

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

MARIANA KLIPPEL ALBUQUERQUE SILVA

**OTIMIZAÇÃO DO PROBLEMA DE SEQUENCIAMENTO DA
PRODUÇÃO EM UMA INDÚSTRIA QUÍMICA COM TEMPOS DE
SETUP ASSIMÉTRICOS E DEPENDENTES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2018

MARIANA KLIPPEL ALBUQUERQUE SILVA

**OTIMIZAÇÃO DO PROBLEMA DE SEQUENCIAMENTO DA
PRODUÇÃO EM UMA INDÚSTRIA QUÍMICA COM TEMPOS DE
SETUP ASSIMÉTRICOS E DEPENDENTES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção, do Departamento Acadêmico de Engenharia de Produção, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Fábio José Ceron Branco

PONTA GROSSA

2018

	<p style="text-align: center;">Ministério da Educação UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ CÂMPUS PONTA GROSSA Departamento Acadêmico de Engenharia de Produção</p>	
---	---	---

TERMO DE APROVAÇÃO DE TCC

OTIMIZAÇÃO DO PROBLEMA DE SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO EM UMA
INDÚSTRIA QUÍMICA COM TEMPOS DE *SETUP* ASSIMÉTRICOS E
DEPENDENTES

por

MARIANA KLIPPEL ALBUQUERQUE SILVA

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado em 23 de novembro de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Fábio José Ceron Branco

Prof. Orientador

Prof. Ma. Ana Maria Bueno

Membro titular

Prof. Dr. Juan Carlos Claros Garcia

Membro titular

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso”.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por mais essa conquista e por todas as oportunidades em minha vida.

Aos meus pais Samuel Albuquerque Silva e Ana Maria Klippel pela educação e base do que eu sou hoje.

Ao meu namorado Ricieri Augusto Mendes Fontanini e sua família, que sempre estiveram ao meu lado.

Ao professor orientador Fábio José Ceron Branco pela oportunidade, partilha dos conhecimentos e auxílio para o desenvolvimento desse trabalho.

A minha família e aos meus amigos pelos momentos de ausência.

A todos que colaboraram direta ou indiretamente para a realização desse trabalho.

RESUMO

SILVA, Mariana Klippel Albuquerque. **Otimização do problema de sequenciamento da produção em uma indústria química com tempos de *setup* assimétricos e dependentes.** 2018. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018.

O presente trabalho teve como propósito otimizar o sequenciamento da produção em uma indústria química por meio de um modelo de programação matemática, visando minimizar a soma dos tempos de *setup*. Para isso, foram consideradas as seguintes características: ambiente *flow shop*, máquinas paralelas distintas e tempos de *setup* assimétricos e dependentes da sequência. Foi caracterizado como *setup* o tempo necessário para realizar a limpeza entre a produção dos lotes. O ferramental resultante fez uso do aplicativo *Solver* do *Microsoft Office Excel* 2013. O sequenciamento da produção obtido por meio da simulação apresentou uma redução de 37% do total das horas de *setup* para o período entre os meses de janeiro a junho de 2018.

Palavras-chave: Otimização. *Scheduling*. *Flow Shop*. *Setup* Dependente. *Setup* Assimétrico.

ABSTRACT

SILVA, Mariana Klippel Albuquerque. **Optimization of the production sequencing problem in a chemical industry with asymmetric and dependent setup times.** 2018. 57 p. Work of Conclusion Course (Graduation in Production Engineering) - Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2018.

The purpose of the present work was to optimize the sequencing of production in a chemical industry by means of a mathematical programming model, in order to minimize the sum of setup times. For this, the following characteristics were considered: flow shop environment, distinct parallel machines and asymmetric and sequence dependent setup times. It was characterized as setup the time necessary to carry out the cleaning between the production of lots. The resulting tooling made use of the Microsoft Office Excel 2013 Solver application. The production sequencing obtained through the simulation showed a 37% reduction in the total setup time for the period from January to June 2018.

Keywords: Optimization. Scheduling. Flow Shop. Dependent Setup. Asymmetric Setup.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Equilíbrio entre as atividades de planejamento e controle	16
Figura 2 - Decisões quanto à programação do chão de fábrica	17
Figura 3 - Gráfico de Gantt.....	19
Figura 4 - Exemplo de uma função convexa, côncava e nem convexa e nem côncava	24
Figura 5 - Relação: classes de problemas de programação de tarefas em máquinas	27
Figura 6 - Impacto da assimetria e da dependência da sequência	31
Figura 7 - <i>Setup</i> antecipado	31
Figura 8 - Comparação histórico x proposto para o mês de abril	46
Gráfico 1 – Resultado produtos compatíveis.....	43
Gráfico 2 - Resultado produtos parcialmente compatíveis	44
Gráfico 3 – Resultado produtos incompatíveis	44
Quadro 1 - Matriz de limpeza utilizada entre os lotes.....	39
Quadro 2 - Matriz de limpeza com <i>setup</i>	40
Quadro 3 - Resultado sequenciamento por máquina	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Matriz de tempos de <i>setup</i>	30
Tabela 2 - Restrição produto/máquina e tempos de processamento	37
Tabela 3 - Demanda janeiro a junho 2018	38
Tabela 4 - Tempo disponível.....	42
Tabela 5 - Porcentagem redução tempo de <i>setup</i>	45

LISTA DE SIGLAS

ASDST	<i>Asymmetric Sequence Dependent Setup Times</i>
CRP	<i>Capacity Requirements Planning</i>
FIFO	<i>First In First Out</i>
FSDGS	<i>Flowshop Sequence Dependent Group Scheduling</i>
LIFO	<i>Last In First Out</i>
MRP	<i>Material Requirements Planning</i>
PCP	Planejamento e Controle da Produção
PI	Programação Inteira
PIM	Programação Inteira Mista
PL	Programação Linear
PLIMB	Programação Linear Inteira Mista Binária
PMP	Plano Mestre de Produção
PNL	Programação Não Linear
PO	Pesquisa Operacional
SSM	<i>Soft System Methodology</i>
TSP	<i>Traveling Salesman Problem</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 PROBLEMA	11
1.2 JUSTIFICATIVA	11
1.3 OBJETIVOS	12
1.3.1 Objetivo Geral	12
1.3.2 Objetivos Específicos	12
1.4 DELIMITAÇÃO DO TEMA	13
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO	15
2.2 PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO	17
2.3 PESQUISA OPERACIONAL	20
2.3.1 Programação Linear	22
2.3.2 Programação Não Linear	22
2.3.3 Programação Inteira	24
2.4 <i>SCHEDULING</i>	25
2.5 CARACTERÍSTICAS E RESTRIÇÕES OPERACIONAIS	28
2.5.1 Ambiente <i>Flow Shop</i>	28
2.5.2 Máquinas Paralelas e Elegibilidade da Máquina	28
2.5.3 <i>Setup</i> Assimétrico, Antecipado e Dependente da Sequência	29
3 METODOLOGIA	32
3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	32
3.1.1 Quanto à Natureza	32
3.1.2 Quanto à Abordagem	33
3.1.3 Quanto aos Objetivos	33
3.1.4 Quanto aos Procedimentos Técnicos	33
3.2 PROCEDIMENTOS DA PESQUISA	34
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1 MODELAGEM MATEMÁTICA	37
4.2 RESULTADOS	42
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
REFERÊNCIAS	49
APÊNDICE A - Histórico do sequenciamento	55

1 INTRODUÇÃO

A concorrência entre as empresas tem demandado técnicas cada vez mais aprimoradas para gerenciar as atividades de produção. Nesse cenário, conceitos como flexibilidade, qualidade e confiabilidade são fundamentais para que o sistema produtivo possa satisfazer as necessidades dos clientes (FERNANDES; GODINHO FILHO, 2010).

O tempo de *setup* influencia diretamente a eficiência do sistema, pois constitui parte do tempo de fluxo que afeta diretamente a taxa de saída do sistema de produção. Melhorias no atendimento à demanda podem ser alcançadas ao considerar os tempos de *setup* separados aos tempos de processamento (BARROS; MOCCELLIN, 2004). Dessa forma, percebe-se a importância em analisar os tempos de *setup*, visto que esses possuem um custo relevante, incluindo os custos de máquinas ociosas e de mão de obra especializada.

Conforme salientam Martins e Laugeni (2005), as atividades necessárias para atender aos objetivos de curto, médio e longo prazo se correlacionam, muitas vezes, de forma complexa. Diante desse contexto, a atividade de programação da produção desempenha um importante papel no auxílio ao cumprimento dos objetivos estratégicos da empresa.

À medida que aumentam a especialização e a complexidade em uma organização, torna-se cada vez mais difícil alocar, de maneira eficiente, os diversos recursos disponíveis para as inúmeras atividades (HILLIER; LIEBERMAN, 2013). Isso ocorre devido às inúmeras variáveis que influenciam os objetivos de desempenho do sistema de produção. Para solucionar esse problema, foi desenvolvida a Pesquisa Operacional.

Diante do exposto, este trabalho apresenta um modelo de Programação Linear para o problema de programação da produção (*scheduling*) em ambiente *flow shop* com máquinas paralelas distintas e com tempos de *setup* assimétricos e dependentes da sequência - *Asymmetric Sequence Dependent Setup Times* – (ASDST), visando minimizar a soma dos tempos de *setup*.

O estudo foi aplicado em uma indústria química no Estado do Paraná. Para isso, foram analisados os tempos de processamento e de *setup* dos produtos, de acordo com a demanda do período que compreende os meses de janeiro a junho de 2018, resultando numa proposta de sequenciamento com objetivo de aumentar a

eficiência operacional da empresa por meio da redução da soma dos tempos de preparação (limpeza) dos equipamentos.

1.1 PROBLEMA

Qual o melhor sequenciamento da produção a ser utilizado em um ambiente *flow shop* com máquinas paralelas distintas, para minimizar a soma dos tempos de *setup* assimétricos e dependentes da sequência?

1.2 JUSTIFICATIVA

Devido à diversidade das demandas e à sua complexidade, as indústrias têm que produzir pequenos lotes e com ampla variedade, com o objetivo de tornar a produção mais flexível. Porém, tal situação acarreta a necessidade de um elevado número de *setups* ao longo da produção. Logo, para esses tipos de manufatura, a aplicação de uma programação apropriada é fundamental (NAVAEI et al., 2014).

A maioria dos problemas de programação da produção desconsideram os tempos de *setup* das máquinas ou os consideram como parte do tempo de processamento. Dessa forma, o problema se torna mais simples, porém, essa situação não retrata a realidade (EBRAHIMINY; FATEMI GHOMI; KARIMI, 2013).

Muitos problemas reais ocorrem nos ambientes em que o tempo de *setup* depende da sequência, como por exemplo: na indústria de impressão, onde a limpeza da máquina depende tanto da cor das ordens atuais quanto das ordens a serem processadas; na indústria têxtil, na qual o *setup* para as operações de tecelagem e tingimento depende da sequência das atividades, e; na indústria de recipientes e garrafas, onde as configurações mudam dependendo dos tamanhos e formas dos recipientes (VANCHIPURA; SRIDHARAN; SUBASH BABU, 2014).

São inúmeros os benefícios alcançados com a redução dos tempos de *setup*: é possível fazer pequenos lotes de produtos; aumentar a taxa de giro do capital, por meio da maximização do tempo produtivo; utilizar a planta de maneira mais eficiente,

em virtude dos estoques menores, e; aumentar a produtividade a partir da eliminação das operações que não agregam valor (MOREIRA, 2008).

Em relação ao ambiente de produção, o problema clássico de sequenciamento de tarefas em um ambiente *flow shop* tem sido amplamente estudado nos últimos 50 anos. Porém, devido à sua complexidade, a busca de métodos cada vez mais eficazes permanece como objeto de pesquisa (NAGANO; MOCCELLIN; LORENA, 2005).

A partir do exposto, este problema considera as características de dependência e assimetria dos tempos de *setup* em um ambiente de produção *flow shop*. Vale ressaltar que tais considerações são necessárias pois resultam em uma variação do tempo total de *setup* e, por consequência, alteram o valor do tempo total de fluxo (FUCHIGAMI, 2005), o que resulta em uma resposta rápida à demanda e a redução das matérias-primas em processamento (BAKER 1974).

1.3 OBJETIVOS

Tendo como base a problemática estabelecida, são apresentados a seguir o objetivo geral e os objetivos específicos do estudo.

1.3.1 Objetivo Geral

Otimizar o sequenciamento da produção em uma indústria química por meio de um modelo de programação matemática, considerando um ambiente *flow shop* com máquinas paralelas distintas e com tempos de *setup* assimétricos e dependentes da sequência, visando minimizar a soma dos tempos de *setup*.

1.3.2 Objetivos Específicos

Com o intuito de atingir o objetivo geral da pesquisa, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Formular o problema a partir do levantamento das informações: produtos e suas características, dados históricos, restrições tecnológicas e medida de desempenho a ser otimizada;
- b) Desenvolver um modelo de programação matemática para otimizar o sequenciamento da produção;
- c) Simular o modelo por meio do *Software Solver (Excel)*;
- d) Validar o modelo a partir do ajuste aos dados empíricos (medições reais do sistema a ser modelado);
- e) Reformular o modelo para garantir a validade da solução adotada, caso ocorram mudanças nos parâmetros previamente estabelecidos;
- f) Comparar a solução encontrada e analisar os resultados a partir do confronto do resultado obtido com os dados históricos.

