

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

HENRIQUE DE MORAES TAMURA

**SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO PARA MINIMIZAR O *MAKESPAN* DE UMA
INDÚSTRIA MADEIREIRA COM SETUPS DEPENDENTES EM UM AMBIENTE DE
MÁQUINAS PARALELAS NÃO RELACIONADAS**

PONTA GROSSA

2022

HENRIQUE DE MORAES TAMURA

**SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO PARA MINIMIZAR O *MAKESPAN* DE UMA
INDÚSTRIA MADEIREIRA COM SETUPS DEPENDENTES EM UM AMBIENTE DE
MÁQUINAS PARALELAS NÃO RELACIONADAS**

**Production Scheduling to Minimize Makespan in a Wooden Industry with
Dependent Setups in an Unrelated Parallel Machine Environment**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Produção da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Prof. Dr. Fábio José Ceron Branco.

PONTA GROSSA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

HENRIQUE DE MORAES TAMURA

**SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO PARA MINIMIZAR O *MAKESPAN* DE UMA
INDÚSTRIA MADEIREIRA COM SETUPS DEPENDENTES EM UM AMBIENTE DE
MÁQUINAS PARALELAS NÃO RELACIONADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Produção da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 08 de dezembro de 2022.

Fábio Jose Ceron Branco
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Everton Luiz de Melo
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Shih Yung Chin
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PONTA GROSSA

2022

Dedico este trabalho ao meu pai, em sua memória.

Agradeço pelo seu esforço para nos deixar bem.

Tchau

Um beijo

Te amo

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pela saúde e força que me proporciona diariamente, após um período tão conturbado na história das nossas vidas.

À minha mãe, Marisa, e minha irmã, Helena, pelo apoio incondicional que sempre me deram e por serem a base da minha vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Fábio José Ceron Branco, por estar praticamente 24 horas disponível para tirar dúvidas, pela empatia e norteamento do trabalho. Também ao Prof. Dr. Everton Luiz de Melo, por auxiliar com suas considerações e respondendo dúvidas durante sua matéria.

À minha namorada, Ida, pelo carinho e por me aguentar durante esse período turbulento.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram durante a minha graduação, meus mais sinceros muito obrigado.

RESUMO

Este trabalho tem como propósito verificar formas de otimizar o sequenciamento de tarefas de uma indústria madeireira situada no Paraná. A busca pelo melhor aproveitamento de recursos é algo recorrente nas indústrias, visto que é uma das formas de diminuir os custos e aumentar o lucro final. Isso ocorre, em especial, quando a matéria prima para o processo é um recurso natural que pode se tornar finito, como é o caso da madeira. Para isso, a Pesquisa Operacional oferece ferramentas que podem reduzir o material utilizado em uma linha de processo, entre esses recursos há ferramentas como o sequenciamento de tarefas. Com o uso de uma heurística apropriada é possível encontrar uma solução viável em um intervalo de tempo aceitável, o que torna o processo de otimização mais utilizável. Comparando o método exato com a heurística, essa se mostrou a ferramenta mais recomendada devido a encontrar um resultado satisfatório em um tempo aceitável com as necessidades do sistema produtivo e com uma diferença de 6% entre o resultado da heurística comparado com a solução ótima.

Palavras-chave: pesquisa operacional; planejamento e controle da produção; sequenciamento; máquinas paralelas; heurística.

ABSTRACT

This paper aims verify ways to optimize the tasks scheduling of a wood industry in Paraná. The search for a better use of resources is something recurrent in industries, since it is one of the ways to reduce costs and increase the final profit. This occurs, in particular, when the raw material for the process is a natural resource that may become finite, as is the case of wood. For this purpose, the use of Operational Research has resources that can reduce the material used in a process line, among these resources there are some tools, like tasks scheduling. With the use of a suitable heuristics is possible to find a viable solution nimbly, which makes the optimization process easier and of higher quality. Comparing the exact method with heuristics, the last one proved to be the most recommended tool because it finds a satisfactory result in an acceptable time with the needs of the production system and with a difference of 6% between the result of the heuristic compared to the optimal solution.

