação para a temática deste trabalho surgiu das dificuldades vivenciadas na prática em uma empresa de médio porte do ramo de fundições, enfrentadas quando da definição do sequenciamento de suas ordens de fabricação. O modelo utilizado atualmente na empresa se baseia na experiência dos programadores de produção, levantando dúvidas se as melhores escolhas estão sendo adotadas.

1.2 OBJETIVOS

Essa seção apresenta o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral do trabalho é construir um modelo matemático que possibilite otimizar o sequenciamento de ordens de fabricação no setor de moldagem de uma empresa de fundição.

1.2.2 Objetivos específicos

Do objetivo geral, derivam-se os objetivos específicos como sendo:

- a) desenvolver um modelo de otimização;
- b) identificar e aplicar a técnica de PO que melhor atende às condições do problema para sequenciar as ordens de fabricação;
- c) analisar os resultados obtidos após a aplicação da técnica adotada;
- d) comparar os resultados da técnica proposta com os do método utilizado atualmente.

1.3 ABORDAGEM E DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

Segundo Nascimento e Sousa (2016), uma pesquisa pode ser classificada quanto a sua natureza, abordagens metodológicas, seus objetivos e procedimentos. No que se refere ao tipo, este trabalho pode ser classificado como de natureza aplicada. Para Gil (2018), em pesquisas de natureza aplicada, o propósito está em adquirir conhecimentos com intuito de aplicá-los à um contexto específico. Marconi e Lakatos (2018) enunciam que nas pesquisas de natureza aplicada há o interesse de uso prático dos resultados para resolução de problemas reais.

Em relação à metodologia, a abordagem é quantitativa, uma vez que se fundamenta em teorias existentes para testar dados de campo (SORDI, 2017). Lozada e Nunes (2018, p.133) explicam que “a pesquisa quantitativa pode ser utilizada em diversas situações, pois busca descrever significados diretamente a partir da análise de dados brutos e objetivos”.

Quanto aos objetivos, este trabalho pode ser classificado como de carácter exploratório. Para Gil (2018), as pesquisas exploratórias buscam familiarizar o pesquisador com o problema para torná-lo mais entendível e permitir a construção de hipóteses. O autor também destaca que a maioria dos trabalhos acadêmicos, pelo menos no seu início, são exploratórios.

O procedimento técnico de pesquisa utilizado é a modelagem e simulação. Miguel (2007) entende que a modelagem emprega técnicas matemáticas para referir o desempenho do

todo ou parte de um sistema produtivo. Ela pode ser complementada pela simulação que é a aplicação de técnicas computacionais que simulam o funcionamento destes sistemas produtivos. Virgillito (2018) trata modelagem como um método científico que possibilita a construção de cenários e auxilia atingir objetivos, sendo seguida pela simulação. O autor caracteriza simulação pela variação dos dados de entrada para testar diversos cenários obtendo o maior número de soluções possíveis.

Neste trabalho, é desenvolvido um modelo matemático derivado de modelos matemáticos encontrados na literatura e suportado por dados extraídos de um ambiente real para que os objetivos do estudo sejam atingidos.

O contexto em que se realiza esse estudo é uma empresa de fundição de metais de médio porte, localizada na cidade de Feliz e que fabrica peças para os ramos automotivo, hidráulico e de eletroferragens. Mais especificamente, o estudo investiga o processo produtivo e propõe uma abordagem baseada em modelagem matemática e aplicação de técnicas de Pesquisa Operacional para otimizar a programação e o sequenciamento de produção do processo de moldagem dessa empresa.

No capítulo 2 a etapa de pesquisa bibliográfica é apresentada e serve de base para construção deste trabalho. O capítulo 3 contém a proposta do trabalho, com a apresentação do problema e proposta de solução. O capítulo 4 descreve as etapas finais que compreendem a solução e validação do modelo matemático, além da análise dos resultados, enquanto o capítulo 5 apresenta as considerações finais do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para a elaboração deste trabalho houve um processo de pesquisa na teoria já existente sobre o assunto, conforme é apresentado na sequência.

2.1 PROCESSO DE FUNDIÇÃO

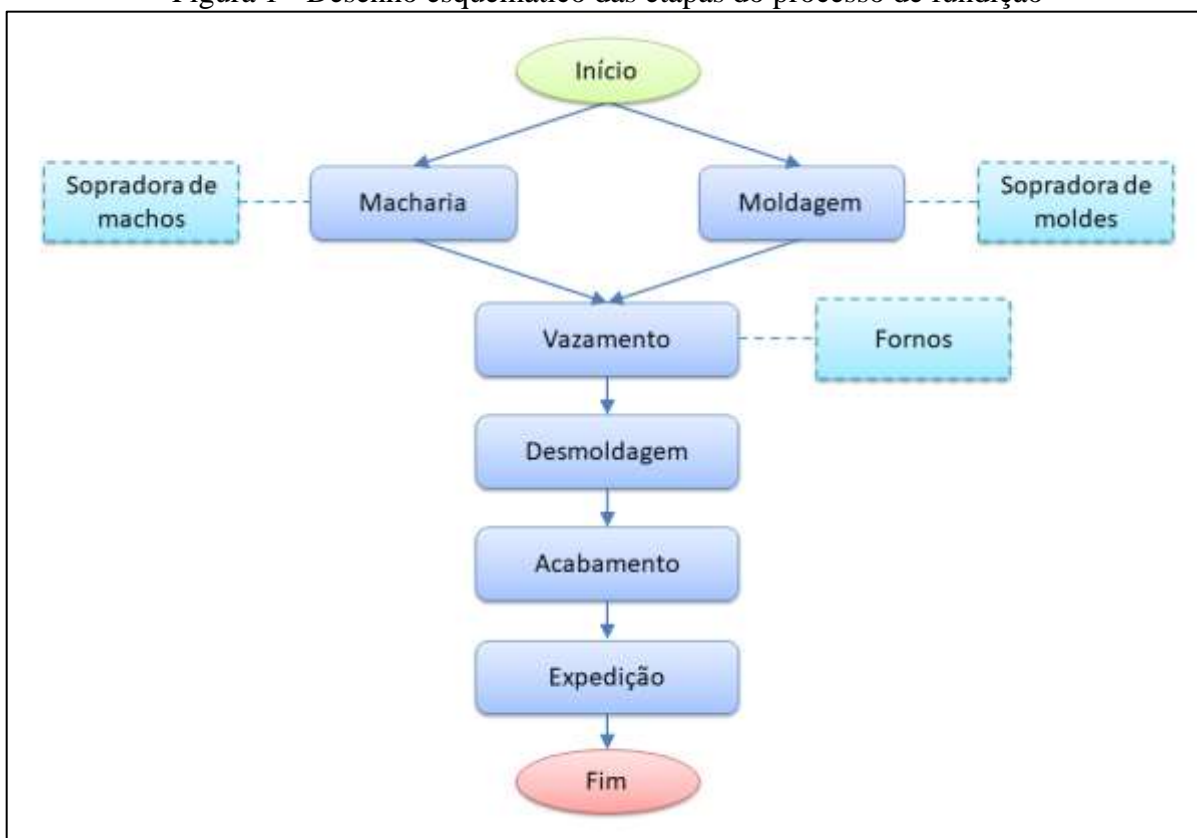
Para Baldam e Vieira (2014), uma fundição pode ser caracterizada pelo processo de vazamento de metal líquido dentro de um molde em que, após a solidificação, uma peça fundida é obtida. O processo de fundição é considerado muito versátil, pois possibilita a produção de peças com diferentes tamanhos, formas e características. A sua principal vantagem é o fato de proporcionar o caminho mais curto entre o metal líquido e a peça final, o que lhe confere competitividade econômica em produções seriadas.

Conforme Beeley (2001), outro ponto positivo do processo de fundição é a possibilidade de produzir peças dos mais diversos tipos de ligas metálicas e obter microestruturas que irão conferir propriedades mecânicas específicas a elas. Além disso, o autor destaca a possibilidade de fabricar as peças utilizando ferramentas simples e de baixo custo, ou até replicar uma peça já existente, o que é um diferencial na produção de amostras e protótipos, por exemplo.

Pode-se dividir as empresas de fundição em dois grandes grupos: fundições cativas e fundições de mercado. As fundições cativas representam a maioria no Brasil, produzindo peças em grandes quantidades que serão consumidas por outros departamentos dentro da própria organização, como montadoras de automóveis, por exemplo. As fundições de mercado destinam sua produção a terceiros e, por conta disso, sua produção costuma ser bastante diversificada, variando tamanhos de lote, composição de ligas e peso das peças. (ARAÚJO, 2003).

Para Baldam e Vieira (2014), os principais processos envolvidos na produção de peças fundidas são: fabricação de machos (componentes introduzidos no molde para compor as partes internas da peça); produção do molde (forma negativa da peça onde será vazado o metal líquido) por meio de máquinas sopradoras de moldes; vazamento, caracterizado como o processo no qual o metal líquido é vazado no molde; e acabamento, responsável pela eliminação de rebarbas e imperfeições superficiais. Um esquema ilustrativo das principais etapas de produção em uma indústria de fundição pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 - Desenho esquemático das etapas do processo de fundição



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

2.2 SEQUENCIAMENTO DE PRODUÇÃO

Segundo Slack, Brandon-Jones e Johnston (2018), o sequenciamento de produção é o processo de tomada de decisões sobre a ordem em que as tarefas, ou *jobs*, serão executadas. Para os autores, diferentes objetivos são levados em conta para determinar a ordem de um *job* dentro da sequência de produção. Esses objetivos podem ser considerados na forma básica, quando definido um único objetivo específico a ser atingido, ou na forma geral, que consiste na resultante da combinação de mais de um objetivo básico. Os autores relacionam os objetivos básicos como:

- a) *prioridade do cliente*: é utilizado quando há interesse estratégico da empresa em favorecer o *job* de um cliente específico, mesmo que prejudique o atendimento de outras tarefas;
- b) *data devida (DD)*: o trabalho é sequenciado levando-se em conta a data em que deve ser entregue. Pode ser utilizado quando há o interesse em diminuir o tempo de atraso de um *job* ou o número de *jobs* em atraso;