1.4 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Esta pesquisa estará sujeita às seguintes limitações:

- a) Será considerado apenas o ambiente *flow shop* com máquinas paralelas e com tempos de *setup* assimétricos e dependentes da sequência;
- b) A otimização do tempo total de fluxo será exclusivamente abordada sob a ótica do sequenciamento das tarefas, não sendo consideradas eventuais melhorias, tais como troca de equipamentos, mudanças nos procedimentos e alterações nos produtos;
- c) Não será considerada a redução dos tempos de *setup* proveniente de melhorias no processo ou da externalização do *setup* (procedimento executado com o equipamento em movimento), visto que tal melhoria depende das características específicas de cada processo.

Os dados utilizados para a realização desta pesquisa foram coletados a partir da análise documental das quantidades produzidas (lotes), tempos de processamento e de *setup* da produção referente aos meses de janeiro a junho de 2018, em uma indústria química situada no Estado do Paraná.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é dividido em cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta uma breve introdução acerca do estudo, com a definição do problema, a justificativa para a sua realização, bem como os objetivos geral e específicos e as delimitações da pesquisa.

O segundo capítulo trata da fundamentação teórica necessária ao tema de estudo, em que são relatados os principais conceitos e os métodos que serão utilizados. O terceiro capítulo descreve a metodologia utilizada, que contém a classificação da pesquisa e os procedimentos realizados.

A descrição da experimentação computacional e a análise dos resultados obtidos será apresentada no quarto capítulo. Por fim, as conclusões da pesquisa e as recomendações para futuros trabalhos serão discutidas no quinto capítulo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são abordados os principais trabalhos da literatura já publicados sobre o tema. O mesmo apresenta-se subdivido em cinco partes: planejamento e controle da produção; programação da produção; pesquisa operacional; *scheduling* e características e restrições operacionais.

2.1 PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO

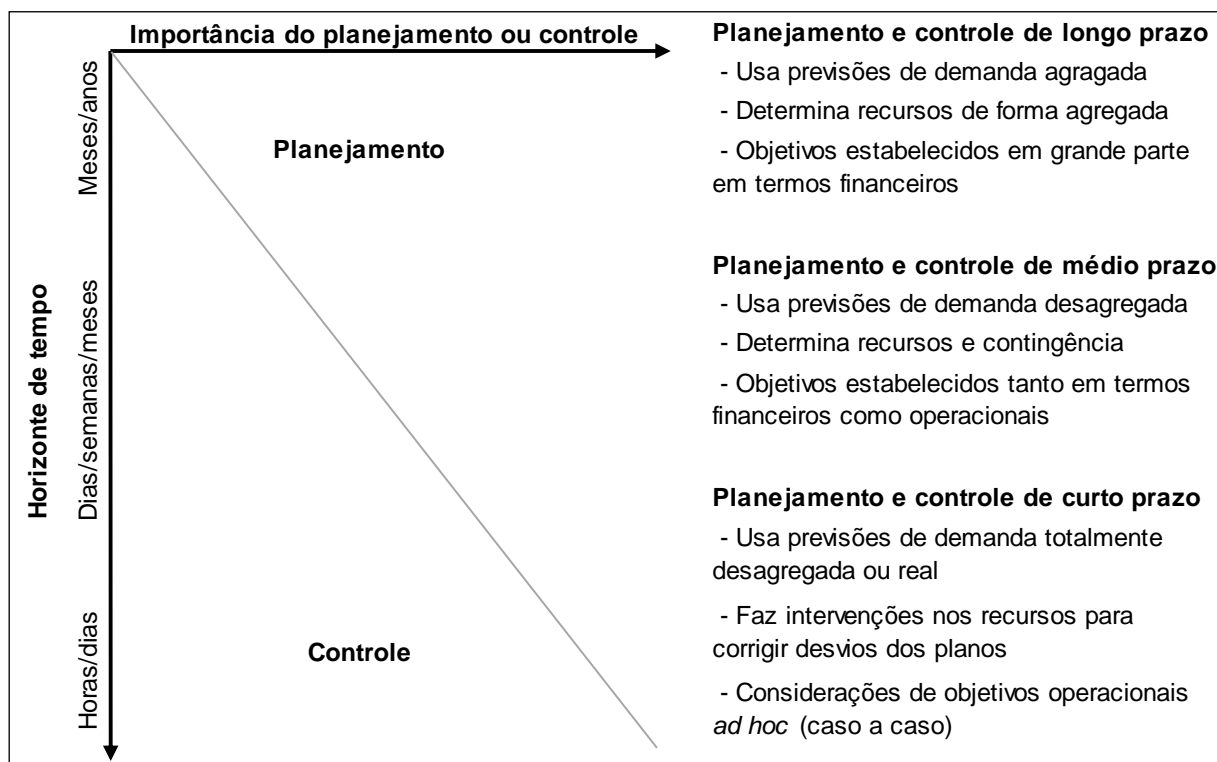
O Planejamento e Controle da Produção (PCP) “é responsável pela coordenação e aplicação dos recursos produtivos de forma a atender da melhor maneira possível aos planos estabelecidos em níveis estratégico, tático e operacional” (TUBINO, 2000, p. 23). Ou seja, o PCP é encarregado de coordenar os departamentos com o objetivo de atender continuamente a demanda dos consumidores (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2009). O PCP incorpora as demandas do mercado com as limitações internas (capacidade de produção e financeira) e auxilia nas tomadas de decisão da organização, como por exemplo, nas decisões quanto ao nível de atendimento ao cliente e quanto à redução de custos (LUSTOSA et al., 2008).

As principais atividades do PCP são: formulação do planejamento estratégico da produção, que compreende a definição das políticas estratégicas de longo prazo; desenvolvimento do Plano Mestre de Produção (PMP), que serve para balancear suprimento e demanda a médio prazo, e; programação da produção, por meio da administração dos estoques e liberação de ordens de compra, fabricação e montagem (TUBINO, 2000). Na prática, dependendo do tipo de operações necessárias, do grau de padronização e da natureza dos produtos, tem-se a necessidade de um PCP específico (RUSSOMANO, 2000). Além disso, a natureza do planejamento e controle também sofre mudanças ao longo do tempo.

No longo prazo são feitos planos relativos aos objetivos pretendidos, quais os recursos serão necessários e o que será feito para atingi-los, por meio das previsões de demanda. No médio prazo, o planejamento será mais detalhado, dando atenção aos diferentes tipos de demanda. No curto prazo, visto que grande parte dos recursos terão sido definidos, será difícil fazer importantes mudanças. Porém, tais intervenções

são possíveis se os planos não ocorrerem conforme planejado (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2009). A Figura 1 ilustra a variação da importância dos aspectos de planejamento e controle em relação a proximidade da data determinada.

Figura 1 - Equilíbrio entre as atividades de planejamento e controle



Fonte: Adaptado de Slack, Chambers e Johnston (2009)

Visto que o planejamento trata do plano, ou seja, da forma de alcançar um determinado objetivo no futuro, o controle compreende o processo de lidar com as variações que acontecem ao longo do tempo para garantir que o objetivo seja alcançado (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2009).

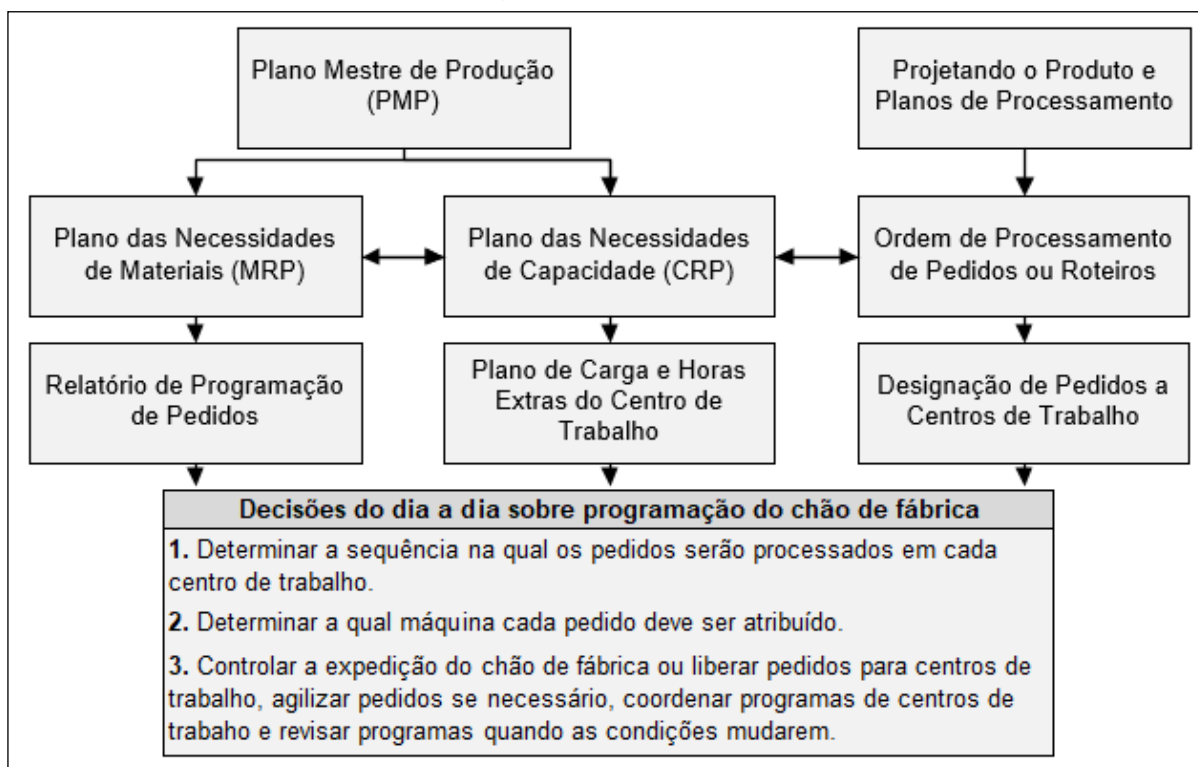
Controlar a produção significa garantir que as ordens de produção serão executadas na data certa e da maneira certa. Para isso, é necessário um sistema de informações que relate periodicamente sobre alguns aspectos, tais como: o estado atual de cada ordem de produção, o material em processo acumulado nos diversos centros de trabalho e as quantidades produzidas de cada produto (MOREIRA, 2008). Nesse contexto, a programação exerce uma função importante dentro do processo de gestão da produção.

2.2 PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO

A programação da produção determina a curto prazo quando e quanto comprar, fabricar ou montar de cada produto, baseada no PMP e nos registros de controle de estoque (TUBINO, 2000). Ou seja, a programação é uma conexão entre o planejamento e as fases de execução das operações.

As decisões quanto à programação iniciam-se com o relatório da programação de pedidos do sistema MRP (*Material Requirements Planning*). Com esse relatório, pode-se determinar quando serão liberados os pedidos de cada peça e, a partir do sistema CRP (*Capacity Requirements Planning*), pode-se definir qual centro de trabalho deverá executar o pedido. Com base nessas informações, os responsáveis poderão tomar as decisões diárias quanto à programação, ao determinar qual sequência os pedidos devem ser processados, atribuir pedidos às máquinas e tomar decisões quanto ao controle da produção (GAITHER; FRAZIER 2002). A Figura 2 ilustra o processo de tomada de decisão quanto à programação.

Figura 2 - Decisões quanto à programação do chão de fábrica



Fonte: Adaptado de Gaither e Frazier (2002)

Segundo Gigante (2010), os principais objetivos da programação da produção são:

- a) Entregar os produtos fabricados nas datas estabelecidas;
- b) Distribuir a carga de trabalho de forma a obter máxima utilização dos recursos;
- c) Garantir que toda a matéria-prima esteja disponível quando for solicitada pela fabricação;
- d) Prever e evitar grande concentração de trabalho em poucas máquinas;
- e) Prever a ociosidade da capacidade produtiva;
- f) Estabelecer sequências de produção que minimizem o tempo de equipamento sem trabalho.

A programação pode ser mensurada de acordo com as prioridades competitivas da organização, e pode incluir velocidade de entrega, operações de baixo custo, qualidade, variedade e flexibilidade (KRAJEWSKI; RITZMAN; MALHOTRA, 2009). Quanto maior o número de processos e de atividades, maior será o número de programas possíveis. Genericamente, para n trabalhos há $n!$ (n fatorial) formas diferentes de programar os trabalhos em um processo simples (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2009).

Em atividades industriais, o processo de programar a produção envolve duas etapas: carregamento (alocação de carga) e sequenciamento de tarefas (MOREIRA, 2008). O carregamento é a quantidade de trabalho destinada para um centro de trabalho. Esse pode ser classificado em carregamento infinito, quando considera os recursos como se fossem infinitos e; carregamento finito, quando considera que os recursos são finitos durante o processo de geração do programa (CORRÊA; CORRÊA, 2011).

O sequenciamento é a tomada de decisão sobre qual a ordem (sequência) em que as tarefas devem ser executadas em um dado recurso. As prioridades são normalmente estabelecidas por um conjunto predefinido de regras, como por exemplo: restrições físicas, prioridade ao consumidor, data de entrega, LIFO (*Last In First Out*) - Último a Entrar, Primeiro a Sair - e FIFO (*First In First Out*) - Primeiro a Entrar, Primeiro a Sair (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2009).