Keywords: operational research; production planning; scheduling; parallel machine; heuristic.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Área de PCP nas empresas.....	18
Figura 2 - Mecânica de empurrar e puxar.....	20
Figura 3 - Fluxograma das etapas para a resolução de problemas na pesquisa operacional.	22
Figura 4 - Ferramentas da Pesquisa Operacional.	23
Figura 5 - Gráfico de Gantt para o projeto de uma apostila.	29
Figura 6 - Resultado do <i>software</i> de programação matemática	44

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Estrutura dos procedimentos da pesquisa	34
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplo tempos de <i>setup</i>	31
Tabela 2 - Sequência e tempos de <i>setup</i> total	31
Tabela 3 - Medições Tempos de Processamento	37
Tabela 4 – Tempo médio de processamento das tarefas	39
Tabela 5 - Tempos de <i>setup</i> entre tarefas na Máquina 1	39
Tabela 6 - Tempos de <i>setup</i> entre tarefas na Máquina 2	40
Tabela 7 - Carteira de Pedidos	41
Tabela 8 - Dados fictícios	46
Tabela 9 - Exemplo Passo 1 do MH1	46
Tabela 10 - Exemplo Passo 2 do MH1	46
Tabela 11 - Exemplo Passo 3 e Passo 4 do MH1	46
Tabela 12 – Exemplo Passo 1 do MH2.....	47
Tabela 13 - Exemplo Passo 2 e Passo 3 do MH2	48
Tabela 14 - Exemplo Passo 4 e Passo 5 do MH2	48
Tabela 15 – Tempos de processamento de exemplo para o MH3.....	49
Tabela 16 - Tempos de processamento de exemplo para o MH3.....	49
Tabela 17 - Exemplo Passo 1 do MH3	49
Tabela 18 - Exemplo Passo 2 e Passo 3do MH3	49
Tabela 19 - Resultados dos métodos	50

LISTA DE SIGLAS

EDD	Earliest Due Date
FIFO	<i>First in First Out</i>
JIT	<i>Just in Time</i>
LIFO	<i>Last in First Out</i>
LPT	<i>Longest Processing Time</i>
MRP	<i>Material Requirements Planning</i>
MRP II	<i>Material Requirements Planning II</i>
PCP	Planejamento e Controle da Produção
PI	Programação Inteira
PL	Programação Linear
PLI	Programação Linear Inteira
PMP	Planejamento Mestre da Produção
PO	Pesquisa Operacional
SPT	<i>Shortest Processing Time</i>
TSP	<i>Travelling Salesman Problem</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	14
1.1.1	Objetivo Geral.....	14
1.1.2	Objetivos Específicos	14
1.2	Justificativa	14
1.3	Delimitação do Tema	15
1.4	Estrutura do Trabalho	15
2	REVISÃO TEÓRICA	17
2.1	Planejamento e Controle da Produção	17
2.1.1	Produção Empurrada e Puxada	19
2.2	Pesquisa Operacional	21
2.2.1	Programação Linear	24
2.2.2	Programação Inteira	25
2.3	Scheduling	27
2.4	Classificação de problemas de Sequenciamento	31
2.4.1	Máquinas Paralelas Não-Relacionadas.....	32
2.5	Heurística	33
3	METODOLOGIA	34
4	DESENVOLVIMENTO	36
4.1	Ambiente produtivo	36
4.2	Obtenção dos Dados	36
4.3	Modelo Matemático	41
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
5.1	Aplicação da Heurística	45
5.1.1	Método Heurístico 1	45
5.1.2	Método Heurístico 2	47
5.1.3	Método Heurístico 3	48
5.2	Análise de Resultados	50
6	CONCLUSÕES	51
	REFERÊNCIAS	52
	APÊNDICE A - Gráfico de Gantt do Modelo Exato	55
	APÊNDICE B - Gráfico de Gantt do Método Heurístico 1	57
	APÊNDICE C - Gráfico de Gantt do Método Heurístico 2	59

APÊNDICE D - Gráfico de Gantt do Método Heurístico 3.....	61
--	-----------

1 INTRODUÇÃO

A Pesquisa Operacional (PO) é uma das áreas de Engenharia de Produção que auxilia o tomador de decisão ao tomar a decisão final. Através de métodos quantitativos, é possível encontrar uma solução que irá providenciar resultados satisfatórios. Dentre os problemas que a PO pode solucionar, há a alocação de recursos para as atividades que uma empresa possui, buscando uma forma de otimizar a coordenação das operações.