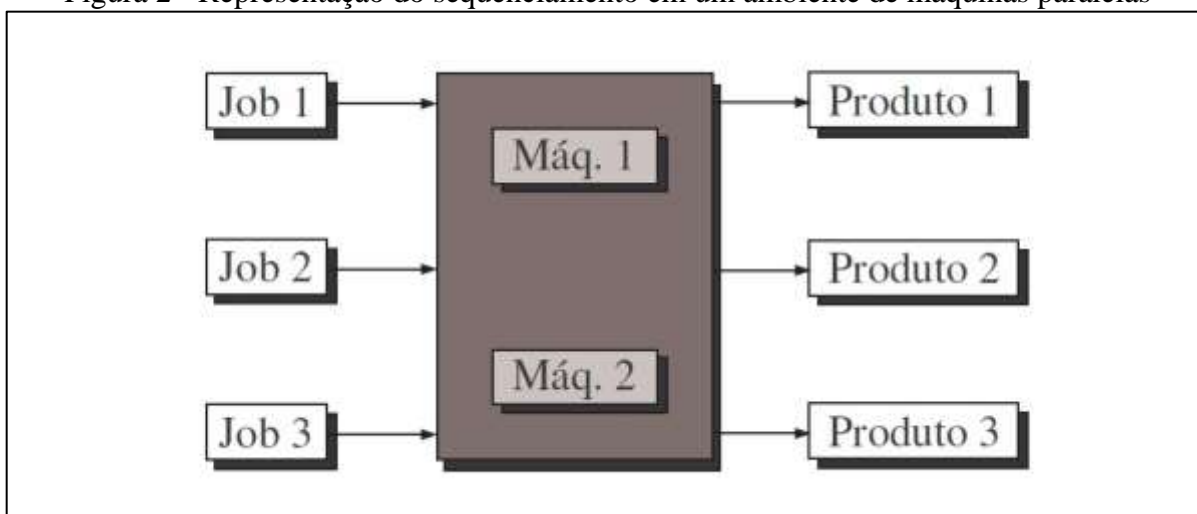
- c) último a entrar é o primeiro a sair (LIFO): é geralmente utilizado por razões práticas de um processo quando há somente uma entrada e saída como, por exemplo, um forno de tratamento térmico;
- d) primeiro a entrar é o primeiro a sair (FIFO): pode ser entendido também como o primeiro *job* iniciado deve ser o primeiro finalizado. Um exemplo prático de sua utilização está em processos que envolvem esteiras;
- e) tempo de operação mais longo (LOT): utilizado para ocupar os centros de trabalhos por longos períodos. Ele apresenta alta taxa de ocupação por minimizar o número de trocas entre os *jobs*;
- f) tempo de operação mais curto (SOT): prioriza-se os *jobs* com menor tempo de processamento. Pode ser utilizado quando há o interesse em aumentar o número de diferentes entregas, ou diminuir o número de *jobs* em processo.

Para Pinedo (2009), o arranjo das máquinas dentro do processo produtivo deve ser levado em conta em problemas de sequenciamento, pois, dependendo da disposição dos recursos, diferentes modelos podem ser empregados na resolução do problema. Conforme o autor, os arranjos de máquina mais conhecidos são os: de máquina única, de máquinas paralelas, ambientes *flow shop*, *job shop*, e *open shop*.

Modelos de máquina única, como o próprio nome diz, são empregados quando há o objetivo de sequenciar uma única máquina. É bastante útil quando há um gargalo que determina o desempenho de todo sistema produtivo e faz sentido iniciar o sequenciamento por esse recurso, fazendo os demais serem condicionados a ele (LAGE JÚNIOR, 2019; PINEDO, 2009).

Os modelos de máquinas paralelas são uma generalização dos modelos de máquina única, onde um centro de trabalho que possua mais de uma máquina que executa a mesma tarefa é considerado como um banco de máquinas. No modelo de máquinas paralelas, as máquinas são classificadas como: idênticas, possuem o mesmo tempo de processamento; uniformes, executam as mesmas tarefas com velocidades de processamento diferentes, mas que são constantes; e não relacionadas, a velocidade de processamento depende da tarefa executada. A Figura 2 apresenta a representação ilustrativa de como ocorre o processamento dos *jobs* em ambientes de máquinas paralelas (RAVETTI, 2003).

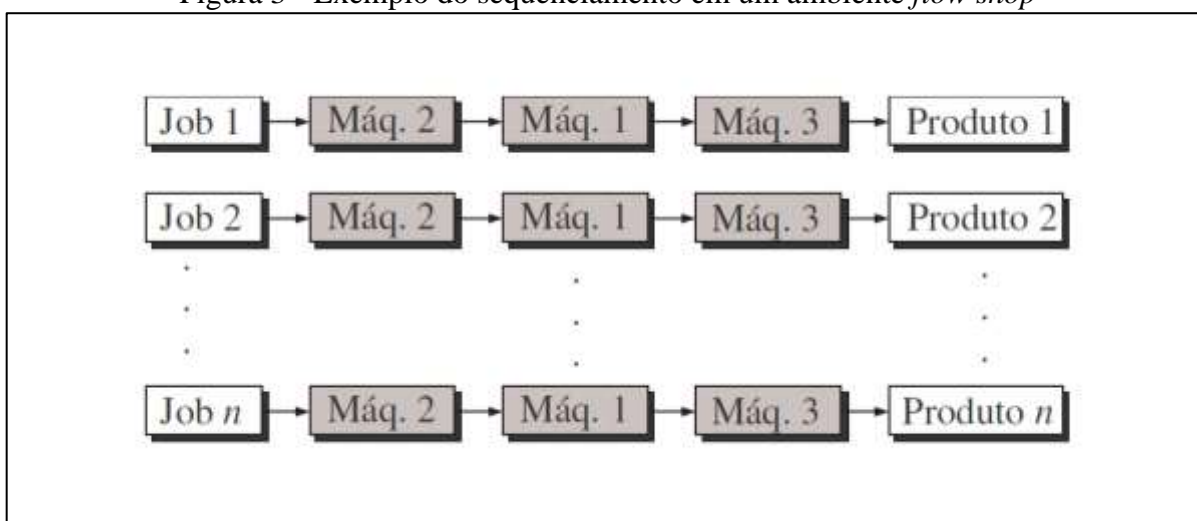
Figura 2 - Representação do sequenciamento em um ambiente de máquinas paralelas



Fonte: Adaptado de Gomes Júnior (2007).

Em modelos de ambientes *flow shop*, os *jobs* precisam passar por várias operações em várias máquinas diferentes, mas seguindo a mesma rota. As máquinas são dispostas em série e quando uma tarefa é terminada em uma máquina, o *job* entra na fila para ser produzido na máquina seguinte. Existe uma variante desse tipo de modelo que possibilita simplificá-lo caso as tarefas sejam executadas em estágios que possuam máquinas paralelas, é o chamado *flexible flow shop* (LAGES JÚNIOR, 2019). Um exemplo ilustrativo de um ambiente *flow shop* é mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Exemplo do sequenciamento em um ambiente *flow shop*

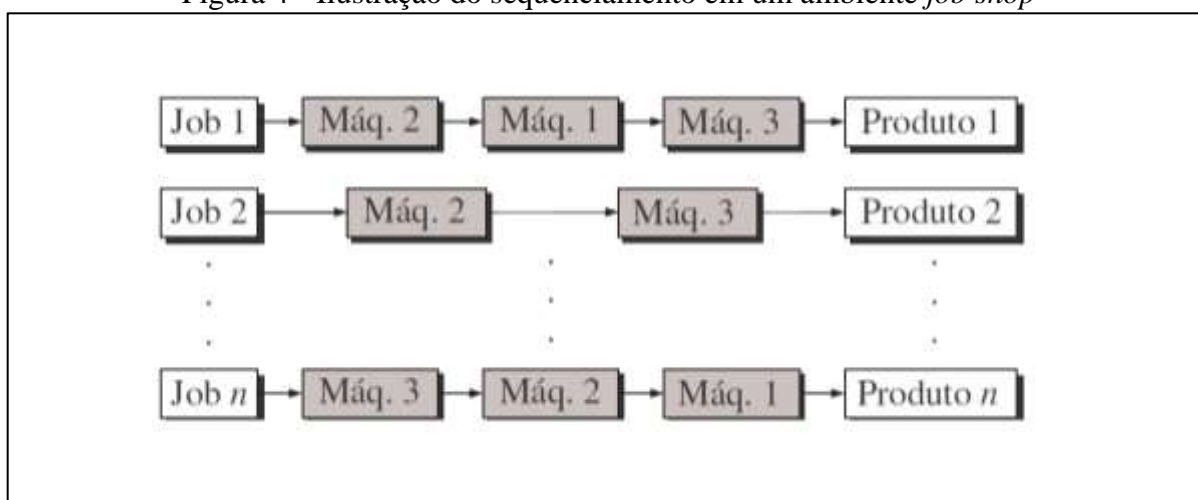


Fonte: Gomes Júnior (2007).

Quando os *jobs* possuem rotas diferentes de processamento, ou seja, cada *job* possui um roteiro diferente de tarefas a serem executadas, modelo representa um ambiente denominado *job shop*. Nesse modelo, é possível que o *job* volte para uma máquina após já ter

passado por ela para executar outra operação, essa característica aumenta a complexidade desse tipo de modelo. Da mesma forma que outros modelos, os modelos *job shop* possuem uma variante que considera máquinas idênticas em paralelo chamada *flexible job shop* (LAGE JÚNIOR, 2019; RAVETTI, 2003). A Figura 4 representa um ambiente do tipo *job shop*.

Figura 4 - Ilustração do sequenciamento em um ambiente *job shop*



Fonte: Gomes Júnior (2007).

Em ambientes denominados *open shop* não há uma sequência específica para a execução das tarefas, ou seja, também não há sequência predefinida para ocupação das máquinas pelos *jobs*.

Em qualquer modelo de sequenciamento, existem restrições que determinam como o processamento pode ser feito ou não. As restrições mais comuns são as de: precedência, que permitem o início de uma tarefa somente após a antecessora estar concluída (ou em determinado estágio de conclusão); elegibilidade de máquina, que consideram a capacidade técnica das máquinas do sistema produtivo em executar as tarefas; mão de obra, que levam em conta a disponibilidade de operadores para execução da tarefa; roteamento, que determinam a sequência de operações que uma tarefa deve seguir; espaço de armazenamento, que consideram a disponibilidade de espaço para armazenar o trabalho em processo enquanto aguarda para passar pela próxima tarefa (GOMES JÚNIOR, 2007; PINEDO, 2009).

2.2.1 Notação em problemas de sequenciamento

Os trabalhos que abordam problemas de sequenciamento, em geral, apresentam notações semelhantes para representar os principais termos dos modelos matemáticos. Os *jobs* são caracterizados por J_j em que $j = (1, 2, \dots, n)$ e n é o número de *jobs*. Os *jobs* devem ser

processados em m máquinas, sendo cada máquina representada por M_i onde $i = (1, 2, \dots, m)$ (RAVETTI, 2003).

Graham *et al.* (1979) apresentam uma notação para classificar os modelos de sequenciamento, que também é muito utilizada por outros autores, composta por três categorias α, β, γ e é representada na forma de $\alpha|\beta|\gamma$. A categoria α diz respeito ao ambiente sequenciado e é dividida em α_1 e α_2 , que denotam o tipo e o número de processadores (máquinas) do ambiente, respectivamente. O Quadro 1 apresenta o significado de cada símbolo atribuído à α_1 . Para α_2 , há dois valores possíveis: \emptyset , que representa um número variável de processadores; e K , que representa o número de processadores iguais a k .

Quadro 1 - Significado dos símbolos atribuídos a α_1

α_1	Significado
\emptyset	Máquina única
P	Máquinas paralelas idênticas
Q	Máquinas paralelas uniformes
R	Máquinas paralelas não relacionadas
O	Ambiente <i>open shop</i>
F	Ambiente <i>flow shop</i>
J	Ambiente <i>job shop</i>

Fonte: Adaptado de Ravetti (2003).