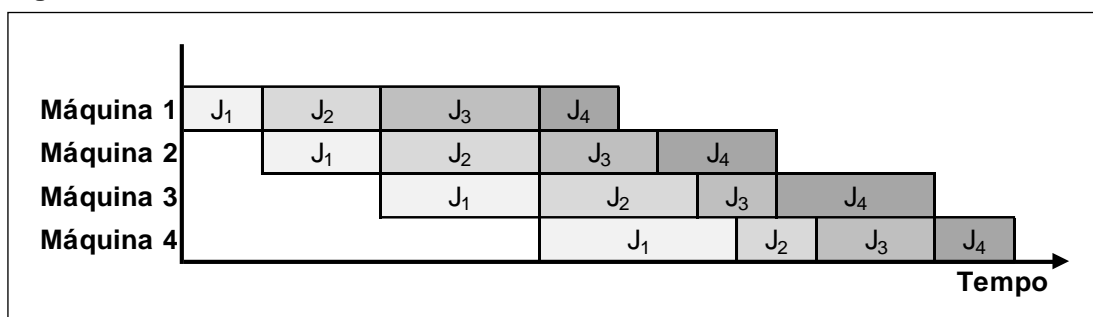
Essas regras levam em conta informações como (CORRÊA; CORRÊA, 2011):

- a) Tempo de processamento da ordem;
- b) Data prometida de entrega da ordem de produção;

- c) Momento de entrada da ordem na fábrica;
- d) Momento de entrada da ordem no centro de trabalho;
- e) Importância do cliente que solicitou a ordem;
- f) Tempo de operação restante.

Uma ferramenta amplamente utilizada na programação é o Gráfico de Gantt, que corresponde a uma representação análoga à de um cronograma. A utilização desse gráfico permite visualizar o problema e serve como um auxílio para monitorar o desenvolvimento do trabalho (KRAJEWSKI; RITZMAN; MALHOTRA, 2009). Basicamente, o gráfico exibe a alocação dos recursos ao longo do tempo, com os recursos representados ao longo do eixo vertical e a escala de tempo no eixo horizontal, como na Figura 3.

Figura 3 - Gráfico de Gantt



Fonte: Autoria própria

Geralmente, os recursos são chamados de máquinas e as tarefas são chamadas de trabalho (*jobs*). A tarefa compreende o objeto recebendo o serviço ou sendo fabricado. Às vezes, os trabalhos podem consistir em várias tarefas elementares, chamadas operações. O ambiente do problema é denominado *shop*. Essa nomenclatura se dá em virtude dos primeiros estudos sobre programação serem motivados por problemas que surgiram na manufatura. Portanto, era comum empregar o vocabulário de fabricação ao descrever problemas de programação (BAKER; TRIETSCH, 2009).

Vale ressaltar que esse gráfico não é uma ferramenta de otimização, ele apenas auxilia no desenvolvimento de programações alternativas (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2009).

2.3 PESQUISA OPERACIONAL

O campo da Pesquisa Operacional (PO) oferece um conjunto de modelos e métodos para solucionar diferentes problemas de programação da produção (LUSTOSA; et al., 2008). A Pesquisa Operacional caracteriza-se pelo uso de técnicas científicas quantitativas para determinar a melhor utilização dos recursos e para otimizar a programação das operações de uma empresa (ANDRADE, 2009). Ou seja, trata-se de um método científico utilizado na tomada de decisão.

As primeiras aplicações de PO foram iniciadas na Inglaterra, durante a Segunda Guerra Mundial, com o objetivo de encontrar a melhor forma de utilizar o material de guerra. A partir de então, as ideias propostas foram adaptadas para melhorar a produtividade e a eficiência no setor civil (TAHA, 2008).

O avanço da Pesquisa Operacional deve-se também ao desenvolvimento dos computadores digitais, em função da sua capacidade de armazenamento e recuperação de informações e da sua velocidade de processamento. Além disso, a difusão dos microcomputadores também contribuiu com esse avanço, tornando as unidades de processamento descentralizadas dentro das empresas (ANDRADE, 2009).

De acordo com Silva et al. (1998), um estudo em Pesquisa Operacional costuma envolver seis fases:

- 1) Formulação do problema: definição dos objetivos e dos possíveis caminhos para alcançá-los. Além do levantamento das restrições tecnológicas e definição da medida de desempenho a ser otimizada;
- 2) Construção do modelo do sistema: construção de um modelo matemático, incluindo a função objetivo e as funções que descrevem as restrições tecnológicas. As variáveis que constituem as equações são classificadas em dois tipos: variáveis controladas ou de decisão, sob controle do administrador, e; variáveis não controladas, que estão fora do controle do administrador e cujos valores são arbitrados;
- 3) Cálculo da solução através do modelo: feito por meio de técnicas matemáticas específicas;
- 4) Teste do modelo e da solução: realizado com dados empíricos do sistema. Poderá ocorrer uma reformulação ou até mesmo o abandono do modelo caso o desvio não seja aceitável;

- 5) Estabelecimento de controles da solução: reformulação do modelo ou cálculo de nova solução para garantir a validade da solução adotada, caso ocorram mudanças nos parâmetros previamente estabelecidos;
- 6) Implantação e acompanhamento: observação do comportamento do sistema com a solução adotada e possível ajuste, caso necessário.

Apesar dos modelos de PO serem efetuados para otimizar um objetivo específico, a qualidade da solução depende do quanto tal modelo retrata o sistema real. Um dos pressupostos mais comuns na literatura de planejamento da produção é que as máquinas estão continuamente disponíveis para seu uso. No entanto, essa suposição ignora as condições industriais reais, uma vez que uma máquina pode ser interrompida por vários motivos, como falhas e manutenções (RAMEZANIAN; SAIDI-MEHRABAD; FATTAHI, 2013).

Em contrapartida, quanto mais as restrições operacionais são consideradas, menor será a chance de encontrar uma solução ideal para os problemas (SABOUNI; LOGENDRAN, 2013). Dessa forma, pode-se definir duas classes de solução: viável, se satisfaz todas as restrições, e; ótima, quando a solução além de ser viável, resulta no melhor valor da função objetivo. Para resolver o problema, utiliza-se um método exato ou um método aproximado - heurístico (TAHA, 2008).

Nos casos mais complexos, em que pode ser gerada uma infinidade de combinações, determinar uma solução ótima em tempo computacional razoável pode ser muito difícil ou até mesmo impossível, nesse caso, as heurísticas auxiliam na resolução dos problemas (KAVEH; KHAYATAZAD; 2012). Um método heurístico pode ser definido como um procedimento de solução apoiado em parâmetros racionais ou computacionais para escolher um caminho, sem precisar atingir a melhor solução ou percorrer todas as possibilidades (FUCHIGAMI, 2005).

De acordo com os autores Nagano e Moccellini (2002), os métodos heurísticos podem ser classificados de acordo com duas categorias: construtivos ou melhorativos. O método construtivo gera uma solução parcial para o problema, com algum procedimento que atribui a cada tarefa um índice de prioridade para construir a sequência da solução. Já o método melhorativo começa a partir de uma determinada solução inicial e, posteriormente, busca-se por uma sequência melhor que a atual, geralmente por meio de um procedimento iterativo, como por exemplo, a troca de posições das tarefas na sequência.

A vantagem dos métodos heurísticos é a geração de soluções de alta qualidade em um tempo razoável para uso prático, porém, não há garantia de encontrar uma solução ótima global, visto que a solução ótima dos subproblemas independentes não corresponde em sua totalidade à solução ótima do problema original (TALBI, 2009).

2.3.1 Programação Linear

A Programação Linear (PL) é uma ferramenta importante para solucionar o problema de alocação de recursos limitados entre tarefas que competem entre si, bem como outros problemas com modelagem matemática similar. O adjetivo linear representa a premissa de que todas as funções matemáticas envolvidas nesse modelo devem ser funções lineares - funções do 1º grau (HILLIER; LIEBERMAN, 2013). Além disso, as variáveis de decisão devem ser todas contínuas, ou seja, devem assumir quaisquer valores em um intervalo de números reais (BELFIORE; FÁVERO, 2013).

Embora essa ferramenta já tivesse sido proposta anteriormente, o ano de 1947 foi um marco na área da Pesquisa Operacional com a publicação do método *simplex*, dando início à intensas pesquisas de novos métodos e aplicações em diferentes áreas, tais como transportes, telecomunicações, produção industrial, agricultura, finanças, entre outras (ARENALES et al., 2007).

Ainda que os problemas envolvendo a Programação Linear sejam utilizados nas mais variadas áreas, não são todos os problemas de alocação de recursos limitados que podem ser formulados utilizando essa ferramenta. Existem problemas de otimização que envolvem restrições e funções objetivo que não podem ser modeladas com o uso de funções lineares. Nesses casos, deve-se aplicar outro modelo de programação em seu lugar, conhecido como Programação Não Linear (RAGSDALE, 2009).

2.3.2 Programação Não Linear

Problemas práticos de otimização frequentemente envolvem comportamento não linear que deve ser levado em conta, como por exemplo, em problemas de

planejamento econômico, onde o grau de não linearidade é a regra e não a exceção (HILLIER; LIEBERMAN, 2013). Um modelo de otimização compõe um problema de Programação Não Linear (PNL) se envolver qualquer tipo de não linearidade, seja na função objetivo ou em qualquer de suas restrições (GOLDBARG; LUNA, 2005).

Há muitos tipos de dados diferentes de problemas de Programação Não Linear dependendo das características de suas restrições e também da função objetivo. Diante disso, esse modelo de programação é um assunto particularmente extenso (PIZZOLATO; GANDOLPHO, 2009).

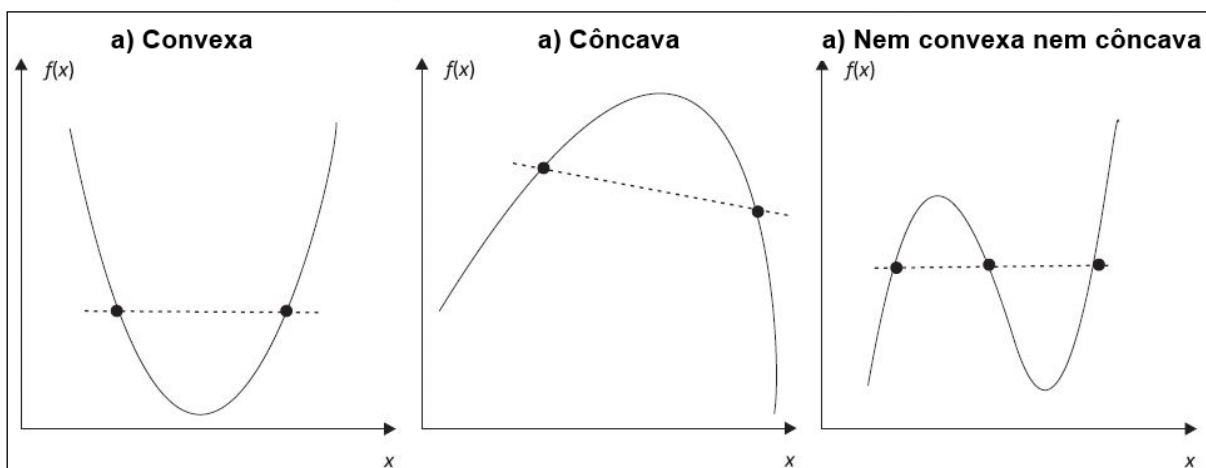
Diferente do método *simplex* para Programação Linear, não existe um algoritmo único capaz de solucionar todos os diferentes tipos de problemas. Para isso, foram desenvolvidos algoritmos para vários tipos (classes) individuais de problemas de PNL. Logo, os problemas de Programação Não Linear podem ser classificados como: PNL irrestrita - com uma única variável ou com múltiplas variáveis - e PNL com restrição - inclui programação côncava, convexa, quadrática e separável (BELFIORE; FÁVERO, 2013).

Segundo os autores Hillier e Lieberman (2013), os problemas de programação irrestrita são aqueles que não possuem restrição, de modo que o objetivo seja sempre minimizar ou maximizar os valores da função objetivo. Já os problemas com restrição são aqueles que possuem todas as funções de restrição lineares, porém a função objetivo é não linear. Essa categoria compreende as seguintes programações:

- a) Convexa: uma função é dita convexa se tem a forma da Figura 4(a), isto é, tem valores marginais crescentes;
- b) Côncava: uma função é dita côncava se tem a forma da Figura 4(b), isto é, tem valores marginais decrescentes;
- c) Quadrática: a função objetivo deve incluir termos como o quadrado de uma variável ou o produto de duas variáveis;
- d) Separável: cada termo envolve apenas uma única variável, tanto nas restrições quanto na função objetivo.

A Figura 4 ilustra o exemplo de uma função convexa e côncava, além de uma função que não é nem convexa nem côncava.

Figura 4 - Exemplo de uma função convexa, côncava e nem convexa e nem côncava



Fonte: Belfiore e Fávero (2013)

Uma função objetivo - $f(x)$ - é convexa se um segmento de reta que une dois pontos dessa função está na superfície ou acima dela. Analogamente, uma função $f(x)$ é côncava se um segmento de reta que une dois pontos dessa função está na superfície ou abaixo dela. Por outro lado, se um segmento de reta une mais do que dois pontos dessa função, ela não é nem convexa nem côncava (LACHTERMACHER, 2009).

2.3.3 Programação Inteira

Na prática, diversos problemas demandam valores inteiros, como por exemplo, nos casos de número de máquinas, veículos, pessoas e atividades. Para esses casos, utiliza-se a Programação Inteira (PI), na qual é utilizado o modelo da Programação Linear com uma restrição adicional de que as variáveis devem ser valores inteiros – isto é, discretos. Essa característica implica maior complexidade computacional do que a oriunda de situações de não linearidade de funções (GOLDBARG; LUNA, 2005).