Em uma indústria, o setor responsável pela programação da produção é o Planejamento e Controle da Produção (PCP). É ele que discute quais produtos devem possuir prioridades na sua produção e quais clientes serão atendidos primeiro. Essas informações acabam sendo expressas através do Planejamento Mestre da Produção (PMP). Com um PMP bem estruturado fica mais organizada a programação diária da produção e a previsão de demanda dos clientes, eliminando os desperdícios das linhas de processos. Sendo essa uma das premissas da filosofia *lean*, a qual é adotada para melhorar o processo da indústria, pensamento que as indústrias buscam nos dias de hoje e que são auxiliadas com a PO.

Dentro da PO há diversas técnicas para serem aplicadas em busca da solução ótima para o problema em questão. Uma dessas técnicas é o *scheduling*, que está voltada para o sequenciamento de tarefas. Neste caso os produtos da empresa, e seu uso busca fazer com que as necessidades do PMP sejam atendidas. Através desta ferramenta será possível atribuir os recursos para as atividades prioritárias, minimizando o tempo de processamento. Com isso, uma das aplicações do *scheduling* está no PCP, como forma de auxiliar na melhor programação da produção para que a empresa atinja os objetivos, de forma rápida, eficaz e que atenda às necessidades do cliente.

Desta forma, em uma empresa madeireira em que as operações variam o tempo de processamento e há variedade de produtos para diferentes clientes, a determinação de um sequenciamento ótimo é essencial para a minimização dos custos. Unindo também a importância que a matéria prima dessa indústria possui, necessita-se um melhor aproveitamento da linha de processo. Para isso, este trabalho busca mostrar os métodos exatos e heurísticos para se utilizar no sequenciamento de uma indústria madeireira com máquinas paralelas não relacionadas e *setups* dependentes a fim de minimizar o *makespan*.

1.1 Objetivos

Nesta seção são apresentados os objetivos gerais e os objetivos específicos que este trabalho busca alcançar.

1.1.1 Objetivo Geral

Otimizar a linha de processo de produção de uma indústria madeireira, diminuindo o tempo de término da última tarefa no ambiente em que as máquinas se encontram por meio das ferramentas que a PO proporciona, como como heurísticas e modelos de solução exata.

1.1.2 Objetivos Específicos

- i. Realizar o levantamento de dados, como os tempos de processamento e de *setup* de cada tarefa;
- ii. Construir um modelo de programação matemática para a atual situação;
- iii. Implementar métodos heurísticos ou exatos para solucionar o modelo;
- iv. Averiguar a eficiência dos métodos para a função objetivo escolhida;
- v. Avaliar os resultados comparativamente.

1.2 Justificativa

A necessidade de os processos produtivos não possuírem desperdícios é algo que todas empresas buscam, ou ao menos terem um aproveitamento melhor, tanto do material quanto do tempo. Para isso, as ferramentas que a PO oferece conseguem facilitar o objetivo de otimizar a linha de produção, diminuindo os custos operacionais e subseqüentemente aumentando o lucro final.

Por meio do sequenciamento das atividades operacionais a empresa consegue alcançar as necessidades que os clientes precisam de uma forma mais eficiente, eliminando gastos que poderiam estar atrapalhando no lucro final. Também,

há a possibilidade de remanejar alguns produtos para novos clientes, criando rentabilidade em produtos que antes não haveriam uso.

Outro ponto a ser considerado é a matéria prima que a indústria madeireira necessita, que é a própria madeira. Mesmo sendo um recurso renovável, ela pode acabar se tornando um recurso finito, caso haja um uso inadequado dessa matéria prima. A necessidade de conscientização das indústrias com o manejo da madeira, acaba voltando para a linha de processo, buscando diminuir ao máximo a perda de matéria prima entre as estações de processo. Além disso, deve-se pensar o tempo que o plantio de árvore necessita até o momento que está apta para ser cortada e levada até a indústria, sendo esse intervalo de 4 a 20 anos. Portanto, se o processo não estiver otimizado, há uma perda de tempo. Também há o ponto de vista sustentável acerca desta matéria prima, na qual as empresas devem possuir responsabilidade no seu manuseio.

1.3 Delimitação do Tema

A presente pesquisa envolve os temas de PCP e de PO, que buscam por meio das ferramentas, como o sequenciamento e as heurísticas, formas de otimizar a programação da produção da empresa. Aplicando esses conceitos, há o interesse no melhor aproveitamento de recursos que acabam não sendo tão nítidos no cotidiano, como melhorar o tempo de *setup*. Todavia, é necessário é necessário haver uma função objetivo que represente o problema e um método heurístico que consiga resolvê-lo devem ser alcançados.