O campo β diz respeito às características das tarefas e recursos. Pode-se admitir na notação mais de uma característica, separando-as por vírgulas. No Quadro 2, estão representadas as siglas utilizadas na notação e seus respectivos significados.

Quadro 2 - Características das tarefas e recursos atribuídos a β

(continua)

Camp	Sigla	Significado
o		
β_1	\emptyset	Não é permitida a interrupção do processamento das tarefas.
	<i>pmtn</i>	É permitida a interrupção do processamento das tarefas.
β_2	\emptyset	Não existem restrições adicionais.
	<i>res</i>	Existem restrições especiais sobre os recursos.

(conclusão)

β_3	\emptyset	Tarefas independentes
	$prec$	Restrições de precedência
	uan	Atividades conectadas em rede
	$chains$	Relação de precedência em forma de árvore
β_4	\emptyset	Datas de disponibilidade iguais a 0
	r_j	Datas de disponibilidade dependentes das tarefas
β_5	\emptyset	Tempos arbitrários para processamento das tarefas
	$p_j = p$	Todas as tarefas possuem o tempo de processamento igual a p
	$\underline{p} \leq p_j \leq \bar{p}$	Tempo de processamento entre \underline{p} e \bar{p}
β_6	\emptyset	Não são consideradas as datas de entrega
	\tilde{d}	Cada tarefa possui uma data de entrega específica
β_7^*	\emptyset	Número de tarefas arbitrário
	$n_j \leq k$	O número de tarefas de cada <i>job</i> deve ser no máximo k
β_8^*	\emptyset	Estoques em processos com capacidades ilimitadas
	$no\ wait$	Capacidade de estoque igual a zero, as tarefas devem continuar seu processo imediatamente

* = parâmetro exclusivo para ambientes *job shop*.

Fonte: Adaptado de Ravetti (2003).

A última divisão da notação, identificada por γ , representa qual o critério será alvo do modelo de otimização escolhido para o sequenciamento, ou seja, há relação direta com a função objetivo do modelo. Os critérios de otimização mais utilizados, conforme Ravetti (2003), estão representados no Quadro 3.

Quadro 3 - Principais critérios de otimização atribuídos a γ

γ	Critério
C_j	Tempo para completar todas as tarefas (<i>makespan</i>)
L_j	Atraso máximo
\bar{F}	Tempo médio de fluxo
\bar{D}	Atraso médio
D_w	Atraso ponderado
U	Unidade de penalização

Fonte: Adaptado de Graham *et al.* (1979) e Ravetti (2003).

2.2.2 Sequenciamento em empresas de fundição

O sequenciamento de produção em empresas do setor de fundições possui significante importância, visto a quantidade de interdependências e restrições que o processo pode possuir dependendo do contexto da empresa. Outro ponto a ser destacado é a grande concorrência entre as empresas que atuam neste setor, o que torna o atendimento de prazos e a diminuição dos custos vitais para as organizações. A literatura científica apresenta algumas propostas de estudo para a otimização do sequenciamento de produção dentro das empresas de fundição, trazendo resultados positivos para essas empresas (ARAÚJO, 2003; CAMARGO, 2009).

Landmann *et al.* (2006) estudaram a aplicação de um algoritmo genético para sequenciar a produção em uma empresa de fundição. O trabalho teve como objetivo balancear da melhor forma a produção entre os setores de moldagem e fusão, fazendo com que a capacidade diária de vazamento não seja extrapolada ou subutilizada. Os autores utilizaram dados práticos de outro trabalho e, por meio dessa nova proposta, conseguiram resultados relativamente melhores.

Nonås e Olsen (2005) analisaram o sequenciamento da produção em uma empresa de fundição que fabrica peças de grande porte não seriadas e propuseram um modelo de programação linear inteira mista, juntamente com métodos heurísticos para resolução do problema. A regra utilizada para o sequenciamento foi a de produzir o pedido com a data de entrega mais próxima, havendo penalização em caso de pedidos entregues fora do prazo. Os resultados sugerem redução de até 29,7% no número de entregas em atraso.

Araújo (2003), após explorar casos de fundições de diferentes portes, identificou restrições comuns a elas, apesar de as empresas possuírem características de produção distintas. Essas restrições tratam especificamente dos fornos, ou da interação entre esse equipamento e as máquinas de moldagem. Para os fornos, o autor cita restrições relativas a peso máximo produzido por dia, peso máximo por batelada, tipos de ligas que podem ser produzidas e capacidade limitada à disponibilidade de potência elétrica contratada. Segundo o autor, as restrições referentes à interação entre os fornos e as máquinas de moldagem são mais comumente encontradas em empresas que possuem a produção automatizada ou semiautomatizada, onde deve-se considerar o balanceamento de produção entre os dois setores. Ainda há os casos de alguns itens que só podem ser moldados em máquinas específicas e de quantidade máxima de moldes por dia.

Uma característica a ser levada em conta no sequenciamento de empresas do ramo de fundições é a existência de *setups* dependentes, que significam diferentes tempos ou custos de trocas dependendo da sequência seguida. Um exemplo prático desse tipo de situação é a impossibilidade de utilizar sobras de liga que ficaram dentro do forno para o próximo tipo de liga que será produzido. Nesse caso, o forno deve ser esvaziado através do lingotamento das sobras, o que demanda mais tempo tanto para essa operação quanto para o posterior aquecimento do próximo metal a ser produzido (ARAUJO, 2003; CAMARGO, 2009).

2.3 PESQUISA OPERACIONAL

Segundo a Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional (SOBRAPO, 2020), a pesquisa operacional pode ser definida como a área de conhecimento que se preocupa em estudar, desenvolver e aplicar métodos analíticos que auxiliem na tomada de decisões em diferentes contextos de atuação. Arenales *et al.* (2011) resumem a definição de PO como sendo o ponto de vista científico sobre a tomada de decisões.

Para muitos autores, a origem da PO remete à Grã-Bretanha e sua atuação durante a Segunda Guerra Mundial. As primeiras aplicações são mencionadas em pesquisas para estudar de que forma os radares de aviação poderiam ser utilizados para interceptar aeronaves inimigas. Neste mesmo contexto, outros problemas que incluíam a administração da escassez de recursos, dimensionamentos de frotas e comboios, e a análise de probabilidades em batalhas submarinas contribuíram para o desenvolvimento da pesquisa operacional (ARENALES *et al.*, 2011).

Em um cenário pós-guerra, a PO evoluiu de forma muito rápida, principalmente nos Estados Unidos e na Inglaterra. As atividades antes executadas para melhorias no âmbito militar foram adaptadas para aplicações em indústrias com o intuito principal de aumentar a produtividade e resolver problemas complexos oriundos do rápido crescimento das organizações (LONGARAY, 2013).

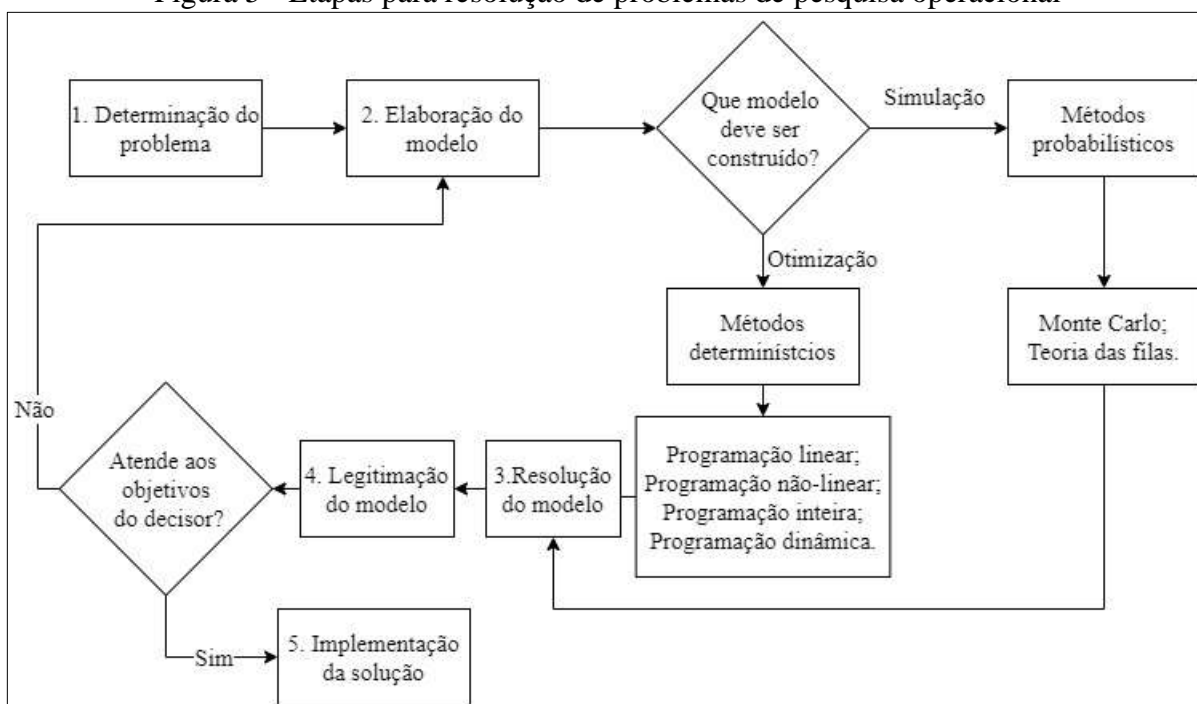
Moreira (2017) destaca dois fatores que foram fundamentais para o expressivo crescimento da pesquisa operacional nesse período. O primeiro é atribuído à melhoria das técnicas de PO com avanços relacionados à formulação dos problemas. Um exemplo a ser destacado é o algoritmo Simplex desenvolvido por George Dantzig, em 1947, e é considerado um importante fato impulsionador na área. Um segundo fator trata da popularização dos computadores, que permitiu o processamento de cálculos longos e repetitivos antes impraticáveis ao ser humano.

Para Longaray (2013), por ser uma ciência de caráter multidisciplinar, a PO apresenta diferentes variações de metodologias passíveis de aplicação para fundamentação científica de decisões. Hillier e Lieberman (2001) sugerem uma sequência de seis fases para resolução de um problema utilizando uma técnica de pesquisa operacional, conforme segue:

- a) definição do problema e coleta de dados relevantes: essa fase deve contemplar que parte é afetada pelo problema, possíveis restrições, como ocorre a interação de outras partes com o problema e os objetivos da sua resolução. Esses pontos são importantes para delimitação do problema às pessoas envolvidas no processo decisório sobre o qual uma ação deve ser tomada. A coleta de dados é importante para obtenção de entendimento preciso do problema e fornecer informações para a próxima fase do estudo;
- b) formulação do modelo matemático: nessa fase o problema deve ser descrito na forma de uma representação matemática que possibilite sua resolução. O objetivo do modelo, que pode ser um único ou vários, é definido por meio de uma representação matemática denominada função objetivo. Para a execução dessa fase é necessário que esteja claro qual o tipo de objetivo a ser atingido para que uma técnica de resolução seja escolhida adequadamente;
- c) resolução do modelo: consiste em aplicar um procedimento para encontrar a solução do modelo. Essa etapa é executada geralmente com auxílio de *softwares* que aplicam os algoritmos matemáticos baseados em técnicas de PO;
- d) teste e validação do modelo: inicialmente, o modelo pode apresentar vários erros cujas fontes devem ser identificadas e corrigidas por meio de testes. Por conta do modelo ser uma idealização do problema real, as soluções apresentadas por ele devem ser validadas pelo decisor, que identifica se são passíveis de aplicação real. Caso a resposta seja negativa, o modelo deve ser revisto;
- e) preparação para aplicação do modelo: tal etapa consiste na estruturação do modelo para que ele possa ser aplicado repetidas vezes para resolver problemas recorrentes, na mesma situação em que foi criado;
- f) implementação: a última fase trata da aplicação do modelo no caso real. Esta fase é considerada crítica, pois somente aqui os benefícios do estudo passam a ser perceptíveis.