Há também o caso em que parte das variáveis de decisão é discreta e as demais são contínuas. Nesse caso, o modelo é chamado de Programação Inteira Mista (PIM). Além disso, há também a Programação Binária (PB) - quando todas as variáveis são binárias - e a Programação Inteira Binária (PIB) – quando há variáveis discretas e binárias (BELFIORE; FÁVERO, 2013).

Além da ampla utilização dessa ferramenta quando as variáveis de decisão se restringem a valores inteiros, há diversas aplicações envolvendo decisões sim-ou-

não - inclusive relações combinatórias que podem ser expressas em termos de tais decisões - que podem ser representadas por variáveis binárias (0-1). Esses fatores fizeram com que a Programação Inteira se tornasse uma das técnicas de PO mais utilizadas (HILLIER; LIEBERMAN, 2013).

2.4 SCHEDULING

Uma das questões mais importantes na área de planejamento da produção é a integração entre o planejamento e o *scheduling*. Cada um pertence a um nível diferente de tomada de decisão, de modo que o planejamento da produção pertence ao nível de médio prazo e o *scheduling* ao nível de curto prazo. Devido à inter-relação entre esses dois níveis, a interdependência entre as diferentes funções do planejamento deve ser considerada no problema de *scheduling* (RAMEZANIAN; SAIDI-MEHRABAD, 2013).

Pinedo (2008) define *scheduling* como um processo de tomada de decisão usado em diversas indústrias, cujo objetivo é a alocação de recursos para realizar tarefas em determinado período de tempo, a fim de otimizar um ou mais objetivos, como por exemplo, a minimização do tempo de processamento. O autor ainda ressalta que tal processo é importante não apenas nos sistemas de produção, mas também nos ambientes de processamento de informações e áreas relacionadas à transportes e serviços.

Em geral, o problema de *scheduling* pode ser definido como: um conjunto de n tarefas (J_1, J_2, \dots, J_n) deve ser processado em m máquinas (M_1, M_2, \dots, M_m) disponíveis. Um subconjunto dessas máquinas é requerido para completar o processamento de cada tarefa. A ordem de fluxo nas máquinas pode ou não ser fixada para algum ou todos os produtos. O processamento do recurso J na máquina M é denominado operação, denotado por O_{ij} . Para cada operação O_{ij} , existe um tempo de processamento T_{ij} associado. O problema consiste em encontrar uma programação que otimize alguma medida de desempenho (MACCARTHY; LIU, 1993).

De acordo com os autores Baker e Trietsch (2009), um problema é caracterizado pelas seguintes condições:

- e) As máquinas estão sempre disponíveis;

- f) Cada máquina deve processar uma tarefa por vez;
- g) Os tempos de processamento e as restrições tecnológicas são conhecidos;
- h) Cada operação deve ser executada até o seu término, sem interrupção;
- i) Os tempos de *setup* são independentes da sequência de tarefas e estão incluídos nos tempos de processamento;
- j) Duas operações de uma mesma tarefa não podem ser executadas simultaneamente;
- k) As máquinas nunca ficam ociosas.

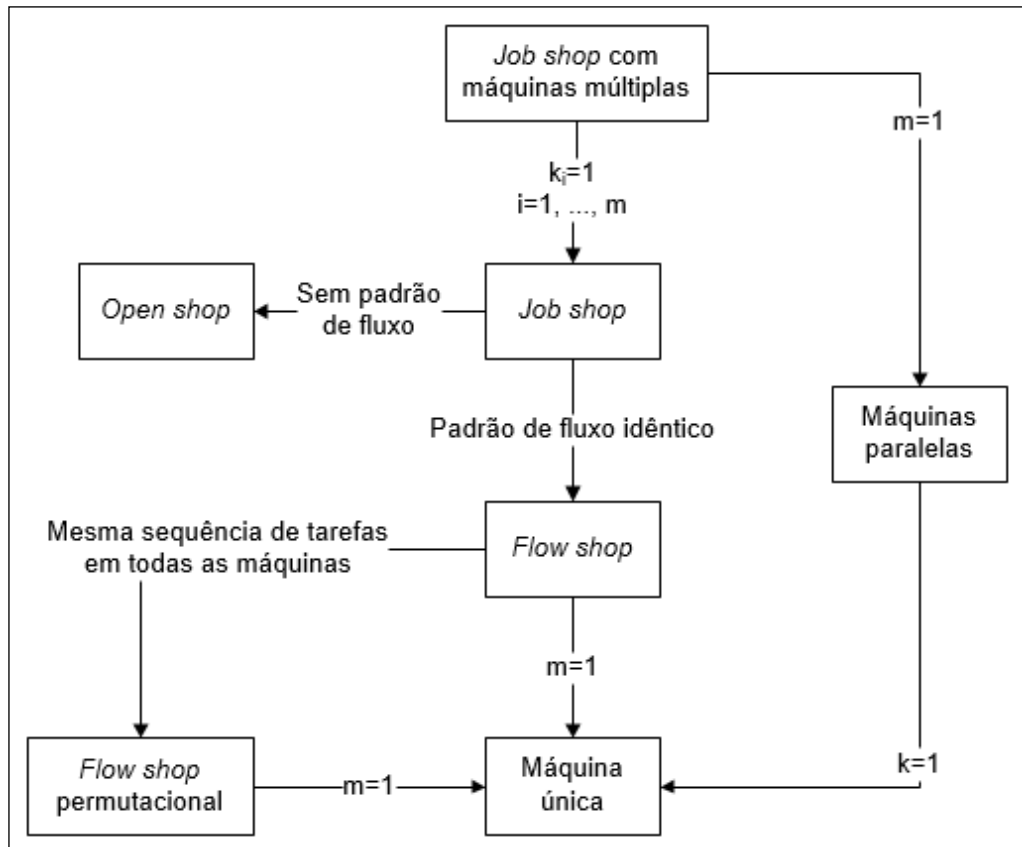
Segundo Pinedo (2008), um problema de *scheduling* é descrito pela notação $\alpha | \beta | \gamma$. O campo α descreve o ambiente da máquina e contém apenas uma entrada. Por exemplo, para máquina única, o α é representado por 1. O campo β fornece as informações sobre as características e as restrições do processamento, pode estar vazio, ou conter uma ou múltiplas entradas. O campo γ descreve o objetivo a ser minimizado e em geral, contém uma única entrada.

Ao definir um problema de programação, deve-se especificar as restrições tecnológicas e os objetivos. As restrições tecnológicas são determinadas principalmente pelo padrão de fluxo das tarefas nas máquinas (MACCARTHY; LIU,1993). De acordo com os autores Maccarthy e Liu (1993), cada ambiente é definido conforme segue:

- a) *Job shop*: cada tarefa tem seu próprio padrão de fluxo nas máquinas;
- b) *Flow shop*: todas as tarefas possuem o mesmo padrão de fluxo nas máquinas;
- c) *Open shop*: não há um padrão específico para as tarefas;
- d) *Flow shop* permutacional: a ordem de processamento das tarefas em cada máquina é obrigatoriamente a mesma;
- e) Máquina única: apenas uma máquina está disponível para o processamento das tarefas;
- f) Máquinas paralelas: há duas ou mais máquinas disponíveis em uma mesma fase de processamento;
- g) *Job shop* com máquinas múltiplas: há duas ou mais máquinas disponíveis em cada etapa do processamento, sendo que cada tarefa é processada em apenas uma dessas máquinas.

A Figura 5 ilustra esquematicamente a relação entre as diferentes situações de máquinas.

Figura 5 - Relação: classes de problemas de programação de tarefas em máquinas



k =número de máquinas idênticas em cada etapa ($i=1, \dots, m$).

Fonte: Adaptado de Maccarthy e Liu (1993)

Cada objetivo depende de um indicador de desempenho que pode ser simples ou composto (multiobjetivo). Esses indicadores são utilizados para se determinar a eficácia (qualidade da solução) de um determinado método de programação (ARAÚJO, 2014). Segundo Baker (1974), os principais indicadores de desempenho são:

- Minimização da duração total da programação (*makespan*);
- Minimização do tempo total de fluxo (*total flowtime*) ou tempo médio de fluxo (*mean flowtime*);
- Minimização do atraso médio ou do atraso máximo (*tardiness*).

No presente trabalho, as características de dependência e assimetria do *setup* adotadas resultam em uma variação do tempo total de *setup*. Essa variação altera o valor do critério de desempenho adotado que, no caso em estudo, será utilizado como critério apenas a minimização da soma dos tempos de *setup*.

2.5 CARACTERÍSTICAS E RESTRIÇÕES OPERACIONAIS

O processamento das tarefas tem muitas características distintas e é frequentemente sujeito a restrições que são peculiares. Esta seção descreve as características e restrições de processamento consideradas neste estudo.

2.5.1 Ambiente *Flow Shop*

O problema geral de *flow shop* é definido por um conjunto de n tarefas que deve ser processado, na mesma sequência, em m máquinas diferentes (NAGANO; SILVA; LORENA, 2014). A solução do problema consiste em determinar, dentre as $n!$ sequências de tarefas possíveis, aquela que otimize uma determinada medida de desempenho. Para exemplificar, em um processo produtivo com dez tarefas, existem 3.628.800 (10!) soluções de sequenciamento para serem estudadas e, dentre elas, uma pode ser considerada como uma solução ótima.

De acordo com a complexidade dos problemas de natureza combinatória, o problema em questão é classificado como *NP-hard*, caracterizando-se como um problema difícil de obter uma solução ótima em tempo aceitável (NAGANO; BRANCO; MOCCELLIN, 2007).

Esse problema de programação da produção tem sido o objetivo de diversas pesquisas, desde o trabalho pioneiro de Johnson, em 1954, para o problema com somente duas máquinas (MOCCELLIN; NAGANO, 2007). Técnicas de programação matemática têm sido utilizadas na busca da solução ótima do problema, como por exemplo, as técnicas de enumeração do tipo *branch-and-bound* (IGNALL; SCHRAGE, 1965) e a Programação Linear Inteira (SELEN; HOTT, 1986).

2.5.2 Máquinas Paralelas e Elegibilidade da Máquina

Em relação ao número de recursos existentes, quando há somente uma máquina disponível, ou um fluxo de produção unidirecional (quando não há retorno do produto em processamento), o sequenciamento das atividades a serem executadas irá determinar a programação. Já no caso das máquinas paralelas (duas ou mais

máquinas disponíveis), é necessário definir também a alocação das tarefas nas máquinas além da ordem de execução (MORAIS, 2008).

De acordo com French (1982), há três classes de problemas com máquinas paralelas:

- a) Máquinas Idênticas: os tempos de processamento das tarefas são os mesmos em todas as máquinas;
- b) Máquinas Uniformes ou Proporcionais: os tempos de processamento das tarefas variam de acordo com um padrão simples entre as máquinas, sendo essa variação associada a um fator de proporcionalidade;
- c) Máquinas Distintas: os tempos de processamento das tarefas variam entre as máquinas, mas em um padrão completamente arbitrário.

Em um ambiente de máquinas paralelas, muitas vezes pode ser que a tarefa j não possa ser atribuída a qualquer uma das máquinas disponíveis; ela só pode ser executada em uma máquina que pertence a um subconjunto específico M_j (PINEDO, 2005).

Dentre os exemplos de classes de problemas que podem ser utilizados, no presente trabalho será considerado o problema de minimização da soma dos tempos de *setup* em máquinas paralelas distintas, pois, embora as máquinas possuam o mesmo tempo de processamento, algumas tarefas devem ser processadas apenas em uma determinada máquina, devido às características do material.

2.5.3 *Setup* Assimétrico, Antecipado e Dependente da Sequência

O tempo de *setup* ou tempo de preparação da máquina compreende “o tempo decorrido na troca do processo de uma atividade para outra” (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2009, p. 462). O *setup* pode incluir atividades como limpeza, recalibragem de equipamentos, mudanças de acessórios e ferramentas, entre outros (MOREIRA, 2008). Visto que essas atividades compreendem intervenções que não agregam valor, é importante sequenciar as tarefas de forma que o tempo perdido nessas atividades seja minimizado (REDDY; NARENDRAN, 2003).

O Problema do Caixeiro Viajante (*Traveling Salesman Problem – TSP*), proposto em 1934 por Hassler Whitney, é um exemplo clássico para essa situação. O problema tem esse nome pois representa um caixeiro que deseja percorrer a distância

total mais curta de sua casa para cada uma das cidades e, em seguida, retornar para casa (FLOOD, 1956). Esse método pode ser adotado na programação da produção para determinar uma sequência de tarefas a ser processada em uma máquina, sendo os tempos de *setup* equivalentes às distâncias entre as cidades.

O autor Flynn (1987) aponta que o grau de similaridade entre duas tarefas processadas sucessivamente em uma mesma máquina tem relação direta com o tempo necessário para o *setup*. Logo, se as duas tarefas forem similares, o tempo demandado para o *setup* será pequeno. Porém, se forem completamente diferentes, o tempo será maior.

Os tempos de *setup* podem ser divididos em duas categorias: independentes da sequência, quando o tempo de *setup* depende apenas da tarefa que está sendo processada, e; dependentes da sequência, quando o tempo de *setup* depende da tarefa que está sendo processada e da tarefa anterior (ULUNGU; et al., 1999). Esse último caso é conhecido na literatura como *Flowshop Sequence Dependent Group Scheduling* - FSDGS (LIOU; HSIEH, 2015).