Os dados utilizados para a realização desta pesquisa serão coletados a partir da análise documental em uma indústria madeireira situada no Estado do Paraná.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho se estrutura conforme a seguir. O primeiro capítulo apresenta uma breve introdução sobre o que será estudado, apresentando o problema, a justificativa por trás do trabalho e os objetivos gerais e específicos que pretende atingir após sua conclusão.

O segundo capítulo apresenta a revisão teórica necessária para o desenvolvimento do trabalho, apresentando os principais conceitos na área de PCP e PO que serão utilizados ao decorrer do estudo.

O terceiro capítulo discute sobre a metodologia utilizada na pesquisa, abordando os métodos de coleta e análise dos dados, além dos procedimentos realizados.

O capítulo quatro trata sobre o desenvolvimento do trabalho, abrangendo o processo de construção do modelo matemático, o método utilizado e o resultado encontrado.

O capítulo cinco discorre sobre a aplicação da heurística no problema do trabalho.

O capítulo seis aborda a conclusão da pesquisa dando uma perspectiva final sobre os resultados obtidos.

2 REVISÃO TEÓRICA

Neste capítulo são abordados os principais temas e o problema que o presente trabalho irá discorrer. Os temas tratados são PCP, PO, *Scheduling* e Heurística.

2.1 Planejamento e Controle da Produção

Para iniciar o presente trabalho é vista a definição do que é o PCP por Dalvio Tubino (TUBINO, 2017, p. 1).

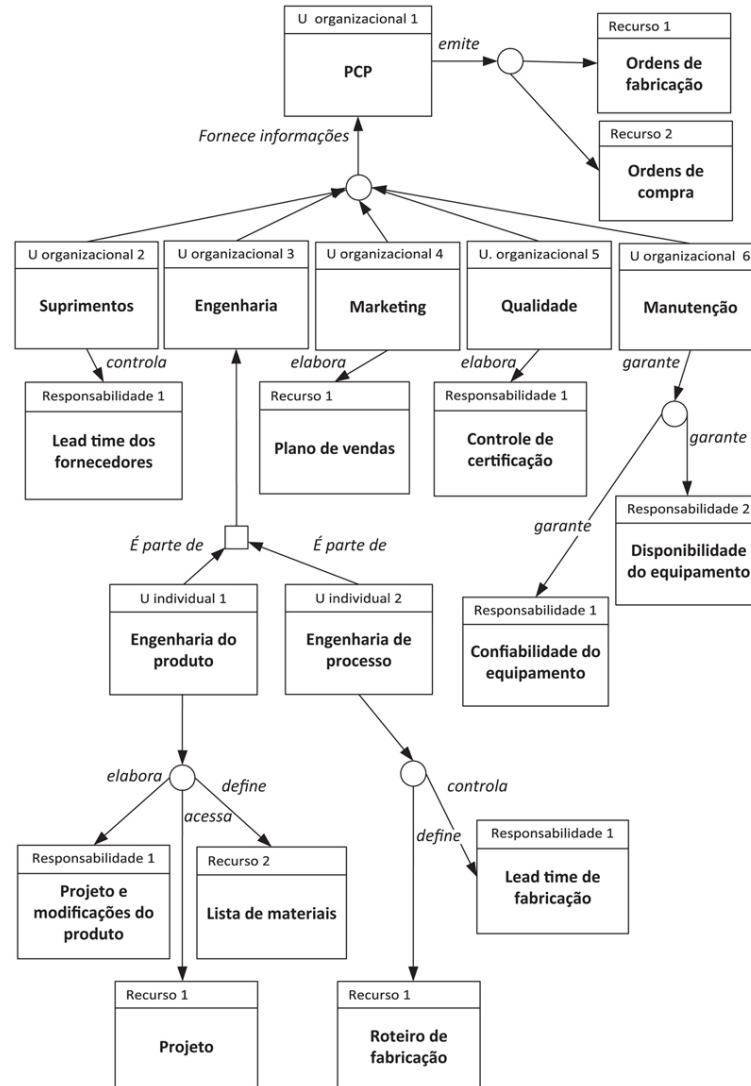
Planejamento e Controle da Produção como setor de apoio, dentro do sistema produtivo, para tratar estas informações, com base no desenvolvimento de quatro funções: Planejamento Estratégico da Produção (longo prazo), Planejamento-mestre da Produção (médio prazo), Programação da Produção (curto prazo) e Acompanhamento e Controle da Produção (curto prazo).

O objetivo principal desse setor é garantir que os processos de produção ocorram de forma eficaz e eficiente, produzindo os pedidos de acordo com o que o cliente deseja (LOPES, 2008).