Longaray (2013) trata as fases de resolução de um problema de forma semelhante, mas, além de apresentar uma nomenclatura diferente, o autor resume o processo em cinco etapas. Tal abordagem pode ser vista na Figura 5.

Figura 5 - Etapas para resolução de problemas de pesquisa operacional



Fonte: Adaptado de Longaray (2013).

2.3.1 Modelos de otimização

A otimização possui significativa importância em problemas que envolvem processos de decisão. Ela é empregada para estabelecer a forma mais eficiente de utilização de recursos de forma a atingir um objetivo específico. Comumente, recursos, financeiros, de matéria-prima, mão de obra ou equipamentos, por exemplo, são limitados e seu uso ponderado pode representar aumento de rendimento no processo em que estão inseridos (MARINS, 2011).

Para Longaray (2013), um modelo de otimização é a representação de um problema específico de forma lógica e que tem como objetivo a identificação de uma solução única e ótima. Segundo o autor, sempre que o objetivo for buscar o limite superior de possibilidades do modelo de otimização, ele é identificado como um modelo de maximização (Max). De forma antagônica, quando o objetivo for buscar o limite inferior tem-se um modelo de minimização (Min). Exemplos clássicos de situações de otimização são os casos de problemas que visam maximizar lucros ou minimizar custos industriais.

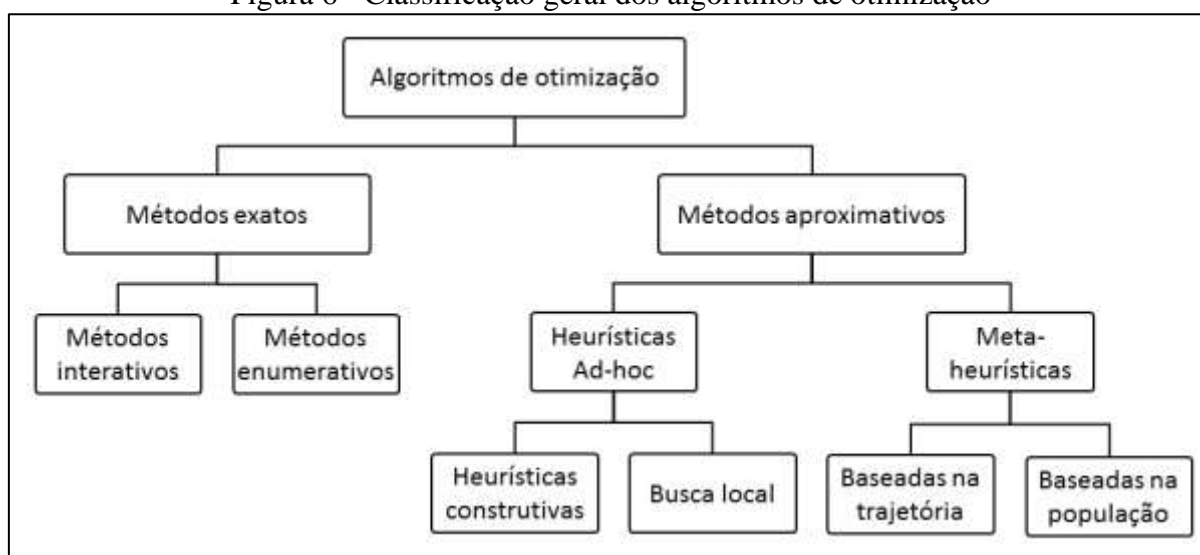
Para refletir uma situação existente, os modelos de otimização possuem fatores que limitam o seu resultado, esses fatores são conhecidos como restrições. As restrições são descritas na forma de equações ou inequações matemáticas e impõem limites tanto mínimos

quanto máximos que devem ser respeitados. Além disso, as restrições são usadas para indicar condições de não negatividade, não nulidade e utilização apenas de números inteiros. Em situações práticas, restrições podem representar uma quantidade mínima de estoque necessária ou a capacidade máxima de produção de uma máquina, por exemplo (LACHTERMACHER, 2018; MOREIRA, 2017).

Os aspectos a serem quantificados pelos modelos de otimização são conhecidos como variáveis de decisão. Elas podem assumir diferentes valores, sendo que na maioria dos casos os valores são resultado da variedade de modelos em que elas estão inseridas. Outro ponto a ser destacado sobre as variáveis de decisão é que elas representam eventos sujeitos a acontecerem na prática, portanto, em muitos casos é ilógico que elas assumam valores negativos. Em uma situação real, por exemplo, uma variável de decisão pode indicar quantas peças devem ser produzidas para atingir a meta de faturamento. Os modelos de otimização também empregam grandezas constantes, que ao contrário das variáveis de decisão, assumem valores que permanecem inalterados ao longo do processo de otimização, sendo comum o seu uso para mensurar resultados da função objetivo (HILLIER; LIEBERMAN, 2001; LONGARAY, 2013).

Para se determinar a solução de um modelo de otimização, deve-se buscar a iteração entre os elementos que compõem o modelo. Essas iterações são realizadas por meio de instruções definidas por algoritmos que estruturam a sequência lógica a ser seguida na resolução do modelo. A complexidade dos modelos fez com que, ao longo do tempo, métodos de resolução com diferentes características fossem criados. Uma classificação geral desses métodos pode ser observada na Figura 6 (AMIRI; SARDROUD; SOTO, 2017).

Figura 6 - Classificação geral dos algoritmos de otimização



Fonte: Adaptado de Amiri, Sardroud e Soto (2017).

Os métodos iterativos, como o próprio nome sugere, utilizam iterações divididas em estágios e que, a cada etapa, se aproximam mais da solução ideal de acordo com o valor da função objetivo. O exemplo mais conhecido de aplicação de métodos iterativos é o algoritmo Simplex, utilizado para resolver problemas lineares. Os métodos enumerativos, também conhecidos como métodos de busca exaustiva, aplicam técnicas que enumeram possíveis candidatos da solução e, individualmente, verificam se eles satisfazem as condições do problema. Uma técnica muito utilizada baseada em método enumerativo é o algoritmo *Branch and Bound*, (CAMARGO, 2009).

As heurísticas compreendem métodos de solução que garantem uma solução viável próxima da ótima, ou ótima, utilizando razoável esforço computacional. Sua aplicação depende de cada caso sem haver a possibilidade de criar uma estratégia universal de solução. Exemplos conhecidos de métodos heurísticos são as heurísticas construtivas e de busca local. Por outro lado, as meta-heurísticas são caracterizadas como estratégias de solução de uso geral, exigindo apenas a adaptação para o caso específico. As meta-heurísticas podem ser classificadas como de busca populacional como, por exemplo, o Algoritmo Genético, a Colônia de Formigas, e a Otimização por Enxame de Partículas; ou como de busca em trajetória como, por exemplo, o *Simulated Annealing*, a Busca Tabu e o *Iterated Local Search*, (GOLDBARG, 2005).

2.3.1.1 Modelos de programação linear

Conforme Hillier e Lieberman (2001), a programação linear (PL) utiliza modelos matemáticos para resolver problemas de otimização. Para os autores, o cerne da PL trata de planejar atividades buscando atingir o objetivo da melhor maneira possível dentre as alternativas disponíveis. Embora a alocação de recursos seja a forma mais comum de aplicação, todo e qualquer problema que pode ser descrito em um modelo matemático linear é um problema de PL.

A PL é uma das técnicas mais utilizadas para resolver problemas onde aplica-se a pesquisa operacional e essa preferência pode ser explicada de diferentes formas. Longaray (2013) atribui parte da popularidade do modelo ao fato dele possuir sua estrutura algébrica muito próxima ao que os modelos de otimização sugerem. Outro ponto que o autor destaca está na característica de linearidade do método que, segundo ele, é a forma como as pessoas possuem o hábito de pensar seus problemas. Arenales *et al.* (2011) estabelecem a publicação do método Simplex em 1947 como um marco para a popularização dos modelos de PL, pois devido aos

avanços possibilitados pelo método, ele foi alvo de muitos estudos ao longo dos anos subsequentes.

Para que um sistema seja descrito na forma de um modelo de PL, ele deve possuir características de proporcionalidade, não negatividade, aditividade e separabilidade. Ou seja, o recurso consumido por uma atividade, por exemplo, deve ser proporcional a ela na solução do problema, a sua realização deve ser possível em uma condição não negativa, um valor total deve ser a soma de parcelas de cada atividade e deve ser possível a identificação de forma separada de quanto recurso é consumido (GOLDBARG, 2005).

Conforme Lachtermacher (2018), os problemas de programação linear podem ser descritos na seguinte forma padrão:

otimizar $Z = f(X) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$

sujeito a: $g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq, =, \geq b_1$

$g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq, =, \geq b_2$

.....

$g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq, =, \geq b_m$

em que:

$f(X)$ é a função objetivo do modelo;

x_j são as variáveis do modelo ($j = 1, 2, \dots, n$);

b_i representa os termos independentes das restrições do modelo ($i = 1, 2, \dots, m$);

$g_i(x)$ são as funções de restrições do modelo ($i = 1, 2, \dots, m$);

n é o número de variáveis de decisão do modelo; e

m é o número de restrições do modelo.

3 PROPOSTA DE TRABALHO

O estudo desenvolvido neste trabalho possui como propósito o desenvolvimento de um modelo de otimização que será validado com a sua aplicação no sequenciamento da produção em uma empresa de fundição. Este capítulo apresenta a descrição da empresa e suas características produtivas, a proposta de intervenção, e as etapas que foram seguidas para desenvolver e aplicar o modelo.

3.1 DESCRIÇÃO DA EMPRESA

A empresa estudada iniciou suas operações em 1980, em Caxias do Sul-RS, produzindo equipamentos utilizados nas atividades de garimpo e irrigação. Em 2005, a empresa transferiu sua sede matriz para a cidade de Feliz-RS, onde se encontra atualmente. Ao longo dos anos, com a diminuição das atividades de garimpo no país, e empresa viu-se obrigada a mudar o seu mix de produtos e iniciou o desenvolvimento de itens brutos e usinados produzidos em ferro fundido para os segmentos:

- a) de eletroferragens: peças utilizadas em redes de transmissão de eletricidade que servem como elementos estruturais para os cabos de energia e isoladores elétricos;
- b) de corpos hidráulicos: elementos utilizados em comandos hidráulicos empregados em máquinas pesadas para realizar a movimentação de carga;
- c) agrícola: polias de redução, dentes de colheitadeiras e peças estruturais;
- d) automotivo: suportes de motor, polias e terminais de cardans.