Neste trabalho será considerada a situação em que os tempos de *setup* são dependentes da sequência de processamento das tarefas. Dessa forma, o tempo de *setup* da máquina após o processamento da tarefa j , para executar a tarefa i , expresso por S_{ji} , será diferente do tempo de *setup* entre a tarefa j e uma outra tarefa k , expresso por S_{jk} , dentro da matriz de tempos de *setup* da mesma máquina (BARROS; MOCCELLIN, 2004). A Tabela 1 ilustra uma matriz de tempos de *setup*: o *setup* entre as tarefas é a interseção da tarefa (linhas) com a tarefa seguinte (colunas).

Tabela 1 - Matriz de tempos de *setup*

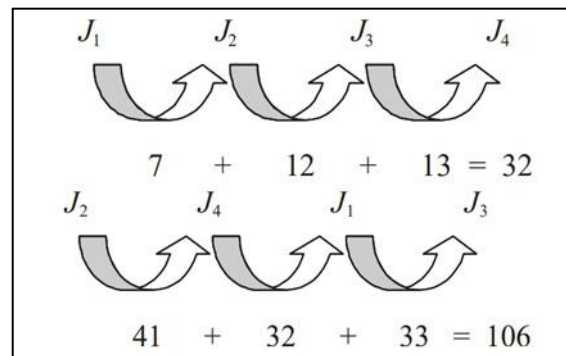
	J_1	J_2	J_3	J_4
J_1	---	7	33	27
J_2	18	---	12	41
J_3	25	17	---	13
J_4	32	45	9	---

Fonte: Barros e Moccellin (2004)

No presente estudo, além dos tempos de *setup* serem dependentes da sequência, eles também são assimétricos, ou seja, o tempo de *setup* da tarefa j para i é diferente comparado ao tempo de *setup* da tarefa i para j (BARROS; MOCCELLIN, 2004). Essa característica de dependência e assimetria resulta em uma variação do tempo total de *setup*, e altera o valor do critério de desempenho adotado

(FUCHIGAMI, 2005). A Figura 6 ilustra essa variação a partir do sequenciamento de quatro tarefas em determinada máquina: para a sequência $S_1 = \{J_1, J_2, J_3, J_4\}$, tem-se a soma dos tempos de *setup* igual à 32; para outra sequência, $S_2 = \{J_2, J_4, J_1, J_3\}$, a soma dos tempos de *setup* é significativamente maior.

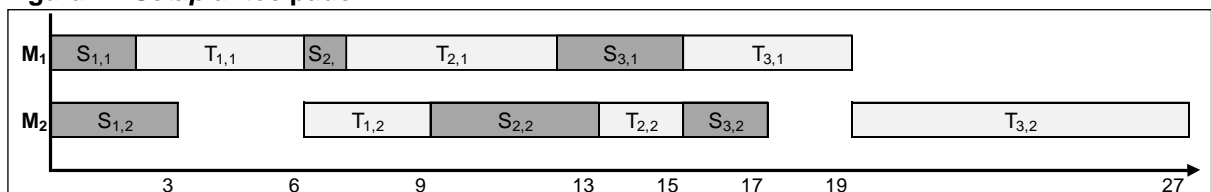
Figura 6 - Impacto da assimetria e da dependência da sequência



Fonte: Adaptado de Barros e Moccellini (2004)

Além desse critério, os tempos de *setup* também podem ser definidos como antecipados ou não antecipados. O *setup* antecipado (caso em estudo) compreende a operação de *setup* permitida para iniciar enquanto a tarefa ainda está sendo executada (ALDOWAISAN, 2001). A Figura 7 ilustra essa situação: a execução do *setup* da tarefa T_1 na máquina M_2 se inicia antes do término dessa tarefa na máquina M_1 .

Figura 7 - Setup antecipado



Fonte: Adaptado de Allahverdi (2000)

Já o *setup* não antecipado compreende a operação de *setup* que pode ser realizada somente após a liberação da tarefa. São os casos que demandam que o material a ser processado esteja presente na máquina para que o *setup* seja realizado, como, por exemplo, nas operações de ajuste e posicionamento (FUCHIGAMI, 2015).

3 METODOLOGIA

A pesquisa pode ser definida como “o procedimento racional e sistemático que tem como objetivo proporcionar respostas aos problemas que são propostos” (GIL, 1996, p. 19). Para que se alcance esse objetivo, é necessário traçar o curso de ação que deve ser seguido no processo de investigação (KÖCHE, 2002).

Neste capítulo são apresentados os procedimentos metodológicos e suas etapas para a elaboração da proposta de desenvolvimento de um modelo matemático para o problema de sequenciamento da produção.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Segundo Köche (2002), pode haver vários tipos de pesquisa, as quais dependem do problema a ser analisado, da sua natureza, cenário espaço-temporal em que se encontram e do conhecimento do pesquisador. Dessa forma, a pesquisa pode ser classificada mediante alguns critérios, tais como: natureza, abordagem, objetivos e procedimentos técnicos utilizados (SILVA; MENEZES, 2005).

3.1.1 Quanto à Natureza

Em relação à sua natureza, a pesquisa pode ser classificada como básica ou aplicada. Segundo os autores Silva e Menezes (2005), o objetivo da pesquisa básica é adquirir novos conhecimentos que auxiliem no avanço da ciência, sem que haja uma aplicação prática. Já na pesquisa aplicada, o objetivo é criar conhecimentos científicos para aplicação prática e direcionados à solução de problemas específicos (SILVA; MENEZES, 2005).

Este trabalho é considerado uma pesquisa aplicada, pois busca propor o melhor sequenciamento da produção em uma indústria química, para a minimização da soma dos tempos de *setup*, por meio da aplicação da modelagem matemática.

3.1.2 Quanto à Abordagem

Sobre a abordagem, a pesquisa pode ser classificada como quantitativa, qualitativa ou combinada. De acordo com Turrioni e Mello (2012), a pesquisa quantitativa tem como objetivo traduzir em números as informações para analisá-las e classificá-las, por meio do uso de recursos estatísticos. Já a pesquisa qualitativa é descritiva, os pesquisadores analisam as informações com base na indução, ou seja, não são utilizados métodos e técnicas estatísticas (TURRIONI; MELLO, 2012).

A pesquisa combinada considera que o pesquisador pode combinar fatores das pesquisas qualitativas e quantitativas em todas ou em algumas das etapas do processo de pesquisa (TURRIONI; MELLO, 2012).

Este trabalho possui caráter quantitativo, pois será utilizado um modelo de programação para determinar o melhor sequenciamento da produção a ser utilizado para minimizar a soma dos tempos de *setup*.

3.1.3 Quanto aos Objetivos

Com relação aos objetivos, a pesquisa pode ser classificada como exploratória, descritiva ou explicativa. Segundo Alyrio (2009, p. 60) “a pesquisa exploratória é caracterizada pela existência de poucos dados disponíveis, em que se procura aprofundar e apurar ideias e a construção de hipóteses”.

Ainda segundo o autor, a pesquisa descritiva tem como objetivo enumerar e ordenar dados, sem a finalidade de comprovar ou contestar hipóteses exploratórias. Já a pesquisa explicativa tem como finalidade identificar os aspectos que contribuem ou que determinam para a ocorrência dos fenômenos (GIL, 1996).

Este trabalho possui caráter exploratório, pois tem por finalidade definir qual o melhor sequenciamento da produção a partir da implementação de um modelo de programação baseado em dados reais.

3.1.4 Quanto aos Procedimentos Técnicos

Segundo Gil (1996), essa classificação compreende o delineamento da pesquisa, será considerado o ambiente de coleta das informações e os meios de

controle das variáveis envolvidas. O método adotado para a coleta de dados é o elemento mais importante na identificação do delineamento da pesquisa, definido como: pesquisa bibliográfica, pesquisa documental, pesquisa experimental, pesquisa *ex-post facto*, levantamento e estudo de caso (GIL, 1996). A pesquisa também pode ser feita por meio de experimentos, modelagem e simulação, levantamentos ou *surveys*, *Soft System Methodology* (SSM) e pesquisa-ação (TURRIONI; MELLO, 2012).

Para a realização deste trabalho foi efetuada, inicialmente, uma pesquisa bibliográfica com o objetivo de analisar teses, dissertações, artigos científicos e livros sobre o tema do trabalho e suas derivações. Após essa etapa, foi utilizada a modelagem e simulação que, segundo os autores Turrioni e Mello (2012), é usada quando deseja-se testar um sistema através de um modelo, e determinar o comportamento desse sistema em relação às mudanças propostas.

3.2 PROCEDIMENTOS DA PESQUISA

Os procedimentos da pesquisa foram divididos em 7 fases. A primeira fase consiste na revisão bibliográfica. Essa etapa incluiu uma pesquisa em livros, bases de dados de artigos científicos e teses. Os materiais foram filtrados de acordo com o alinhamento com o tema e também de acordo com os autores mais representativos referente a cada tópico do trabalho. Para a filtragem dos artigos foram aplicados os seguintes critérios de eliminação: trabalhos em duplicata; trabalhos cujo título, resumo ou palavras-chave não estavam relacionados ao tema pesquisado, e; fator de impacto menor que 1.

A segunda fase compreende o início da formulação do modelo matemático a partir da definição do escopo do problema. Essa definição é baseada na identificação de três princípios: (1) descrição das alternativas de decisão, (2) determinação do objetivo do estudo e (3) especificação das limitações sob as quais o modelo funciona (TAHA, 2008). Para isso, foram coletadas as informações necessárias para retratar o sistema em estudo, tais como demanda, números de lote, tempos de processamento e tempos de *setup* de cada produto.

A terceira fase refere-se à formulação do modelo matemático a fim de representar a essência do problema. Dessa forma, as decisões quantificáveis são representadas na forma de variáveis de decisão (x_1, x_2, \dots, x_n), cujos valores devem ser determinados. As relações e limitações a que estão sujeitas as variáveis de decisão são expressas por meio de equações e inequações, denominadas restrições. O objetivo que se pretende atingir é formulado como uma ou várias funções, colocada em termos das variáveis de decisão, denominada função objetivo (HILLIER; LIEBERMAN, 2006).

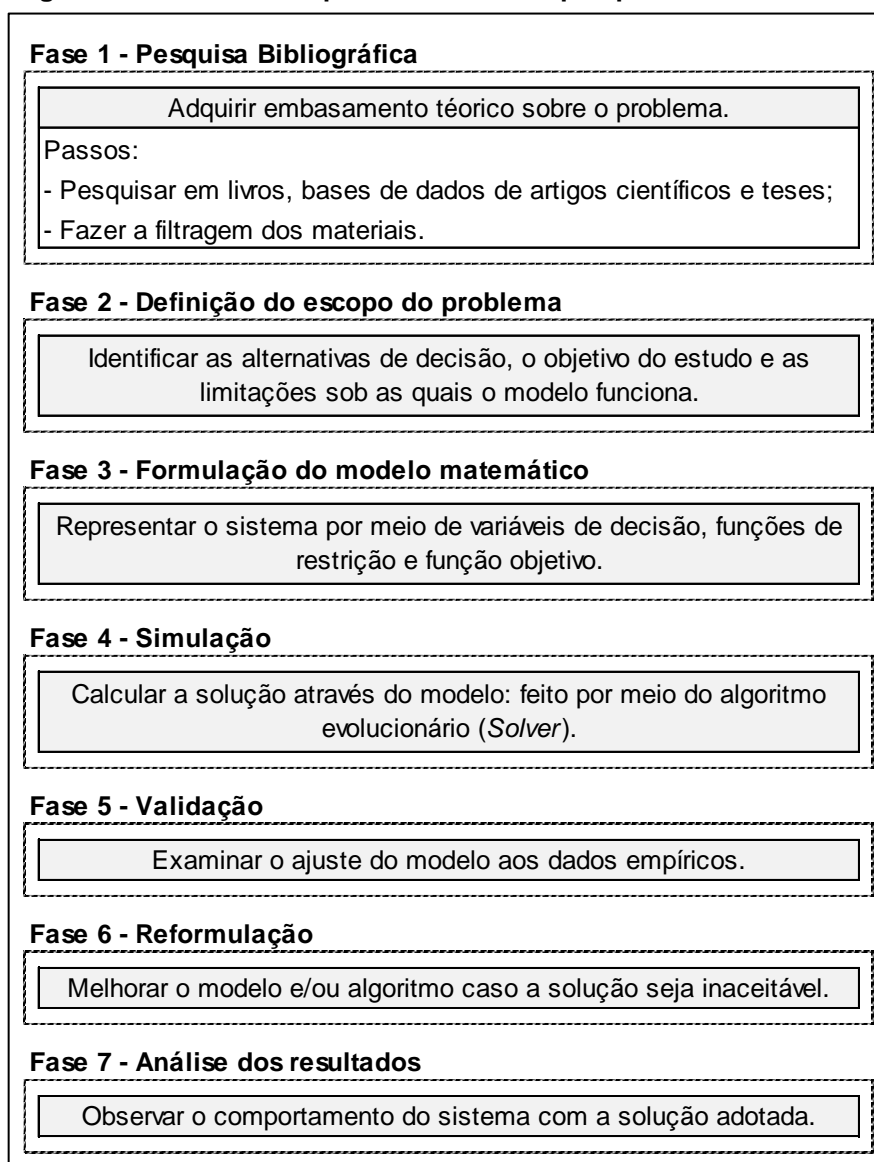
A próxima etapa envolve a simulação do modelo. Para realizá-la foi utilizado o algoritmo evolucionário, disponibilizado no suplemento *Solver* do *Microsoft Office Excel* 2013. Os algoritmos evolucionários (ou evolutivos) são algoritmos heurísticos baseados no princípio da genética, da evolução e na sobrevivência dos mais adaptados. Esses algoritmos vêm sendo aplicados para solução de problemas complexos e utilizam estratégias de intensificação (busca de soluções de qualidade) e diversificação (busca por soluções diversas), o que faz com que a busca não estacione em ótimos locais e encontre soluções de alta qualidade. Apesar de não garantir que a solução ótima seja encontrada, pode-se, muitas vezes, chegar à solução ótima ou a uma solução próxima a ela (BELFIORE; FÁVERO, 2013).