Os benefícios de uma correta implantação do PCP são divididos em quantitativos e não quantitativos. Os quantitativos compreendem: o nível de serviço dos clientes; diminuição do inventário de material e produtos acabados; menor *lead time*; no geral tudo aquilo relacionado a produção que pode ser mensurável. Já os não quantitativos, e de forma geral mais complexa, são: melhor tomada de decisão; maior controle e confiança sob os dados; maior comprometimento da equipe (CARDOSO, 2021).

Como o PCP deve estar relacionado com todos os setores da empresa, pois é o setor que trata de todas as informações, ele deve replicá-las ao próximo. A Figura 1 explicita todo o relacionamento do PCP com as outras áreas da empresa (GUERRINI, 2018).

Figura 1 - Área de PCP nas empresas.



Fonte: Guerrini (2018)

De forma a facilitar a aplicação do PCP nas indústrias, costuma-se classificar como os sistemas de produção são organizados para atender os clientes. Primeiramente se é uma manufatura de bens (objetos tangíveis) ou prestador de serviços (transporte de pessoas, serviços médicos, entre outros exemplos). Após a primeira caracterização tem-se a classificação mais significativa que é a padronização dos produtos, que podem ser Sistemas Contínuos, Sistemas em Massa, Sistemas em lotes e Sistemas Sob Encomenda (TUBINO, 2017).

De forma conclusa, é possível notar que o PCP possui a importante função de otimizar a utilização dos recursos, sempre tendo como metas aquelas impostas pela produção a fim de satisfazer o desejo dos clientes (BISPO *et al.*, 2015).

2.1.1 Produção Empurrada e Puxada

Nos dias atuais as empresas possuem sistemas de produção mistos, de forma que possam atender as diversas necessidades (seja de produção, seja de demandas previsíveis). Esses fatores influenciam no modelo de produção que a empresa acaba adotando, uma produção mista consegue unir ambos lados positivos. A maior dúvida é de como irá dinamizar a programação e como gerenciá-los (TUBINO, 2017).

Segundo Gstettner e Kuhn (1996, apud BARCO; VILLELA, 2008) “sistemas empurrados de produção são sistemas onde a produção é controlada por um sistema central de planejamento que considera previsões como futuras demandas”.

Um dos métodos mais utilizadas para calcular essa previsão futura da demanda são os *softwares* de *Material Requirements Planning* (MRP), ou cálculo das necessidades de materiais, e o *Material Resources Planning II* (MRP II), planejamento dos recursos de manufatura. Ambos os programas utilizam do gerenciamento do estoque e a necessidade da demanda para calcular as necessidades futuras, a fim de atender o plano mestre da produção (CORRÊA; CORRÊA, 2017).

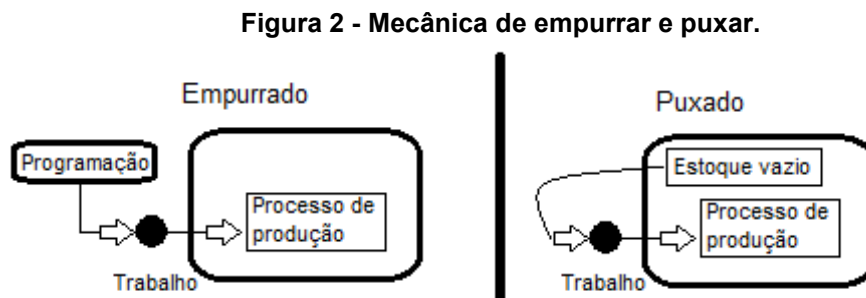
Para Moreira (2012), a produção puxada se inicia no término da linha de produção, ou, com o cliente. No início o processo caminha de trás para frente, com cada posto requisitando um número de produtos necessários para a estação anterior, caso não haja requisição não haverá estoque intermediário.

A produção puxada é uma produção mais voltada a filosofia *lean*, em que o seu lema é ter uma produção enxuta que só se é produzido o necessário (apenas aquilo que o cliente pede). Inicialmente aplicada pelos japoneses com o Toyotismo, esse tipo de produção possui algumas características símbolos, como o *Just In Time* (JIT) e os *Kanbans*. O JIT é a produção de uma estação estar “no tempo exato” da próxima estação, assim irá diminuir o tempo entre a chegada de um pedido até a entrega dele (*lead time*), de forma que haverá redução de custos, processo com alta qualidade e flexibilidade e gerando um fluxo contínuo e suave (CORRÊA; CORRÊA, 2017).