Sua carteira de pedidos é bastante diversificada, possuindo clientes na região sul e sudeste do Brasil, além de exportar parte da produção para outros países. Alguns exemplos de peças produzidas pela empresa podem ser vistos na Figura 7.

Segundo a classificação de empresas de fundição proposta por Araujo (2003), a empresa estudada é caracterizada como uma fundição de mercado, uma vez que sua produção é destinada exclusivamente para clientes externos não havendo consumo por outras unidades da mesma organização. A estratégia produtiva que a empresa adota é de produzir em lotes de quantidades variadas e somente após pedido confirmado pelo cliente. Tal estratégia possibilita reduzir os estoques de produtos prontos, mas em contrapartida aumenta os estoques intermediários dentro da produção, tornando os prazos de entrega um fator ainda mais importante para seu sucesso.

Figura 7 - Exemplos de peças produzidas pela empresa



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

3.1.1 Estrutura produtiva

A planta de fundição da empresa na cidade de Feliz possui capacidade instalada de aproximadamente 3.000 toneladas de peças por ano. A unidade produtiva da empresa pode ser dividida em setores denominados macharia, moldagem, montagem, fusão/vazamento e acabamento. Dessas etapas, somente os processos contidos no setor de macharia não são obrigatórios para todos os tipos de itens, sendo sua necessidade condicionada à geometria da peça. O Apêndice A representa, por meio da notação BPMN, as principais atividades envolvidas no processo de fundição da empresa.

No setor de macharia, são fabricados os machos, componentes produzidos em areia que possibilitam conferir cavidades internas às peças. A produção dos machos inicia em máquinas denominadas sopradoras de machos, que, com uso de ar comprimido, lançam uma mistura de areia e resina em alta velocidade em uma ferramenta aquecida. Por conta da característica termoplástica da resina contida na mistura, a areia preserva o formato da ferramenta mesmo após extraída. Posteriormente, os machos são rebarbados e recebem uma pintura de tinta refratária que retarda sua queima no momento do vazamento, estando prontos para a etapa de montagem. Exemplos de machos usados no processo podem ser observados na Figura 8.

Figura 8 - Exemplos de machos tipo *shell* utilizados no processo

Fonte: PGM Shell (2020).

Em empresas de fundição, o processo de moldagem é considerado um dos mais importantes, juntamente com o de fusão/vazamento, pois todo o layout da empresa acaba sendo projetado conforme o tipo de moldagem empregado (que pode variar quanto às matérias-primas, processos e máquinas utilizadas). Na empresa estudada, o setor de moldagem trabalha com o processo denominado *cold box*, e as máquinas onde são fabricados os moldes são chamadas de sopradoras de moldes. A empresa conta com duas sopradoras de moldes idênticas, que, somadas, possuem capacidade máxima de 1.500 moldes por dia. A Figura 9 ilustra um modelo de máquina sopradora de moldes em *cold box*.

Figura 9 - Exemplo de sopradora de moldes em *cold box*

Fonte: Grupo MSP (2020).

No processo de moldagem, a mistura de areia e resinas é soprada na ferramenta (que possui o formato da peça, das marcações onde serão encaixados os machos, e do canal de vazamento) por meio do ar comprimido. Posteriormente, é adicionado catalizador e ocorre o endurecimento da mistura, dando forma final ao molde, conforme mostrado na Figura 10. Todo esse processo ocorre em somente um ciclo da máquina, ficando o operador responsável apenas por retirar o molde da ferramenta, passar ar comprimido para limpar resquícios de areia e reiniciar o ciclo.

Figura 10 - Molde produzido pelo processo *cold box*



Fonte: Alumetaf (2020).

Na montagem, é feito o acabamento dos moldes antes deles serem montados, juntamente com os machos e copos de vazamento, em estruturas denominadas árvores, que serão preenchidas com metal líquido na etapa de vazamento. A quantidade de moldes empilhados depende do peso do item que será produzido e é definida pelo setor de engenharia de processos. Somente parte do metal vazado na árvore é transformado em peça, cerca de 75%. Os 25% restantes solidificam-se na forma do canal e do copo de vazamento, e são reutilizados no forno de indução como matérias-primas para formar as ligas nas bateladas seguintes. A Figura 11 exhibe os moldes montados em forma de árvores.

Figura 11 - Moldes montados em árvores prontos para o vazamento



Fonte: Alumetaf (2020).

O setor de fusão/vazamento é responsável pela fusão das matérias-primas que compõem a liga metálica e do vazamento do metal líquido nas árvores. O metal é fundido e vazado em bateladas, sendo a capacidade de cada batelada definida pela capacidade de armazenamento do forno que é de 1.120 kg. Cada item possui uma quantidade predefinida de árvores que serão preenchidas em cada batelada do vazamento.

Depois de vazadas, as árvores passam por resfriamento à temperatura ambiente. Posteriormente, as peças são separadas dos canais de vazamento e seguem para rebarbação, jateamento e acabamento. Atendendo a todos os critérios de qualidade, as peças são embaladas e enviadas para expedição, completando todo o ciclo de produção.

3.1.2 Apresentação do problema

Para o bom funcionamento das etapas de produção da empresa, cada processo deve ser programado de forma que não extrapole a capacidade do processo que o antecede e ainda assim atenda às metas de produção. Conforme já descrito, o setor de moldagem da empresa estudada possui significativa importância dentro do processo de fundição, sendo considerado o gargalo em caso de produção máxima e, portanto, parte-se dele para fazer a programação da produção.

Os itens demandam quantidades diferentes de mão de obra do setor de macharia, inclusive podendo ser zero para alguns deles. Essa demanda é medida em horas e tem uma capacidade máxima diária de produção. Quando se produz o molde, na etapa de moldagem, é

preciso que o macho seja processado paralelamente para que ambos sejam conjugados na etapa de montagem das árvores. As árvores, após montadas, seguem para a etapa de vazamento onde receberão a quantidade de metal líquido pré-definida pela Engenharia de Processos.

A empresa não possui um software que permita sequenciar as ordens de fabricação, apenas o sistema ERP que gera informações de quais itens devem ser produzidos, suas quantidades e prazos de produção. De posse dessas informações, o PCP (que é o setor responsável pela programação e controle das etapas do processo de fundição), com o auxílio de planilhas eletrônicas, organiza as ordens de fabricação da mais antiga para a mais recente e, no momento da programação, segue-se a lógica de produzir inicialmente as ordens de fabricação que apresentem o prazo de entrega mais próximo. Ao programar a produção, o PCP deve levar em conta o balanceamento entre os setores de macharia, moldagem e vazamento, para que as metas de fabricação sejam atingidas e os pedidos sejam entregues dentro do prazo combinado com o cliente.

Atualmente, a programação é feita quase que exclusivamente por meio do conhecimento empírico do programador de produção, embora esse não consiga avaliar todas as restrições do processo de forma adequada. Além disso, muito tempo é dispendido para gerar o programa de produção da moldagem, fazendo com que, por vezes, a programação de outro setor seja preterida.

3.2 ETAPAS DO ESTUDO

Para melhor organização, a aplicação do estudo foi dividida em algumas etapas que são descritas conforme segue:

- a) realização da pesquisa bibliográfica: elaboração e realização do procedimento de busca por trabalhos relacionados ao tema de pesquisa, a partir de consulta a bases de dados;
- b) mapeamento dos setores estudados: coleta de informações sobre os processos, equipamentos, demandas e capacidades dos setores alvos do estudo;
- c) construção do modelo conceitual: listagem das características e premissas que devem ser consideradas para construção o modelo matemático;
- d) construção do modelo matemático: representação do problema na forma de equações matemáticas que possibilitem identificação da política ótima de produção;
- e) solução do modelo matemático: aplicação de procedimentos para resolução do modelo matemático;

- f) validação do modelo: realização de testes visando à identificação de inconsistências no uso do modelo matemático ou na resposta gerada, seguida pelas correções necessárias;
- g) análise dos resultados: comparação da solução proposta com o método atualmente empregado para resolver os problemas de sequenciamento.

3.3 MODELO CONCEITUAL

Para possibilitar a construção de um modelo matemático que represente de forma adequada o problema em estudo, algumas características relativas ao problema devem ser consideradas, conforme segue:

- a) o ambiente produtivo onde o problema está inserido possui duas máquinas sopradoras de moldes idênticas em paralelo que devem processar um conjunto de n *jobs* que representam as ordens de fabricação do setor;
- b) as duas máquinas trabalham com a mesma velocidade de execução das tarefas;
- c) uma vez iniciado o processamento do *job*, este deve ser finalizado, não sendo permitida a interrupção do processamento;
- d) todos os *jobs* estão disponíveis para processamento na data 0;
- e) não é admitido tempo ocioso entre os *jobs*;
- f) é necessário um tempo de *setup*, que é padrão, para cada nova ordem de fabricação que é iniciada;
- g) por conta de características inerentes de ferramentas utilizadas, alguns *jobs* só podem ser processados em uma máquina específica;
- h) cada *job* demanda, ou não, uma quantidade de horas de processamento do setor de macharia;
- i) a soma das horas de processamento demandadas do setor de macharia não devem exceder a capacidade máxima do setor;
- j) cada *job* possui um peso que representa quanto metal líquido ele agrega à operação de vazamento;
- k) a soma dos pesos dos *jobs*, processados ao longo de cada dia deve ser igual à meta de peso líquido vazado para um dia;
- l) se o término do processamento de um *job* ocorrer antes da sua respectiva data de entrega, há uma penalização por adiantamento. Caso o término se dê após a data de entrega, haverá penalização por atraso.

3.4 MODELO MATEMÁTICO

Utilizando a notação apresentada por Graham (1979), o presente problema pode ser representado como $P_2|\tilde{d}|U$. Dessa forma, o problema é composto por duas máquinas idênticas em paralelo, as datas de entrega das tarefas são consideradas e, por fim, a medida que será alvo da otimização é chamada unidade de penalização. O objetivo do modelo de otimização é minimizar o somatório dos custos de antecipação e de atraso que serão atribuídos a cada tarefa caso ela seja finalizada antes ou depois do prazo de entrega.