A partir da simulação, realizou-se a validação do modelo. Nessa etapa é examinado o ajuste do modelo aos dados empíricos (medições do sistema da vida real a ser modelado). Um bom ajuste de modelo significa que um conjunto de medidas de desempenho importantes, previstas pelo modelo, combinam ou concordam razoavelmente com suas contrapartes observadas no sistema da vida real (ARENALES et al., 2007).

Se a solução for inaceitável, o modelo e/ou o algoritmo de otimização devem ser melhorados e o processo de tomada de decisão é repetido (TALBI, 2009). Esse processo de reformulação compreende a sexta etapa. Conforme Andrade (2009), um modelo é válido se representar o sistema e se for capaz de fazer previsões de comportamento auxiliando na tomada de decisão.

Por fim, a última fase envolve a análise dos resultados a partir do confronto da solução obtida com os dados históricos. Essa é uma fase crítica, pois é somente nessa fase que os resultados do estudo serão obtidos e que será possível observar o comportamento do sistema com a solução adotada. As 7 fases descritas anteriormente são apresentadas na Figura 8.

Figura 8 - Estrutura dos procedimentos da pesquisa



Fonte: Autoria própria

A ordenação das etapas referentes à criação do modelo matemático foi estabelecida com base na literatura sobre as fases de implementação da Pesquisa Operacional, de acordo com os autores Andrade (2009); Arenales et al. (2007); Belfiore e Fávero (2013); Goldberg e Luna (2005); Hillier e Lieberman (2013); Lachtermacher (2009); Ragsdale (2009); Silva et al. (1998); Taha (2008); e Talbi (2009).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico são apresentados os resultados obtidos através do desenvolvimento da metodologia proposta.

4.1 MODELAGEM MATEMÁTICA

O modelo foi desenvolvido via modelagem matemática de otimização, por meio de Programação Linear Inteira Mista Binária (PLIMB). Para a elaboração do modelo foram considerados cinco tipos de informações: (1) tipos de produtos e suas características – restrição de elegibilidade de máquina e tempos de processamento; (2) número de máquinas; (3) tamanho dos lotes – de acordo com a demanda mensal; (4) tempos de *setup*; e (5) tempo disponível.

Os dados utilizados foram coletados em uma indústria do setor químico. Foi considerado o intervalo de tempo entre os meses de janeiro a junho de 2018. Nesse período, foram fabricados 25 produtos diferentes - por questões de sigilo, no presente trabalho os nomes dos produtos foram substituídos por letras (A-Y). A Tabela 2 apresenta as informações sobre a restrição de cada produto por máquina (M1, M2 e M3) e os tempos de processamento de cada um deles.

Tabela 2 - Restrição produto/máquina e tempos de processamento

Produto	Máquina	Tempo de processamento (horas)	Produto	Máquina	Tempo de processamento (horas)
A	M1, M2, M3	38,03	N	M1, M2, M3	42,28
B	M1, M2, M3	33,17	O	M1, M2, M3	40,93
C	M1, M2, M3	36,00	P	M1, M2, M3	36,67
D	M1	20,32	Q	M1, M2, M3	42,42
E	M1, M2, M3	32,83	R	M1, M2, M3	40,37
F	M1, M2, M3	34,50	S	M1, M2, M3	46,43
G	M1	30,04	T	M1, M2, M3	23,93
H	M1, M2, M3	34,85	U	M1, M2, M3	96,67
I	M1, M2, M3	32,28	V	M2	73,00
J	M1, M2, M3	28,77	W	M2	38,17
K	M1, M2, M3	46,17	X	M2	49,25
L	M1, M2, M3	45,90	Y	M1, M2, M3	40,65
M	M1, M2, M3	38,49			

Fonte: Adaptado do material da empresa

O processamento do material é realizado em somente uma máquina e os produtos possuem o mesmo tempo de processamento em todas as máquinas. Por exemplo, o produto A pode ser processado tanto na máquina M1 quanto nas máquinas M2 e M3, sendo necessário 38,03 horas para o seu processamento, independente da máquina a ser utilizada. Há também os produtos que só podem ser executados em uma determinada máquina, devido às suas características. Como é o caso dos produtos D e G, que só podem ser executados na máquina M1, e dos produtos V, W e X, que só podem ser executados na máquina M2.

Os tamanhos dos lotes de cada produto, de acordo com a demanda do período analisado, são apresentados na Tabela 3. Pode-se perceber que, para o período em análise, o produto N e o mês de fevereiro possuem a maior demanda.

Tabela 3 - Demanda janeiro a junho 2018

Produto	Mês						TOTAL
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	
A	3	1	3	1	2	2	12
B	3	1	2	2	2	1	11
C	1						1
D					1		1
E	1	1		2			4
F		1	1			2	4
G	1	3	1	2		1	8
H	2	2	2	2	2	1	11
I		4	4	2	1	2	13
J						1	1
K	1	2	1	2	2	1	9
L		2	2	2		1	7
M		1	1		3		5
N	3	3	4	3	2	2	17
O		1		1	1		3
P	1						1
Q		1	1	2			4
R	1	5	2	2		4	14
S		1		1	1		3
T					1		1
U							0
V	1				1		2
W	3	2	3	1	1	1	11
X	1					1	2
Y	1						1
TOTAL	23	31	27	25	20	20	146

Fonte: Adaptado do material da empresa

Os tempos de *setup* considerados no estudo referem-se aos tempos de duração da limpeza das máquinas entre uma troca de produto. Nesse contexto, foram consideradas três classes de limpeza conforme a compatibilidade dos produtos: compatíveis, parcialmente compatíveis e incompatíveis. O Quadro 1 apresenta uma adaptação da matriz de limpeza utilizada pela empresa. O tipo de limpeza necessário entre os lotes é a interseção do produto anterior (linhas) com o produto seguinte (colunas).

Quadro 1 - Matriz de limpeza utilizada entre os lotes

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
A	C	P	P	P	P	P	I	P	P	P	P	I	P	I	P	P	P	P	P	P	I	I	P	P	P
B	P	C	P	P	P	P	I	P	P	P	P	I	P	I	P	P	P	P	P	P	I	I	P	P	P
C	I	I	C	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
D	P	P	P	C	P	P	I	P	P	P	P	I	P	I	P	P	P	P	P	P	I	P	P	P	P
E	P	P	P	P	C	C	I	P	P	P	P	I	P	I	P	P	P	P	P	P	I	P	P	P	P
F	P	P	P	P	C	C	I	P	P	P	P	I	P	I	P	P	P	P	P	P	I	P	P	P	P
G	I	I	I	I	I	I	C	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
H	P	P	P	P	P	P	I	C	P	P	P	I	P	I	P	P	P	P	P	P	I	P	P	P	P
I	P	P	P	P	P	P	I	P	C	P	P	I	P	I	P	P	P	P	P	P	I	P	P	P	P
J	P	P	P	P	P	P	I	P	P	C	P	I	P	I	P	P	P	P	P	P	I	P	P	P	P
K	P	P	P	P	P	P	I	P	P	P	C	C	P	C	P	P	P	P	P	P	I	P	P	P	P
L	P	P	P	P	P	P	I	P	P	P	C	C	P	C	P	P	P	P	P	P	I	P	P	P	P
M	P	P	P	P	P	P	I	P	P	P	P	I	C	I	P	P	P	P	P	P	I	P	P	P	P
N	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	C	C	I	C	I	I	I	I	I	I	P	I	I	I	I
O	P	P	P	P	P	P	I	P	P	P	P	I	P	I	C	P	P	P	P	P	I	P	P	P	P
P	P	P	P	P	P	P	I	P	P	P	P	I	P	I	P	C	P	P	P	P	I	P	P	P	P
Q	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	C	I	C	I	I	I	I	I	I
R	P	P	P	P	P	P	I	P	P	P	P	I	P	I	P	P	P	C	P	P	I	P	P	P	P
S	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	C	I	C	I	I	I	I	I	I
T	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
U	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	P	I	I	I	I	I	I	I	C	I	I	I
V	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	C	I	I
W	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	C	C
X	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	C	C
Y	P	P	P	P	P	P	I	P	P	P	P	I	P	I	P	P	P	P	P	P	I	I	P	P	C

Fonte: Material da empresa

Quando os produtos são compatíveis (C), não há necessidade de realizar a limpeza dos equipamentos entre os lotes. Ou seja, os resquícios do produto que ficam nos equipamentos não irão afetar o próximo lote. Quando os produtos são parcialmente compatíveis (P), faz-se necessário a realização de uma limpeza com baixo grau de complexidade. Já para os produtos incompatíveis (I), há necessidade de realizar uma limpeza mais complexa.

A matriz de compatibilidade exposta no Quadro 1 foi transcrita na forma numérica para representar o tempo de *setup* referente à cada classe de limpeza. Para os produtos compatíveis, tem-se o tempo de *setup* igual a zero, pois não há necessidade de realizar a limpeza. Para os produtos parcialmente compatíveis, foi considerado o tempo de *setup* igual a 2 horas. Já para os produtos incompatíveis, foi considerado o tempo de *setup* igual a 6 horas. Tais considerações tiveram como base o tempo médio para a realização de cada limpeza. A matriz modificada é exibida no Quadro 2.

Quadro 2 - Matriz de limpeza com *setup*

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
A	0	2	2	2	2	2	6	2	2	2	2	6	2	6	2	2	2	2	2	2	6	6	2	2	2
B	2	0	2	2	2	2	6	2	2	2	2	6	2	6	2	2	2	2	2	2	6	6	2	2	2
C	6	6	0	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
D	2	2	2	0	2	2	6	2	2	2	2	6	2	6	2	2	2	2	2	2	6	2	2	2	2
E	2	2	2	2	0	0	6	2	2	2	2	6	2	6	2	2	2	2	2	2	6	2	2	2	2
F	2	2	2	2	0	0	6	2	2	2	2	6	2	6	2	2	2	2	2	2	6	2	2	2	2
G	6	6	6	6	6	6	0	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
H	2	2	2	2	2	2	6	0	2	2	2	6	2	6	2	2	2	2	2	2	6	2	2	2	2
I	2	2	2	2	2	2	6	2	0	2	2	6	2	6	2	2	2	2	2	2	6	2	2	2	2
J	2	2	2	2	2	2	6	2	2	0	2	6	2	6	2	2	2	2	2	2	6	2	2	2	2
K	2	2	2	2	2	2	6	2	2	2	0	0	2	0	2	2	2	2	2	2	6	2	2	2	2
L	2	2	2	2	2	2	6	2	2	2	0	0	2	0	2	2	2	2	2	2	6	2	2	2	2
M	2	2	2	2	2	2	6	2	2	2	2	6	0	6	2	2	2	2	2	2	6	2	2	2	2
N	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	0	0	6	0	6	6	6	6	6	6	2	6	6	6	6
O	2	2	2	2	2	2	6	2	2	2	2	6	2	6	0	2	2	2	2	2	6	2	2	2	2
P	2	2	2	2	2	2	6	2	2	2	2	6	2	6	2	0	2	2	2	2	6	2	2	2	2
Q	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	0	6	0	6	6	6	6	6	6
R	2	2	2	2	2	2	6	2	2	2	2	6	2	6	2	2	2	0	2	2	6	2	2	2	2
S	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	0	6	0	6	6	6	6	6	6
T	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
U	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	2	6	6	6	6	6	6	0	6	6	6	6
V	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	0	6	6	6
W	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	0	0	6
X	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	0	0	6
Y	2	2	2	2	2	2	6	2	2	2	2	6	2	6	2	2	2	2	2	2	6	6	2	2	0

Fonte: Adaptado do material da empresa

As restrições/metapas do modelo consideram:

- Uma posição por tarefa;
- Elegibilidade da máquina;
- Tempo total disponível;
- Quantidade de lotes a serem produzidos.

Dessa forma, o modelo matemático utilizado para a determinação do sequenciamento da produção possui a seguinte formulação geral:

$$\text{Min } S = \sum_{i=A}^Y s_{ij} \quad \forall j \{j = A, \dots, Y\} \quad [1]$$

Sujeito a:

$$\sum_{k=1}^3 x_{ik} = 1 \quad \forall i \{i = A, \dots, Y\} \quad [2]$$

$$x_{ik} = 1 \quad \forall i \{i = D, G\} \text{ e } \forall k \{k = 1\} \quad [3]$$

$$x_{ik} = 1 \quad \forall i \{i = V, W, X\} \text{ e } \forall k \{k = 2\} \quad [4]$$

$$\sum_{k=1}^3 l_{ik} t_i + s_{ij} \leq h_m \quad \forall i \{i = A, \dots, Y\} \text{ e } \forall j \{j = A, \dots, Y\} \quad [5]$$

$$s_{ij}, l_{ik}, h_m, D_m \in Z^+ \quad [6]$$

$$t_i \geq 0 \quad [7]$$

$$x_{ik} \in \{0,1\} \quad [8]$$

Onde:

i = indexador para tarefa na posição i ;

j = indexador para tarefa na posição $i+1$;

k = indexador para máquina;

s_{ij} = tempo de *setup* da tarefa i para a tarefa subsequente j ;

x_{ik} = variável binária que define se uma tarefa i será executada na máquina k ;

l_{ik} = tamanho do lote da tarefa i na máquina k ;

t_i = tempo de processamento da tarefa i ;

h_m = tempo disponível (horas) no mês m .