O *Kanban* (palavra de origem japonesa que possui significado de *cartão*) age como o disparador das ordens de produção em estágios anteriores do processo produtivo, portanto, um processo só irá se iniciar após o término do seu precedente. Normalmente se utiliza dois tipos de cartões: *kanban* de produção e *kanban* de transporte, em que o primeiro irá informar a produção de um lote, no cartão irá ter

informações gerais da produção. Já o de transporte é para um controle mais interno, no qual irá ser autorizado o movimento do produto dentro da fábrica (CORRÊA; CORRÊA, 2017).

A maior diferença entre cada um dos sistemas está no mecanismo que inicia o movimento de trabalho. No sistema empurrado, o MRP programa a liberação dos processos com base na demanda, enquanto o sistema puxado, o *kanban* só se inicia após o término do *status* do sistema do processo anterior. De forma ilustrativa a Figura 2 mostra o funcionamento destes processos. A parte da esquerda mostra a informação externa chegando e empurrando a produção. A parte da direita da figura demonstra as informações internas agindo como gatilho para puxar a produção (HOPP; SPEARMAN, 2008).



Fonte: Adaptado de Hopp e Spearman (2008, p. 357)

Mesmo com a necessidade produtiva mostrando que o ideal é o mix entre os dois tipos de produção, há evidências que comprovam que a programação puxada é a que deve ser predominante dentro de uma empresa, visto que com ela há uma maior redução de material em processos, além de gerar benefícios para a função de planejamento e para as demais funções do sistema produtivo e também na lógica de produção, criando um sistema catalisador de incremento contínuo da produtividade (TUBINO, 2017).

Para otimizar o processo da produção, melhorando a alocação de recursos e diminuindo os tempos de processamento há algumas ferramentas que irão auxiliar na tomada de decisão. Para melhorar a programação da produção a PO oferece vários modelos matemáticos para diferentes problemas que possam surgir no cotidiano da empresa (LUSTOSA *et al.*, 2008).

2.2 Pesquisa Operacional

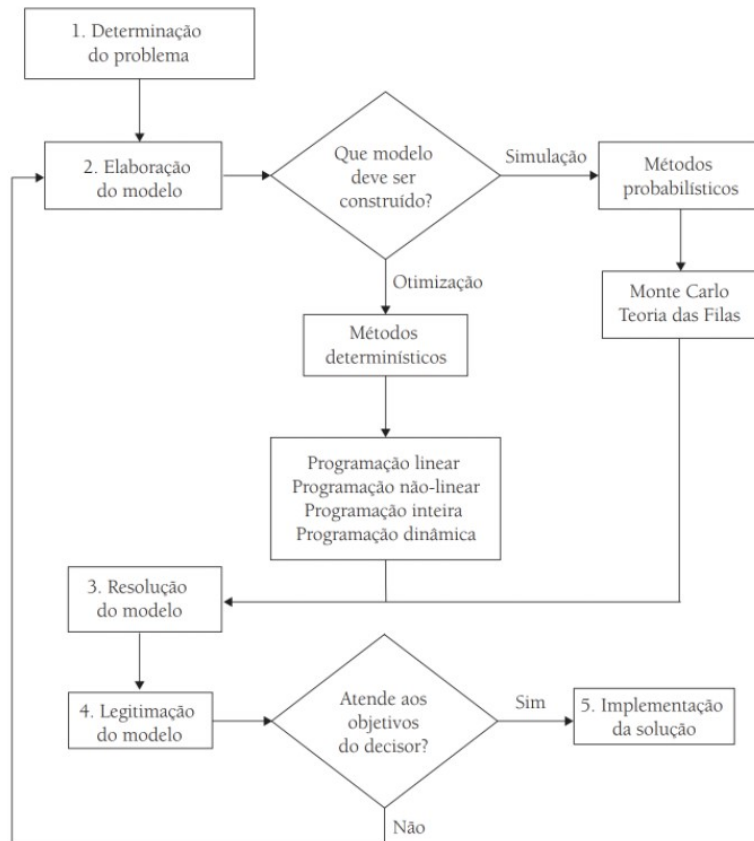
A origem da PO vem da Inglaterra durante a Segunda Mundial, quando cientistas britânicos buscavam saber, de forma científica, como poderiam tomar suas decisões a fim de melhorar a utilização o material que possuía para a guerra. Após a guerra, seu uso passou para a produtividade no setor civil (TAHA, 2008).