O modelo proposto é baseado nos trabalhos de Ravetti (2003), Bustamante (2007) e Gomes Júnior (2007), fazendo uso das seguintes notações para os parâmetros de entrada:

- a) N : número total de *jobs* a serem sequenciados;
- b) j : indexação do *job* que será sequenciado;
- c) M : número total de máquinas em paralelo disponíveis;
- d) m : indexação das máquinas;
- e) T : máximo período considerado;
- f) t : indexação do período de tempo;
- g) p_j : quantidade de moldes do *job* j que devem ser produzidos;
- h) P_{mt} : capacidade máxima da máquina m no período t ;
- i) b_j : quantidade de horas de processamento que o *job* j demanda do setor de macharia;
- j) B_t : capacidade máxima do setor de macharia no período t ;
- k) s_j : peso de metal líquido que o *job* j representa para o setor de fusão;
- l) S_t : meta de produção do setor de fusão no período t , medida em peso de metal líquido vazado;
- m) v : perda de produção associada a cada *setup* realizado, medida em quantidade de moldes;
- n) α : custo pela antecipação na entrega dos *jobs*, por unidade de tempo;
- o) β : custo pelo atraso na entrega dos *jobs*, por unidade de tempo;
- p) D_j : data prometida para entrega do *job* j .
- q) L_{jm} : será 1 se a ferramenta necessária para processar o *job* j só é compatível com a máquina m e 0 caso não haja restrição de máquina para essa ferramenta;

Como variável de decisão do modelo tem-se:

- a) x_{jmt} : será 1 se o *job* j é processado na máquina m no período t e 0 no caso contrário;

Da variável de decisão, resultam as demais variáveis, conforme segue:

- a) e_j : tempo de adiantamento na entrega do *job* j ;
 b) h_j : tempo de atraso na entrega do *job* j ;
 c) U : custo total de adiantamento e atraso de entrega ao final do período.
 d) γ_{mt} : capacidade da máquina m não utilizada no período t ;
 e) C_t : capacidade do setor de macharia não utilizada no período t ;
 f) F_t : quantidade de metal líquido produzido a mais no período t ;
 g) V_{mt} : quantidade de *setups* realizados na máquina m no período t .

O modelo matemático de otimização proposto para representar o problema abordado é apresentado a seguir:

minimizar

$$U = \sum_{j=1}^N (\alpha \times e_j + \beta \times h_j) \quad (1)$$

sujeito a:

$$e_j = \max \left\{ 0, D_j - \sum_m^M \sum_t^T (x_{jmt} \times t) \right\} \quad \text{para } j = 1, \dots, N \quad (2)$$

$$h_j = \max \left\{ 0, \sum_m^M \sum_t^T (x_{jmt} \times t) - D_j \right\} \quad \text{para } j = 1, \dots, N \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^N (x_{jmt} \times p_j) \leq P_{mt} + \gamma_{mt-1} - (v \times V_{mt}) \quad \text{para } m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T \quad (4)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^N (x_{jmt} \times b_j) \leq B_t + C_{t-1} \quad \text{para } t = 1, \dots, T \quad (5)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^N (x_{jmt} \times s_j) \geq S_t - F_{t-1} \quad \text{para } t = 1, \dots, T \quad (6)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T x_{jmt} = 1 \quad \text{para } j = 1, \dots, N \quad (7)$$

$$\gamma_{mt} = P_{mt} - \sum_{j=1}^N (x_{jmt} \times p_j) + \gamma_{mt-1} - (v \times V_{mt}) \quad \text{para } m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T \quad (8)$$

$$C_t = B_t - \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^N (x_{jmt} \times b_j) + C_{t-1} \quad \text{para } t = 1, \dots, T \quad (9)$$

$$F_t = \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^N (x_{jmt} \times b_j) - S_t + F_{t-1} \quad \text{para } t = 1, \dots, T \quad (10)$$

$$\sum_{t=1}^T x_{jmt} \geq L_{jm} \quad \text{para } j = 1, \dots, N; m = 1, \dots, M \quad (11)$$

$$V_{mt} = \sum_j^n x_{jmt} \quad \text{para } m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T \quad (12)$$

$$\gamma_{m0} = 0 \quad \text{para } m = 1, \dots, M \quad (13)$$

$$C_0 = 0 \quad (14)$$

$$F_0 = 0 \quad (15)$$

$$x_{jmt} \in \{0,1\} \quad \text{para } j = 1, \dots, N; m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T \quad (16)$$

$$L_{jm} \in \{0,1\} \quad \text{para } j = 1, \dots, N; m = 1, \dots, M \quad (17)$$

$$V_{mt} \geq \mathbb{Z}_+ \quad \text{para } m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T \quad (18)$$

$$\gamma_{mt} \geq 0 \quad \text{para } m = 1, \dots, M; t = 1, \dots, T \quad (19)$$

$$C_t \geq 0 \quad \text{para } t = 1, \dots, T \quad (20)$$

$$F_t \geq 0 \quad \text{para } t = 1, \dots, T \quad (21)$$

A equação (1) representa a função objetivo que tem como alvo da otimização minimizar o somatório dos custos de antecipação e de atraso para conclusão dos *jobs*. As equações (2) e (3) indicam o tempo de adiantamento e de atraso na conclusão do *job* j , respectivamente. A restrição (4) garante que a quantidade de moldes programada na máquina m não exceda a sua capacidade de produção no período t . A restrição (5) define que a soma de horas processadas pela macharia não exceda a capacidade do setor no período t . A restrição (6) garante que a soma do peso produzido pelos *jobs* finalizados atinja a meta de produção no período t . A restrição (7) garante que um *job* somente seja produzido em uma máquina e em um t específico. As equações (8) e (9) quantificam a capacidade subutilizada nos setores de moldagem e macharia, respectivamente, e que poderá ser utilizada no período $t + 1$. A equação (10) estabelece a quantidade de metal líquido produzido a mais no período t e que é abatida da meta de produção do setor no período seguinte, $t + 1$. A restrição (11) assegura que o *job* j seja

produzido somente em uma sopradora de moldes capacitada. A equação (12) define a quantidade de setups realizados na máquina m no período t . As restrições (13) a (15) garantem o inventário inicial nulo. As restrições (16) a (21) definem o domínio das variáveis.

3.5 MODELO COMPUTACIONAL

Para organização e tratamento dos dados, o software Excel foi escolhido como melhor alternativa, por conta da sua interface, que facilita a organização e apresentação das informações de forma objetiva, simplicidade de operação, e por ser um dos programas que a empresa já possui licença de uso.

Para possibilitar a solução do modelo proposto na seção anterior, são necessários pacotes de ferramentas que implementam a resolução de modelos de programação linear. Apesar de o software Excel possuir seu próprio solver para resolução de problemas lineares e não lineares, ele possui um limitante de 150 variáveis de decisão. Como o modelo proposto extrapola essa capacidade, ele foi resolvido com o uso de uma extensão ao software chamada Open Solver (OPEN SOLVER, 2020) que não impõe limites à quantidade de variáveis de decisão e, que por ser uma ferramenta de código aberto, permite seu uso de forma gratuita.

4 RESULTADOS

Neste capítulo, são descritas as etapas realizadas para a aplicação da proposta do trabalho, os resultados obtidos e a análise desses resultados.

4.1 COLETA E TRATAMENTO DOS DADOS

Para solução do problema de sequenciamento, inicialmente foram coletados os dados necessários para definição dos valores dos parâmetros de entrada do modelo. Do sistema ERP da empresa, por meio de acesso aos relatórios de demandas, foram coletados os dados referentes às ordens de fabricação que devem ser produzidas ao longo do período de análise. Os dados permitem gerar as informações contendo o número da ordem de fabricação (j), a data prometida para a conclusão do *job* (D_j), a quantidade de metal líquido que a ordem representa para o setor de fusão (s_j), a quantidade de moldes que devem ser produzidos (p_j), a quantidade de horas demandadas do setor de macharia (b_j) e se há restrição de máquina para processar o *job* (L_{jm}). A Figura 12 exemplifica a forma como os dados foram organizados com o auxílio de uma planilha eletrônica.

Figura 12 - Exemplo da organização dos dados das ordens de fabricação

CÓD. DO ITEM	Nº OFA (j)	PEND. EM PÇS	PRAZO (D_j)	PEND. METAL LÍQUIDO (s_j)	PEND. MOLDES (p_j)	PEND. MACHARIA (b_j)	Lj1	Lj2
B74.1002	66595	4928	04/09/2020	2.240	0	0,00	0	0
B87.00110R	63932	264	04/09/2020	1.100	0	10,56	0	1
B37.294905	64503	6720	04/09/2020	2.226	0	0,00	0	1
B38.294905	64395	2592	07/09/2020	1.080	0	0,00	1	0
B10.5E1RD	65676	114	08/09/2020	1.083	76	7,41	0	1
B31.2000ET	1	6720	08/09/2020	2.226	329	0,00	0	1
B50.58C	2	189	08/09/2020	3.276	156	18,59	0	1
B47.44015251	66442	320	08/09/2020	2.624	192	18,35	0	0
B21.2000ET	64952	7776	08/09/2020	3.240	308	0,00	1	0
B00.8400FE	66685	240	08/09/2020	1.840	0	3,20	0	1
B04.255111	65193	144	08/09/2020	1.056	24	5,04	0	0
B11.5X1RD	65751	24	08/09/2020	308	0	3,10	0	1
B47.44015251	66483	70	08/09/2020	574	0	4,01	0	0
B40.0200	67586	728	09/09/2020	2.184	153	14,69	0	0
B59.0940	65503	336	09/09/2020	112	16	0,00	1	0
B2.R10	64900	114	09/09/2020	1.520	76	8,36	0	1

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Além dos dados sobre as demandas de fabricação, também foram coletadas informações, juntamente com a coordenação da produção, sobre as capacidades e metas dos

setores que compõem o processo. O setor de macharia, responsável pela tarefa de produção e acabamento dos machos, possui sua capacidade definida em horas de trabalho disponíveis por dia. A quantidade de horas disponíveis é obtida por meio da multiplicação do número de pessoas que trabalham no setor, da quantidade de horas por turno e da eficiência média. Por exemplo, se o setor é composto por cinco pessoas que trabalham 8 horas por dia com eficiência média de 90%, a capacidade diária de macharia é 36 horas.

No setor de moldagem, a capacidade das máquinas sopradoras de moldes é definida em quantidade de moldes por dia. Para estipular esse número em cada uma das máquinas, o setor responsável pela produção (PCP) realiza a multiplicação da capacidade operacional da máquina, da quantidade de horas disponíveis no turno, da quantidade de turnos e a eficiência média de operação, sem considerar os setups. Atualmente, a empresa trabalha com três turnos de trabalho de 8 horas, dos quais dois possuem operadores suficientes para trabalhar com as duas máquinas sopradoras de moldes e um turno trabalha somente com uma das máquinas. A escolha de qual máquina será operada nesse turno é feita pelo PCP, levando em conta a prioridade na conclusão das ordens de fabricação alocadas.

A meta de peso de metal líquido vazado no setor de fusão, medido em kg por dia, é definida pelo PCP, juntamente com a gestão da produção, levando-se em conta a necessidade de atendimento dos pedidos nas próximas semanas. O não atendimento dessa meta acarreta em atrasos futuros por falta de capacidade e penaliza a produção por meio dos indicadores de desempenho.

As perdas de produção, decorrentes do tempo em que uma máquina sopradora de moldes passa por procedimentos de setup, foram contabilizadas na unidade moldes por setup. Para que esse número fosse estimado, tendo sido assumido como padrão para todas as trocas de ferramenta, foram avaliados os tempos médios de setup e a correspondente quantidade de moldes que a máquina deixou de produzir durante esta operação de *setup*. Por exemplo, se o tempo médio de setup é 0,25 horas e a sopradora de moldes possui capacidade de produzir 28 moldes por hora, a perda de produção associada ao setup é de 7 moldes.