D_m = demanda no mês m .

A função objetivo [1] minimiza o tempo total do *setup*. A restrição [2] define que cada tarefa pode ser alocada somente uma vez em cada máquina. O conjunto de restrições [3] e [4] determinam a elegibilidade das tarefas D e G na máquina 1 e das tarefas V , W e X na máquina 2, respectivamente. A restrição [5] estabelece o tempo total disponível para a produção. Para mensurar o tempo disponível para o

processamento dos produtos nas máquinas foi considerado 24 horas por dia útil, visto que a produção desses materiais é realizada somente a partir do processamento dos mesmos nas máquinas, dependendo apenas da mão de obra para inserir e retirar o material da máquina e para realizar a limpeza do equipamento. Os dados referentes ao tempo disponível estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Tempo disponível

Tempo disponível	Mês					
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
Dias	22	20	21	21	21	21
Horas	528	480	504	504	504	504

Fonte: Autoria própria

Nessa restrição foi considerado que, para lotes de uma mesma tarefa, a produção seria realizada em sequência, ou seja, foi considerada a multiplicação entre o número de lotes a serem produzidos em uma mesma máquina (l_{ik}) - valor apresentado na Tabela 3 - e o tempo de processamento de cada tarefa (t_i) - valor apresentado na Tabela 2. O resultado da somatória dessa multiplicação, somado ao tempo de setup (s_{ij}), deve ser menor ou igual ao tempo disponível (h_m).

A restrição [6] estabelece que as variáveis relacionadas ao tempo de *setup* (s_{ij}), tamanho do lote (l_{ik}), tempo disponível (h_m) e demanda (D_m), devem ser números inteiros e positivos. A restrição [7] estabelece que a variável relacionada ao tempo de processamento de cada tarefa (t_i) deve ser um valor positivo. Por fim, a restrição [8] estabelece que a variável que define se uma tarefa i será executada na máquina k (x_{ik}) deve assumir um valor binário.

4.2 RESULTADOS

A partir do modelo desenvolvido, foi realizada a implementação por meio do *Solver* (suplemento do *Excel*), a partir do algoritmo evolucionário. Assim, para os seis meses de estudo o mesmo modelo foi utilizado com a finalidade de minimizar o *setup*, criando um sequenciamento de produção com maior compatibilidade e, conseqüentemente, menor custo para a empresa.

Para validar o modelo foi analisado se o resultado obtido era aceitável, ou seja, se o modelo previa adequadamente o comportamento do sistema em estudo. Para isso, foram realizadas diversas comparações entre os resultados obtidos e os dados históricos. A partir dessas comparações fez-se necessário reformular o modelo até obter o resultado desejado: retratar a realidade do sistema em estudo. Por fim, o Quadro 3 apresenta o sequenciamento gerado por meio da aplicação do algoritmo.

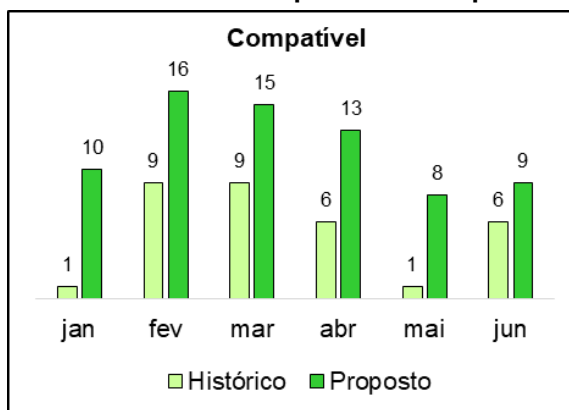
Quadro 3 - Resultado sequenciamento por máquina

Posição	jan			fev			mar			abr			mai			jun		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
1	G	R	A	G	W	M	G	R	N	G	S	N	H	S	B	H	K	J
2	E	V	B	B	N	F	K	I	A	L	Q	K	D	V	N	A	R	I
3	H	Y	C	L	A	O	L	W	B	I	B	R	I	M	K	N	X	B
4	P	K		E	R	S	H			H	O		A	W		L	W	F
5	N	X		K		Q	M			A	E		T	O				
6		W		H		I	F				W							
7							Q											

Fonte: Autoria própria

Para comparação entre o histórico de produção da empresa e o sequenciamento proposto, montou-se um gráfico mostrando as limpezas realizadas nos dois casos. Com base no histórico da produção, foi contado quantas vezes o sequenciamento da produção apresentava produtos compatíveis, parcialmente compatíveis e incompatíveis. Para realizar a comparação, foi realizada também a contagem a partir do sequenciamento gerado pelo algoritmo. Os dados são exibidos nos Gráficos 1, 2 e 3, respectivamente, e o histórico da produção é apresentado no Apêndice A.

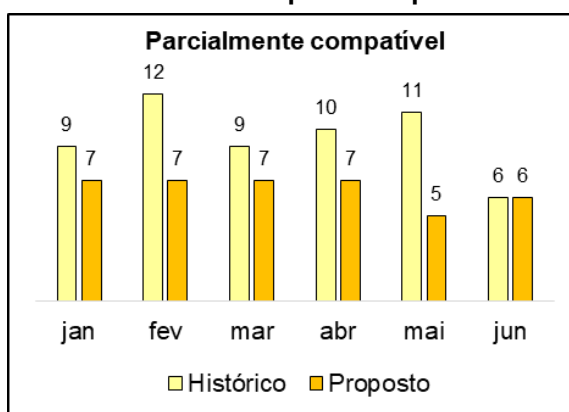
Gráfico 1 – Resultado produtos compatíveis



Fonte: Autoria própria

Para o período analisado, o sequenciamento gerado mais que duplicou o total dos produtos compatíveis, indo de 32 para 71 (aumento de 122%) a somatória entre os meses de janeiro a junho. Ou seja, com a implementação do novo sequenciamento, não será necessário efetuar a limpeza para 71 trocas de lotes, visto que o novo sequenciamento otimizou tanto a sequência dos produtos compatíveis quanto a sequência de acordo com o número de lotes de cada produto.

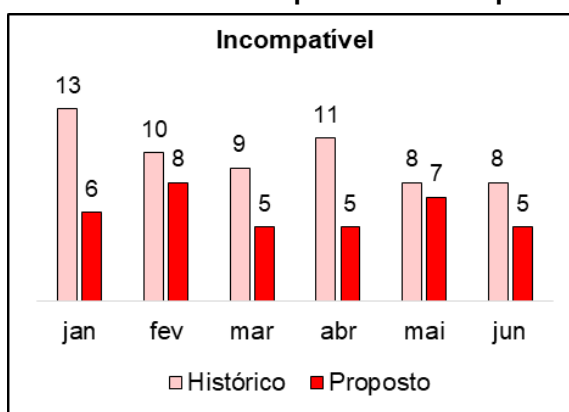
Gráfico 2 - Resultado produtos parcialmente compatíveis



Fonte: Autoria própria

Para as demais compatibilidades, o novo sequenciamento apresentou uma redução no número de produtos parcialmente compatíveis e incompatíveis equivalente a 32% e 39%, respectivamente. O mês de junho não teve variação no número de produtos parcialmente compatíveis, porém, teve um aumento de 50% no número de produtos compatíveis e uma redução de 38% no número de produtos incompatíveis, reduzindo em 30% o tempo de *setup*.

Gráfico 3 – Resultado produtos incompatíveis



Fonte: Autoria própria

Em comparação ao sequenciamento da produção baseado no histórico da produção, o novo sequenciamento foi otimizado: aumentou o número de limpezas compatíveis e reduziu o número de limpezas parcialmente compatíveis e incompatíveis. Com isso, foi possível minimizar também os desperdícios com matéria prima (em virtude do maior aproveitamento do produto), mão de obra (necessária para realizar a limpeza) e tempo (aumentando a capacidade).

Foi realizada também a comparação entre o número de horas utilizado anteriormente para realizar o *setup* e o número de horas necessário após o novo sequenciamento. Os dados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Porcentagem redução tempo de *setup*

Mês	Setup (horas)		Redução
	Histórico	Proposto	
jan	96	50	48%
fev	84	62	26%
mar	72	44	39%
abr	86	44	49%
mai	70	52	26%
jun	60	42	30%
TOTAL	468	294	37%

Fonte: Autoria própria

A partir do novo sequenciamento da produção para o período analisado, foi possível reduzir 174 horas o tempo destinado ao *setup* dos equipamentos, o equivalente a 37% do tempo total que era destinado anteriormente. O mês que apresentou maior redução foi o de abril, reduzindo em 49% o tempo de *setup*.

A fim de ilustrar o resultado obtido, a Figura 8 representa o sequenciamento realizado anteriormente e o sequenciamento resultante da implementação do modelo, tendo como exemplo o mês de abril.

Figura 8 - Comparação histórico x proposto para o mês de abril

HISTÓRICO																				
M1	W	I	B	I	G	I	A	P	H	P	I	C	I	I						
M2	E	P	K	C	N	I	S	I	K	P	B	P	R	C	R	P	H	I	G	I
M3	E	P	O	P	Q	I	L	C	L	C	N	C	N	I	Q	I				
PROPOSTO																				
M1	G	C	G	I	L	C	L	P	I	C	I	P	H	C	H	P	A	I		
M2	S	C	Q	C	Q	I	B	C	B	P	O	P	E	C	E	P	W	I		
M3	N	C	N	C	N	C	K	C	K	P	R	C	R	I						

Fonte: Autoria própria

Percebe-se que, para o mês representado na figura, aumentou de 6 para 13 o número de sequências de produtos compatíveis (C). Essa melhoria se estendeu também para todos os outros meses, visto que os dados mencionados anteriormente comprovam a eficiência do método aplicado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os problemas que tratam de sequenciamento da produção são de grande aplicabilidade, principalmente industrial. Por isso, a importância do seu estudo e a proposição de métodos de solução adequados e viáveis.

O trabalho demonstrou a aplicação de um modelo matemático para resolução de um problema de programação da produção em uma indústria química. O modelo de Programação Linear Inteira Mista Binária (PLIMB) tem como objetivo minimizar os tempos de *setup*, a partir da otimização do sequenciamento da produção.

Foi considerado como *setup* o tempo necessário para realizar a limpeza entre a produção dos lotes. Do ponto de vista da qualidade, uma limpeza ineficiente nos equipamentos acarreta em grandes chances de perder o próximo lote se os produtos forem incompatíveis. Ou seja, a otimização do sequenciamento de produtos compatíveis, além de trazer benefícios financeiros, tem grande influência para a qualidade final do produto.

O plano de produção demonstrado pelo modelo apresentou uma redução de 37% do total das horas de *setup* para o período entre os meses de janeiro a junho de 2018. Assim, o objetivo principal desse estudo foi atingido uma vez que a modelagem matemática de sequenciamento da produção proposta permitiu indicar uma ordem de produção capaz de reduzir os tempos de *setup*.

Ao atender os objetivos específicos traçados em um primeiro momento, a validação e a reformulação do modelo foram realizadas para que o seu desempenho pudesse ser comparado a partir dos dados históricos do sistema em estudo.

Embora o modelo de apoio à decisão desenvolvido demonstrou auxiliar na redução do tempo de *setup* das produções, em um ambiente existem outros fatores que podem interferir na produção, como: falta de matéria prima, quebra de máquina, parada por substituição de componente, entre outros. Assim, a utilização do modelo construído representa uma importante contribuição na redução do tempo de *setup*, mas não é a única solução, devido à possibilidade de ocorrência dos fatores citados.

Analisando os resultados obtidos durante a execução, percebe-se que o modelo executa perfeitamente o problema proposto, fornecendo a solução ótima com até 25 tarefas em um tempo inferior a 5 minutos. A restrição da utilização de modelos matemáticos na resolução de problemas é justamente o tempo computacional, que se torna inaceitável para problemas com tamanhos a partir de médio porte. Portanto, para

problemas maiores, aconselha-se a utilização de métodos heurísticos, principalmente para problemas de grande porte.

Além do uso de métodos heurísticos, uma outra perspectiva para pesquisas futuras seria evoluir no método de elaboração matemática do modelo, usando novas formulações matemáticas por meio da reformulação do modelo ou adição de novas restrições, a fim de melhorar ainda mais a adequação do modelo matemático com a realidade de uma indústria.

REFERÊNCIAS

ALDOWAISAN, T. **A new heuristic and dominance relations for no-wait flowshops with setups**. Computer and Operations Research, v. 28, p. 563-584, 2001.

ALLAHVERDI, A. **Minimizing mean flowtime in a two-machine flowshop with sequence-independent setup times**. Computers and Operations Research, v.27, p.111-127. 2000.

ALYRIO, R. D. **Métodos e técnicas de pesquisa em administração**. Volume único. Rio de Janeiro: Fundação CECIERJ, 2009.