Dois fatores desempenharam papel fundamental no rápido crescimento da PO no período pós-guerra. O primeiro foi o progresso substancial das técnicas da PO. Muitos cientistas ao ouvirem sobre as histórias das equipes de PO resolveram desenvolver estudos sobre o que geraram resultados expressivos para a área (como o método simplex, desenvolvido por George Dantzig em 1947). O segundo fator foi a “revolução computacional”, época em que havia a necessidade de realizar cálculos com grandes números e cada vez mais rápido. Com a ascensão dos computadores (assim como os computadores pessoais) a facilidade de se obter tais cálculos com *softwares* especializados facilitou muito o desenvolvimento da PO (HILLIER; LIEBERMAN, 2013).

Segundo Moreira (2018, p. 3) “a Pesquisa Operacional lida com problemas de como conduzir e coordenar certas operações em uma organização, e tem sido aplicada a diversas áreas”. Já para Andrade (2015, p. 10) “um estudo de Pesquisa Operacional consiste, basicamente, na construção de um modelo para um sistema real que sirva como instrumento de análise e compreensão [...] com o objetivo de levar o sistema a apresentar o desempenho desejado”.

Um trabalho de PO pode ser desenvolvido de diversas maneiras, com possibilidade de várias metodológicas. Entretanto, a partir dos anos 80, os estudos que foram sendo realizados possuíam um roteiro mínimo, que poderia ser aplicado a qualquer estudo futuro, e o fluxograma da Figura 3 pode ser utilizado como esse mapa de estudo (LONGARAY, 2013).

Figura 3 - Fluxograma das etapas para a resolução de problemas na pesquisa operacional.

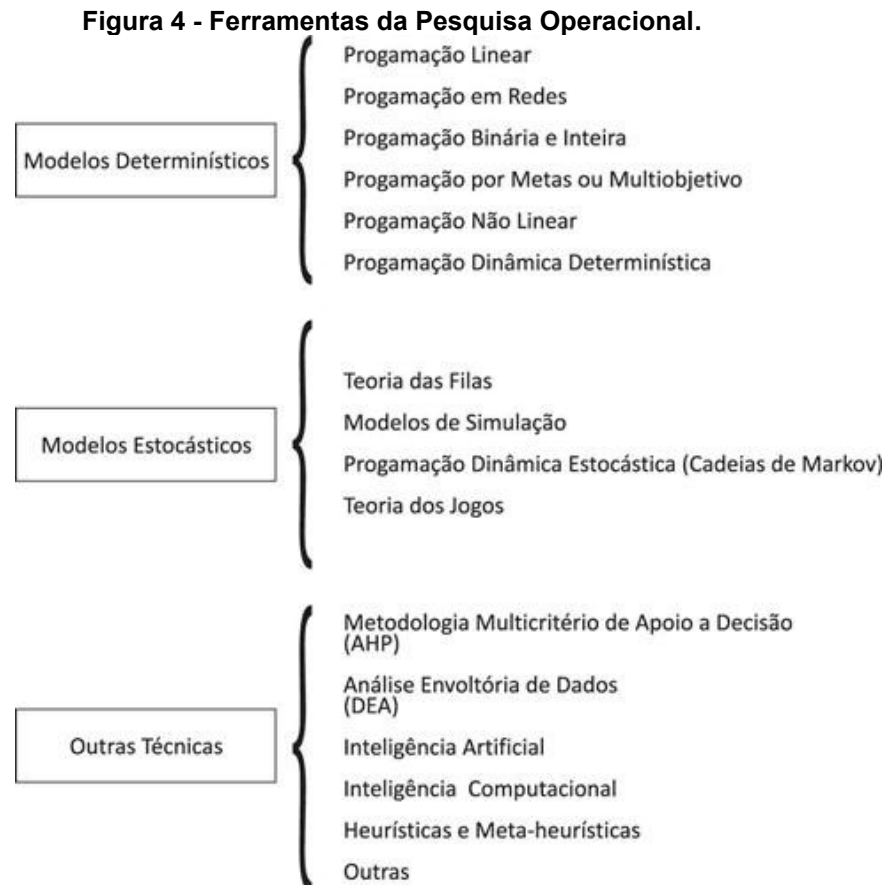


Fonte: Longaray (2013)

- Definição do problema: delimita os aspectos que são problemáticos;
- Elaboração do modelo: define a técnica a ser utilizada para resolver o problema e qual algoritmo matemático será usado (métodos determinísticos ou probabilísticos);
- Resolução do modelo: realiza o cálculo do algoritmo, achando a sua solução ótima (casos de otimização) ou alternativa viável (simulação);
- Análise de sensibilidade: altera-se alguns valores finais de algumas variáveis para observar o comportamento do restante do modelo;
- Legitimação do modelo: reconhecimento de que o modelo realizado atende as necessidades do pedinte;
- Implementação da solução: onde o algoritmo do modelo é posto em prática.