A empresa não possui métrica para estimar financeiramente os custos por atrasos e antecipações na entrega das ordens de fabricação, portanto, os valores para esses dados de entrada foram estimados considerando o impacto que cada situação gera. Partindo da ideia de que um atraso é pior para a empresa porque afeta um cliente externo e abala a credibilidade da empresa, a esse custo foi atribuído um valor 3 vezes maior do que o de uma antecipação, que é um problema de caráter interno, uma vez que os impactos gerados por esta se refletem em estoque

produzido. O Quadro 4 resume os valores atribuídos aos parâmetros de entrada utilizados no modelo de otimização.

Quadro 4 - Valores atribuídos aos parâmetros de entrada

Parâmetro	Valor atribuído
B_t	80 horas/dia
P_{1t}	224 moldes/turno
P_{2t}	224 moldes/turno
S_t	12.780 kg/dia
v	7 moldes/setup
α	1 unidade/dia
β	3 unidades/dia

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

4.2 VALIDAÇÃO DO MODELO

Para realizar a etapa de validação do modelo proposto, foi elaborada uma versão resumida dos dados de entrada considerando, como demanda, apenas dois *jobs*. A Figura 13 apresenta os dados das ordens de fabricação selecionadas para validação do modelo.

Figura 13 - Dados das ordens de fabricação utilizadas para validação do modelo

CÓD. DO ITEM	Nº OFA (j)	PEND. EM PÇS	PRAZO (D_j)	PEND. METAL LÍQUIDO (s_j)	PEND. MOLDES (p_j)	PEND. MACHARIA (b_j)	$Lj1$	$Lj2$
B31.2000ET	1	6720	08/09/2020	2.226	329	0,00	0	1
B50.58C	2	189	08/09/2020	3.276	156	18,59	0	1

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Os valores utilizados como parâmetros de entrada do modelo, conforme o Quadro 4, foram inseridos no *solver*, e, após acionada a ferramenta de resolução, foram gerados os dados representados no Quadro 5.

Quadro 5 - Valores resultantes após resolução do modelo

(continua)

$e_1 = 1$	$\gamma_{11} = 448$	$\sum_{j=1}^2 (x_{j21} \times p_j) = 485$
$e_2 = 1$	$\gamma_{21} = 173$	
$h_1 = 0$	$C_1 = 61$	$\sum_{m=1}^2 \sum_{j=1}^2 (x_{jm1} \times b_j) = 19$
$h_2 = 0$	$F_1 = 5.148$	

(conclusão)

$x_{111} = 0$	$V_{11} = 0$	$\sum_{m=1}^2 \sum_{j=1}^2 (x_{jm1} \times s_j) = 5.502$
$x_{121} = 1$	$V_{21} = 2$	
$x_{211} = 0$	$\sum_{j=1}^2 (x_{j11} \times p_j) = 0$	$U = \sum_{j=1}^2 (1 \times 1 + 3 \times 0) + (1 \times 1 + 3 \times 0) = 2$
$x_{221} = 1$		

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Como foram inseridos dados de apenas dois *jobs* e não há soma de metal líquido suficiente para atender à meta padrão de produção diária ($S_t = 10.650$ kg/dia), nem todas as restrições do modelo foram atendidas. Para possibilitar a solução do modelo de validação, portanto, o valor do parâmetro S_t foi substituído por 1 kg/dia. As restrições, bem como os respectivos valores numéricos e condição de atendimento, considerando o valor substituído para S_t , são descritas na Tabela 1. As restrições (15) a (20), que delimitam o domínio das variáveis, não estão listadas, mas todas foram atendidas conforme indicado pelo modelo. Para as máquinas 1 e 2, foi considerado que operam em 2 e 3 turnos, respectivamente.

Tabela 1 - Condição de atendimento das restrições do modelo

Restrição	Valores numéricos	Condição
$\sum_{j=1}^2 (x_{j11} \times p_j) \leq P_{11} + \gamma_{10} - (v \times V_{11})$	$0 \leq 448 + 0 - 0$	Atende
$\sum_{j=1}^2 (x_{j21} \times p_j) \leq P_{21} + \gamma_{20} - (v \times V_{21})$	$485 \leq 672 + 0 - 14$	Atende
$\sum_{m=1}^2 \sum_{j=1}^2 (x_{jm1} \times b_j) \leq B_1 + C_0$	$19 \leq 80 + 0$	Atende
$\sum_{m=1}^2 \sum_{j=1}^2 (x_{jm1} \times s_j) \geq S_1 - F_0$	$5.502 \geq 1 - 0$	Atende
$\sum_{t=1}^T x_{11t} \geq L_{11}$	$0 \geq 0$	Atende
$\sum_{t=1}^T x_{12t} \geq L_{12}$	$1 \geq 1$	Atende

(continua)

Restrição	Valores numéricos	Condição
		(conclusão)
$\sum_{t=1}^T x_{12t} \geq L_{12}$	$1 \geq 1$	Atende

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

4.3 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Nesta seção, são descritos os cenários de teste analisados, hipotéticos e reais, e apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação do modelo matemático proposto.

4.3.1 Cenários de teste

Tendo em vista a utilização do modelo proposto para sequenciar ordens de fabricação existentes, foram criados diferentes cenários, reais e hipotéticos, que simulam capacidades e demandas aplicáveis à realidade da empresa. Para todos os cenários criados, os valores de demanda e capacidade de produção considerados correspondem ao período entre as datas de 07 de setembro e 11 de setembro de 2020. Na sequência, encontra-se a descrição de cada cenário estudado:

- a) cenário A: apresenta demandas e capacidades reais da empresa no período, considera que a máquina $m = 1$ possui operadores em três turnos de trabalho enquanto a máquina $m = 2$ possui operadores em apenas dois turnos de trabalho, sendo o modelo matemático proposto empregado para realizar o sequenciamento da produção;
- b) cenário B: apresenta demandas e capacidades reais da empresa no período, considera que a máquina $m = 1$ possui operadores em apenas dois turnos de trabalho enquanto a máquina $m = 2$ possui operadores em três turnos de trabalho, sendo empregado o modelo matemático proposto para realizar o sequenciamento da produção;
- c) cenário C: simula a redução de 20% das demandas e 20% da capacidade real de moldagem da empresa para o período, sendo o modelo matemático proposto empregado para realizar o sequenciamento da produção;

- d) cenário D: simula o aumento de 20% da demanda e 20% da capacidade real de moldagem da empresa para o período, tendo sido empregado o modelo matemático proposto para realizar o sequenciamento da produção;
- e) cenário E: simula o aumento de 10% da demanda e mantém a capacidade real de moldagem da empresa para o período, tendo sido empregado o modelo matemático proposto para realizar o sequenciamento de produção;
- f) cenário F: apresenta a demanda e a capacidade de moldagem reais, mas somente 50% da capacidade do setor de macharia no período, tendo sido empregado o modelo matemático proposto para realizar o sequenciamento da produção;
- g) cenário G: apresenta as demandas e capacidades reais da empresa no período, considera que a máquina $m = 1$ possui operadores em apenas dois turnos de trabalho enquanto a máquina $m = 2$ possui operadores em três turnos de trabalho, sendo o sequenciamento é realizado com o método atualmente empregado pela empresa, ou seja, baseado na experiência do programador de produção e sem a aplicação de modelos matemáticos.

A Tabela 2 apresenta os parâmetros de entrada referentes às capacidades e demandas utilizados em cada um dos cenários estudados. Os valores utilizados para os parâmetros v , α e β são os mesmos já descritos no Quadro 4.

Tabela 2 - Parâmetros de entrada utilizados em cada cenário estudado

Cenário	P_{1t}	P_{2t}	B_t	S_t
A	672	448	80	12.780
B	448	672	80	12.780
C	448	448	80	10.224
D	672	672	80	15.336
E	448	672	80	14.058
F	448	672	40	12.780
G	448	672	80	12.780

Obs.: Em cada cenário, foram utilizados os mesmos valores para todos os valores de t .
 Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

4.3.2 Resultados dos cenários

Os cenários hipotéticos descritos na subseção anterior permitem testar e avaliar o comportamento do modelo matemático quando há redução ou aumento de demanda,

acompanhadas do incremento ou diminuição da capacidade, situações comumente impostas pelas características de sazonalidade do mercado, em que a empresa atua. Além disso, a realização do sequenciamento da produção em cenários reais, comparando os resultados obtidos pelo emprego do modelo matemático e pelo método atualmente utilizado pela empresa, permite analisar possíveis ganhos advindos da utilização do modelo proposto. A Tabela 3 apresenta o custo total (alvo da otimização do modelo) e o número de ordens de fabricação entregues com atraso e adiantamento em cada cenário estudado.

Tabela 3 - Resultados obtidos para cada cenário estudado

Cenário	Custo total (<i>U</i>)	Ordens com atraso	Ordens com adiantamento
A	40	3	6
B	40	3	5
C	42	4	2
D	64	3	12
E	52	3	10
F	73	5	7
G	77	5	18

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Os cenários A e B, que possuem como diferença única a máquina em que o operador do turno não completo está alocado, apresentaram o mesmo valor para a medida alvo da otimização. No entanto, o cenário B apresentou menor número de ordens processadas com adiantamento, indicando que, se esse fosse um critério significativo, esse cenário deveria ser indicado como o melhor resultado.

O cenário C, embora simule uma situação hipotética, apresenta valores muito próximos aos cenários reais A e B. Já o cenário D apresentou um importante aumento no valor da medida alvo da otimização. Isso ocorreu porque as ordens de fabricação programadas para o período não conseguiram preencher a capacidade disponível e, para atender a meta estabelecida, o modelo antecipou ordens de fabricação da semana seguinte.

Para o cenário E, houve um aumento moderado no valor da medida alvo da otimização em relação aos cenários A e B, que possuem as mesmas capacidades nos setores de moldagem e macharia. Embora tenha aumentado a quantidade de ordens entregues com adiantamento, a quantidade de ordens entregues com atraso foi a mesma dos cenários citados. A análise desse tipo de situação simulada pelo cenário E é importante para verificar o impacto nos prazos de

entrega quando há a ocorrência de aumentos repentinos de demanda sem que haja tempo hábil para a empresa preparar sua estrutura para atender esse aumento.

O cenário F apresentou aumento das ordens entregues com atraso e adiantamento em comparação com os cenários A e B, que possuem a mesma capacidade de moldagem. Isso ocorreu porque a diminuição da disponibilidade do setor de macharia (condição que acontece em decorrência de afastamentos de funcionários por licenças médicas, férias ou faltas) limitou o processamento das ordens de fabricação de itens com macho e, para compensar essa situação, foram utilizadas ordens de fabricação de itens sem macho que estavam com datas de entrega mais a frente para atender a meta de produção.

O cenário G, que representa o método atual utilizado para sequenciar a produção na empresa, teve como resultado o pior valor para a medida alvo da otimização e o maior número de ordens de fabricação entregues com adiantamento, além de possuir mais entregas com atraso em relação aos cenários A e B. Essa diferença significativa entre os resultados do cenário que retrata o método atualmente empregado na empresa e os que utilizam o modelo matemático, aponta que há margem para melhorias na forma como a empresa realiza seu sequenciamento. O alto número de ordens entregues com adiantamento pode indicar que, pela falta de uma metodologia científica para testar diferentes possibilidades de sequenciamento, ordens que estão programadas mais a frente são antecipadas, garantindo que a meta de produção diária seja atendida. Essa prática, embora não afete os clientes diretamente, pode ser prejudicial para a empresa uma vez que provoca um aumento nos estoques intermediários e no tempo em que o produto aguarda para receber acabamento.