ANDRADE, E. L. **Introdução à pesquisa operacional: métodos e modelos para análise de decisões**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

ARAÚJO, C. S. **Métodos heurísticos para programação de flow shop bicritério com datas de liberação e setup independente**. 2014. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Gestão Organizacional, Universidade Federal de Goiás. Catalão, 2014.

ARENALES, M.; et al. **Pesquisa operacional**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

BAKER, K. R. **Introduction to sequencing and scheduling**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1974, 305 p.

BAKER, K. R.; TRIETSCH, D. **Principles of sequencing and scheduling**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.

BARROS, A. D.; MOCCELLIN, J. V. **Análise da flutuação do gargalo em flow shop permutacional com tempos de setup assimétricos e dependentes da sequência**. Gestão e Produção, v. 11, n. 1, p. 101-108, 2004.

BELFIORE, P.; FÁVERO, LP. **Pesquisa operacional para cursos de engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

CORRÊA, H. L.; CORRÊA, C. A. **Administração de produção e operações: manufatura e serviços: uma abordagem estratégica**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2011. 690p.

EBRAHIMINY, S. M. T.; FATEMI GHOMI, S. M. T.; KARIMI, B. **Hybrid flow shop scheduling with sequence dependent family setup time and uncertain due dates**. Applied Mathematical Modelling, v. 38, n. 09-10, 2013, p. 2490-2504.

FERNANDES, F. C. F.; GODINHO FILHO, M. **Planejamento e controle da produção: dos fundamentos ao essencial**. São Paulo: Atlas, 2010.

FLOOD, M. M. **The traveling-salesman problem**. Operations Research, v. 4, n. 1, p. 61-75, 1956.

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

FRENCH, S. **Sequencing and scheduling: an introduction to the mathematics of the job shop**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1982.

FUCHIGAMI, H. Y. **Métodos heurísticos construtivos para o problema de programação da produção em sistemas flow shop híbridos com tempos de preparação das máquinas assimétricos e dependentes da sequência**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

FUCHIGAMI, H. Y. **Sequenciamento da produção em sistemas flow shop**. UFG, Goiânia – GO, 2015.

GAITHER, N.; FRAZIER, G. **Administração da produção e operações**. 8. ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2002.

GIGANTE, R. L. **Heurística construtiva para a programação de operações flowshop permutacional**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 1996.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização Combinatória e Programação Linear**: modelos e algoritmos. 2. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2005.

HILLIER, F. S. e LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. 9. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

IGNALL, E.; SCHRAGE, L. E. **Application of branch and bound technique to some flow-shop problem**. Operations Research, v.13, p. 400-412, 1965.

KAVEH, A.; KHAYATAZAD, M. **A new meta heuristic method**: Ray Optimization. Computers and Structures – Elsevier, p. 283–294, 2012.

KÖCHE, J. C. **Fundamentos de metodologia científica**: teoria da ciência e iniciação à pesquisa. 20. ed. Petrópolis, RJ: Vozes, 2002.

KRAJEWSKI, L.; RITZMAN, L.; MALHOTRA, M. **Administração de produção e operações**. 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

LACHTERMACHER, G. **Pesquisa operacional na tomada de decisões**. 4. ed. São Paulo, SP: Pearson Prentice Hall, 2009.

LIU C.; HSIEH Y. **A hybrid algorithm for the multi-stage flow shop group scheduling with sequence-dependent setup and transportation times**. International Journal of Production Economics, v. 170, parte A, 2015, p. 258-267.

LUSTOSA, L.; et al. **Planejamento e controle da produção**. Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 2008.

MACCARTHY, B. L.; LIU, J. Y. **Adressing the gap in scheduling research**: a review of optimization and heuristic methods in production scheduling. International Journal of Production Research, 31, n.1, 1993, p. 59-79.

MARTINS, P. G.; LAUGENI, F. P. **Administração da produção**. 2. ed. São Paulo: Saraiva, 2005.

MORAIS, M. F. **Métodos heurísticos construtivos para redução do estoque em processo em ambientes de produção flow shop híbridos com tempos de setup**

dependentes da sequência. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2008.

MOREIRA, D. A. **Administração da produção e operações.** 2 ed. São Paulo: Cengage Learning, 2008. 624p.

NAGANO, M. S.; BRANCO, F. J. C.; MOCCELLIN, J. V. **Soluções de alto desempenho para a programação da produção flow shop.** SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO (XIV SIMPEP), 14, 2007. Bauru, SP. Anais... Bauru: 2007.

NAGANO, M. S.; MOCCELLIN, J. V. **A high quality solution constructive heuristic for flow shop sequencing.** Journal of the Operational Research Society. v. 53, p. 1374-1379, 2002.

NAGANO, M. S.; MOCCELLIN, J. V.; LORENA, L. A. N. **Redução do estoque em processamento em sistemas de produção flow shop permutacional.** Revista Produção On-Line, v. 5, n. 3, p. 1-12, 2005.

NAGANO, M. S.; SILVA, A. A. da; LORENA, L. A. N. **An evolutionary clustering search for the no-wait flow shop problem with sequence dependent setup times.** Expert Systems with Applications, v. 41 n.8, 2014, p. 3628-3633.

NAVAEI J.; et al. **Heuristics for an assembly flow-shop with non-identical assembly machines and sequence dependent setup times to minimize sum of holding and delay costs.** Computers & Operations Research, v. 44, 2014, p. 52-65.

PINEDO, M. **Planning and scheduling in manufacturing and services.** New York: Springer, 2005.

PINEDO, M. **Scheduling: theory, algorithms, and systems.** 3. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 2008.

PIZZOLATO, N. D.; GANDOLPHO, A. A. **Técnicas de otimização.** Rio de Janeiro: LTC, 2009.

RAGSDALE, C. T. **Modelagem e Análise de Decisão.** São Paulo: Cengage Learning, 2009.

RAMEZANIAN R.; SAIDI-MEHRABAD M.; FATTAHI P. **MIP formulation and heuristics for multi-stage capacitated lot-sizing and scheduling problem with availability constraints**. Journal of Manufacturing Systems, v. 32, n. 2, 2013, p. 392-401.

RAMEZANIAN R.; SAIDI-MEHRABAD M. **Hybrid simulated annealing and MIP-based heuristics for stochastic lot-sizing and scheduling problem in capacitated multi-stage production system**. Applied Mathematical Modelling, v. 37, n. 7, 2013, p. 5134-5147.

REDDY, V.; NARENDRAN, T. T. **Heuristics for scheduling sequence-dependent set-up jobs in flow line cells**. International Journal of Production Research, Oxon, v.41, n.1, p.193-206. 2003.

RUSSOMANO, V. H. **Planejamento e controle da produção**. 6. ed. São Paulo: Pioneira, 2000.

SABOUNI M. T. Y.; LOGENDRAN R. **Carryover sequence-dependent group scheduling with the integration of internal and external setup times**. European Journal of Operational Research, v. 224, n. 1, 2013, p. 8-22.

SELEN, W. J.; HOTT, D. D. **A mixed-integer goal programming formulation of the standard flow-shop scheduling problem**. Journal of the Operational Research Society, v. 37, p. 1121-1128, 1986.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração de produção**. 3 ed. São Paulo: Atlas, 2009. 703p.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4. ed. Florianópolis, 2005.

SILVA, E. M.; et al. **Pesquisa operacional**. 3 ed. São Paulo: Atlas, 1998.

TAHA, H. A. **Pesquisa operacional**. 8. ed. São Paulo: Pearson, 2008.

TALBI, E. **Metaheuristics: From design to implementation**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.

TUBINO, D. F. **Manual de planejamento e controle da produção**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2000.

TURRIONI, J. B.; MELLO, C. H. P. **Apostila de Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção**: estratégias, métodos e técnicas para condução de pesquisas quantitativas e qualitativas. Itajubá, 2012. 191 p.

ULUNGU E. L.; et al. **MOSA method**: a tool for solving multiobjective combinatorial optimization problems. *Journal of MultiCriteria Decision Analysis*, v. 8, p. 221-236, 1999.

VANCHIPURA R.; SRIDHARAN R.; SUBASH BABU A. **Improvement of constructive heuristics using variable neighbourhood descent for scheduling a flow shop with sequence dependent setup time**. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 33, n. 1, 2014, p. 65-75.

APÊNDICE A - Histórico do sequenciamento

Data	HISTÓRICO		
	M1	M2	M3
jan	A	W	N
jan	PARCIALMENTE COMPATÍVEL	COMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL
jan	B	X	Y
jan	PARCIALMENTE COMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL	PARCIALMENTE COMPATÍVEL
jan	H	V	B
jan	INCOMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL	PARCIALMENTE COMPATÍVEL
jan	G	N	R
jan	INCOMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL	PARCIALMENTE COMPATÍVEL
jan	A	W	P
jan	PARCIALMENTE COMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL
jan	B	K	N
jan	PARCIALMENTE COMPATÍVEL	PARCIALMENTE COMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL
jan	E	W	A
jan	PARCIALMENTE COMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL
jan	C		
jan	INCOMPATÍVEL		
jan	H		
jan	INCOMPATÍVEL		
fev	G	R	L
fev	INCOMPATÍVEL	PARCIALMENTE COMPATÍVEL	PARCIALMENTE COMPATÍVEL
fev	I	F	Q
fev	COMPATÍVEL	PARCIALMENTE COMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL
fev	I	R	A
fev	COMPATÍVEL	COMPATÍVEL	PARCIALMENTE COMPATÍVEL
fev	I	R	K
fev	COMPATÍVEL	PARCIALMENTE COMPATÍVEL	COMPATÍVEL
fev	I	W	N
fev	PARCIALMENTE COMPATÍVEL	COMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL
fev	H	W	M
fev	PARCIALMENTE COMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL	PARCIALMENTE COMPATÍVEL
fev	B	N	K
fev	PARCIALMENTE COMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL	PARCIALMENTE COMPATÍVEL
fev	H	R	O
fev	INCOMPATÍVEL	COMPATÍVEL	PARCIALMENTE COMPATÍVEL
fev	G	R	E
fev	COMPATÍVEL	PARCIALMENTE COMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL
fev	G	S	
fev	INCOMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL	
fev		L	
fev		COMPATÍVEL	
fev		N	
fev		INCOMPATÍVEL	
mar	I	M	K
mar	COMPATÍVEL	PARCIALMENTE COMPATÍVEL	COMPATÍVEL
mar	I	W	L
mar	PARCIALMENTE COMPATÍVEL	COMPATÍVEL	COMPATÍVEL
mar	H	W	N
mar	PARCIALMENTE COMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL
mar	A	G	Q
mar	COMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL
mar	A	B	N
mar	PARCIALMENTE COMPATÍVEL	PARCIALMENTE COMPATÍVEL	COMPATÍVEL
mar	B	W	L
mar	PARCIALMENTE COMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL	COMPATÍVEL
mar	I	N	N
mar	COMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL
mar	I		R
mar	PARCIALMENTE COMPATÍVEL		COMPATÍVEL
mar	H		R

mar	PARCIALMENTE COMPATÍVEL		INCOMPATÍVEL
mar	F		
mar	PARCIALMENTE COMPATÍVEL		
mar	A		
mar	INCOMPATÍVEL		
abr	W	E	E
abr	INCOMPATÍVEL	PARCIALMENTE COMPATÍVEL	PARCIALMENTE COMPATÍVEL
abr	B	K	O
abr	INCOMPATÍVEL	COMPATÍVEL	PARCIALMENTE COMPATÍVEL
abr	G	N	Q
abr	INCOMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL
abr	A	S	L
abr	PARCIALMENTE COMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL	COMPATÍVEL
abr	H	K	L
abr	PARCIALMENTE COMPATÍVEL	PARCIALMENTE COMPATÍVEL	COMPATÍVEL
abr	I	B	N
abr	COMPATÍVEL	PARCIALMENTE COMPATÍVEL	COMPATÍVEL
abr	I	R	N
abr	INCOMPATÍVEL	COMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL
abr		R	Q
abr		PARCIALMENTE COMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL
abr		H	
abr		INCOMPATÍVEL	
abr		G	
abr		INCOMPATÍVEL	
mai	B	W	K
mai	PARCIALMENTE COMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL	PARCIALMENTE COMPATÍVEL
mai	A	V	O
mai	PARCIALMENTE COMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL	PARCIALMENTE COMPATÍVEL
mai	H	M	H
mai	PARCIALMENTE COMPATÍVEL	PARCIALMENTE COMPATÍVEL	PARCIALMENTE COMPATÍVEL
mai	A	T	K
mai	PARCIALMENTE COMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL	PARCIALMENTE COMPATÍVEL
mai	I	S	M
mai	PARCIALMENTE COMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL
mai	B	D	N
mai	INCOMPATÍVEL	PARCIALMENTE COMPATÍVEL	COMPATÍVEL
mai		M	N
mai		INCOMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL
jun	G	X	J
jun	INCOMPATÍVEL	COMPATÍVEL	PARCIALMENTE COMPATÍVEL
jun	A	W	K
jun	PARCIALMENTE COMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL	COMPATÍVEL
jun	B	R	L
jun	PARCIALMENTE COMPATÍVEL	COMPATÍVEL	PARCIALMENTE COMPATÍVEL
jun	H	R	F
jun	PARCIALMENTE COMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL
jun	I	N	N
jun	COMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL	INCOMPATÍVEL
jun	I		R
jun	PARCIALMENTE COMPATÍVEL		COMPATÍVEL
jun	F		R
jun	INCOMPATÍVEL		INCOMPATÍVEL