5 CONCLUSÃO

Em um cenário de forte concorrência entre as empresas, a constante busca por melhorias torna-se essencial para que elas consigam se manter ativas no mercado. Entre os aspectos alvos dessas melhorias, estão o atendimento aos prazos de entrega (que fortalece a credibilidade da organização) e a redução dos custos oriundos do gerenciamento de estoques e ociosidades na produção.

Modelos matemáticos possuem relevância dentro das indústrias, pois são soluções viáveis financeiramente, ágeis e versáteis e que possibilitam otimizar métricas operacionais da organização favorecendo sua posição no mercado. Além disso, os modelos matemáticos podem ser desenvolvidos e aplicados, em alguns casos, sem a necessidade de recursos tecnológicos avançados que se dissociem da realidade de muitas empresas.

A busca por uma alternativa que utilize métodos matemáticos e favoreça a empresa estudada a manter um padrão de atendimento, conforme o mercado exige, serviu de motivação para este trabalho, que possuiu como objetivo principal a construção de um modelo matemático para otimizar o sequenciamento das ordens de fabricação do setor de moldagem (considerado o norteador na programação do processo produtivo) de uma empresa de fundição. Para possibilitar a construção do modelo matemático, foram seguidas etapas que compreenderam uma pesquisa na bibliografia existente sobre esse tema e a coleta de dados na empresa onde foi aplicado o estudo.

Com o modelo construído, foram criados cenários reais e hipotéticos que serviram para avaliar o comportamento do modelo frente a situações aplicáveis na prática. Os resultados obtidos com esses experimentos sugerem que o modelo desenvolvido consegue atingir seu propósito, mesmo com aumento ou redução de demandas e capacidades (situações que ocorrem na empresa durante o ano).

A comparação dos resultados obtidos pelo emprego do modelo desenvolvido e aqueles gerados pelo método atualmente empregado pela empresa, aplicados à mesma situação, mostra que a técnica proposta apresentou significativa melhora para a medida alvo da otimização (custo total), reduzindo a quantidade de ordens de fabricação entregues com atraso e também as que são entregues com adiantamento. Portanto, o modelo matemático proposto mostra-se uma alternativa viável para otimizar o sequenciamento de produção, com desempenho superior à atual técnica utilizada pela empresa.

Além de oferecer resultados melhores dos atualmente alcançados pela empresa, o modelo proposto possibilita que sejam feitas análises mais profundas no momento do

sequenciamento da produção. Por meio dele, é possível simular variações de demandas e capacidades para verificar quais os impactos gerados nos prazos de entrega decorrentes dessas alterações, permitindo que se verifique, com antecedência, se ações precisam ser tomadas para evitar atrasos de entrega.

A partir da qualidade observada nos resultados dos cenários avaliados, recomenda-se à empresa estudada que considere a possibilidade de substituir o método atualmente utilizado para realizar o sequenciamento da produção pelo modelo matemático proposto neste trabalho. Para que essa transição seja possível, a empresa deve obter a extensão Open Solver (utilizada para executar os cálculos de otimização) e adaptar as planilhas eletrônicas (que contêm os parâmetros de entrada e os resultados da otimização) conforme sua necessidade.

Para trabalhos futuros, sugere-se i) a inclusão do setor de acabamento como uma restrição adicional no modelo matemático, para que o exercício de redução do estoque em processo seja ainda mais eficiente; ii) incluir no modelo uma condição que determina a quantidade de máquinas a serem operadas em cada turno de trabalho, para que o resultado ótimo seja gerado sem a necessidade de definir esse parâmetro de forma manual; e iii) avaliar os impactos financeiros provenientes da aplicação do modelo proposto na empresa estudada.

REFERÊNCIAS

ABIFA, Associação Brasileira de Fundição. **Produção de fundidos tem novo incremento em 2019**. 2020. Disponível em: <http://www.abifa.org.br/producao-de-fundidos-tem-novo-incremento-em-2019/>. Acesso em: 11 mar. 2020.

ALUMETAF. **Galeria**. Disponível em: < <https://www.alumetaf.com.br/galeria-alumetaf/>>. Acesso em: 20 mai. 2020.

AMIRI, Roya; SARDROUD, Javad Majrouhi; SOTO, Borja García de. BIM-based Applications of Metaheuristic Algorithms to Support the Decision-making Process: uses in the planning of construction site layout.: Uses in the Planning of Construction Site Layout. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 196, p. 558-564, 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.030>.

ARAUJO, Silvio Alexandre de. **Modelos e métodos para o planejamento e programação da produção aplicados no setor de fundições**. 2003. 125 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências de Computação e Matemática Computacional, Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

ARENALES, Marcos et al. **Pesquisa operacional: para cursos de engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

BALDAM, Roquemar de Lima; VIEIRA, Estéfano Aparecido. **Fundição: processos e tecnologias correlatas**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2014.

BASSO, Franco; VARAS, Mauricio. A MIP formulation and a heuristic solution approach for the bottling scheduling problem in the wine industry. **Computers & Industrial Engineering**, Santiago, v. 105, p.136-145, mar. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2016.12.029>.

BEELEY, Peter. **Foundry technology**. 2. ed. Woburn: Butterworth-heinemann, 2001.

BERGAMINI, Fernanda Paula. **Dimensionamento e sequenciamento de lotes no segmento de eletrodomésticos de linha branca**. 2019. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

BUSTAMANTE, Leandro de Moraes. **Minimização do custo de antecipação e atraso para o problema de sequenciamento de uma máquina com tempo de preparação dependente da sequência: aplicação em uma usina siderúrgica**. 2006. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

CAMARGO, Victor Claudio Bento de. **Um algoritmo evolutivo para o problema de dimensionamento de lotes em fundições de mercado**. 2009. 57 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência da Computação, Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

CORRÊA, Luiz Henrique; GIANESI Nogueira, Irineu Gustavo; CAON, Mauro. **Planejamento, programação e controle da produção**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2018.

GOLDBARG, Marco Cesar. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.

GOMES JÚNIOR, Aloísio de Castro. **Problema de Sequenciamento em uma Máquina com Penalidades por Antecipação e Atraso: Modelagem e Resolução**. 2007. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

GRAHAM, R.L. et al. Optimization and Approximation in Deterministic Sequencing and Scheduling: a Survey. **Annals of Discrete Mathematics**, v. 5, p. 287-326, 1979.

GRUPO MSP. **Máquinas sopradoras de moldes**. Disponível em: <<http://grupomsp.ind.br/produto/maquinas-sopradoras-de-machos-moldes>>. Acesso em: 20 mai. 2020.

HILLIER, Frederick S.; LIEBERMAN, Gerald J.. **Introduction to operations research**. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 2001.

JALALIAN, Mohammad M; DEFERSHA, Fantahun M.. A Genetic Algorithm for Scheduling a Semi-Continuous Process Industry: A Case Study. **Ifac-papersonline**, Ontário, v. 52, n. 13, p.1849-1853, 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.471>.

LACHTERMACHER, Gerson. **Pesquisa operacional na tomada de decisões**. 5. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2018.

LANDMANN, Raul et al. Programação da produção em empresas metalúrgicas com utilização de algoritmo genético. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 26., 2006, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza: Associação Brasileira de Engenharia de Produção, 2006.

LAGE JÚNIOR, Murís. **Planejamento e controle da produção: teoria e prática**. Rio de Janeiro: Ltc, 2019.

LONGARAY, André Andrade. **Introdução à pesquisa operacional**. São Paulo: Saraiva, 2013.

LOZADA, Gisele; NUNES, Karina da Silva. **Metodologia científica**. Porto Alegre: Sagah, 2018.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Técnicas de pesquisa**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2018.

MARINS, Fernando Augusto Silva. **Introdução à pesquisa operacional**. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2011.

MARTINS, Alyne Toscano. **Problema da programação da produção de bebidas à base de frutas**: modelos de otimização e métodos heurísticos. 2017. 260 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Produção, Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017.

MIGUEL, Paulo Augusto Cauchick. Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. **Production**, São Paulo, v. 17, n. 1, p.216-229, abr. 2007. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-65132007000100015>.

MODERN CASTING. Schaumburg: American Foundry Society, v. 109, 2019. Mensal.

MOREIRA, Daniel Augusto. **Pesquisa operacional**: curso introdutório. 2. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2017.

NASCIMENTO, Francisco Paulo do; SOUSA, Flávio Luís Leite. **Metodologia da pesquisa científica**: teoria e prática. Brasília: Thesaurus, 2016.

NONÅS, Sigrid Lise; OLSEN, Kai A.. Optimal and heuristic solutions for a scheduling problem arising in a foundry. **Computers & Operations Research**, [s.l.], v. 32, n. 9, p. 2351-2382, set. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2004.03.007>.

OPEN SOLVER. **About Open Solver**. Disponível em: < <https://opensolver.org/>>. Acesso em: 05 set. 2020.

PGM SHELL. **Produtos**. Disponível em:< <http://pgmshell.com.br/site>>. Acesso em: 20 mai. 2020.

PINEDO, Michael L.. **Planning and scheduling in manufacturing and services**. 2. ed. New York: Springer, 2009.

PINEDO, Michael L.. **Scheduling**: theory, algorithms, and systems. 4. ed. New York: Springer, 2012.

RAVETTI, Martín Gómez. **Problemas de sequenciamento com máquinas paralelas e tempos de preparação dependentes da sequência**. 2003. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência da Computação, Departamento de Ciência da Computação do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal de Minas Gerais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

ROCHA, Amanda Thaís. **Aplicação de uma heurística no sequenciamento de produção de uma indústria de peças de aço**. 2017. 48 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

SILVA, Mariana Klippel Albuquerque et al. Um estudo de caso em uma indústria química para o problema do sequenciamento da produção com tempos de *setup* assimétricos e dependentes da sequência. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 39., 2019, Santos. **Anais [...]**. Santos: Associação Brasileira de Engenharia de Produção, 2019.

SLACK, Nigel; BRANDON-JONES, Alistair; JOHNSTON, Robert. **Administração da produção**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2018.

SOBRAPO, Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional. **O que é pesquisa operacional**. 2020. Disponível em: <https://www.sobrapo.org.br/o-que-e-pesquisa-operacional>. Acesso em: 10 abr. 2020.

SORDI, José Osvaldo de. **Desenvolvimento de projeto de pesquisa**. São Paulo: Saraiva, 2017.

TUBINO, Dalvio Ferrari. **Planejamento e controle da produção: teoria e prática**. 3. ed. São Paulo, SP: Atlas, 2017.

VIRGILLITO, Salvatore Benito. **Pesquisa Operacional: métodos de modelagem quantitativa para a tomada de decisões**. São Paulo: Saraiva Educação, 2018.

APÊNDICE A – Processo de fundição de peças