Para alcançar a resolução do modelo, há algumas ferramentas que auxiliam a chegar no objetivo proposto, e dependendo do modelo do problema algumas ferramentas são mais recomendadas, conforme Figura 4. Nos casos dos Modelos

Estocásticos, busca-se uma solução viável que é o resultado do modelo quando obedece a todas as restrições propostas. Já no caso dos Modelos Determinísticos encontra-se uma solução ótima, que além de ser viável ela também traz o melhor resultado da função objetivo (BELFIORE; FÁVERO, 2012).



Fonte: Belfiore e Fávero (2012). Adaptado de Eom e Kim (2006)

As ferramentas de programação possuem como meta resolver os problemas de alocação de recurso resolvendo problemas de atribuição e distribuição de matéria prima para as diversas tarefas que o problema apresenta. Como na maioria dos casos não é possível executar todas as atividades no maior grau de produtividade, a programação busca otimizar todos os recursos e maximizar (ou minimizar) a função objetivo, levando em conta as restrições que a tarefa possui (ANDRADE, 2015).

2.2.1 Programação Linear

A Programação Linear (PL) é uma das técnicas mais utilizadas para a resolução de problemas, devido a sua simplicidade e ser uma técnica que é de fácil acesso (pode-se resolver tanto a mão, quanto em *softwares*). As aplicações mais usuais são utilizadas em sistemas estruturados, como de finanças, controles de estoques e produção (DA SILVA; GONÇALVES; MUROLO, 2017).

Utilizando um modelo matemático para descrever o problema, a Programação Linear (PL) tem esse nome pois todas as suas funções (função objetivo e restrições) são lineares. No caso da palavra programação não significa que ela é resolvida exclusivamente através de *softwares*, mas que possui uma definição de planejamento, portanto a PL busca a solução ótima (resultado com melhor valor), por meio de um planejamento das funções lineares propostas (HILLIER; LIEBERMAN, 2013).

Para Taha (2008) a PL deve ter três propriedades básicas:

1. Proporcionalidade: cada variável deve contribuir diretamente e proporcionalmente à função objetivo e nas restrições;
2. Aditividade: a soma das variáveis de restrições e da função objetivo será igual à soma direta das contribuições individuais de cada variável;
3. Certeza: todos os coeficientes das incógnitas da função objetivos e das restrições são determinísticos (são constantes conhecidas).

Segundo Belfiore e Fávero (2012) o objetivo final de um problema de programação linear é determinar a solução ótima, que é o maior valor (para problemas de maximização) ou menor valor (para problemas de minimização), satisfazendo todas as restrições (representadas por inequações). Muitos são os problemas práticos que se sustentam sob esse modelo, como nos exemplos seguintes:

- Problema de mix de produção: busca encontrar a quantidade ideal a ser fabricada de certo produto, maximizando o resultado da empresa;
- Problema da mistura: tem como objetivo encontrar o menor custo ou o maior lucro, a partir da mistura de ingredientes para produzir um ou vários produtos;
- Planejamento agregado: irá obter a solução que minimize, soma dos custos, custo de mão de obra, custo de hora extra, os custos totais de mão de obra, produção e estoque;

- Problema de produção e estoque: minimização da soma dos custos de produção e manutenção de estoque, através da restrição de atender a demanda dos clientes, ter um valor de estoque mínimo e que não ultrapasse a capacidade de produção e de armazenagem.

Para resolver os problemas de PL o analista pode utilizar do método gráfico ou de métodos algébricos – que engloba o *simplex* e utilizando *softwares*. O método gráfico permite ao usuário entender a forma que se obtém a solução, através do relacionamento entre as restrições e a função objetivo. Mesmo essa ferramenta sendo realizada de forma mais prática, ela possui algumas limitações. O uso dela se restringe a apenas modelos lineares pertencentes a duas dimensões (duas variáveis), além de que há grande dificuldade para realizar quando há um número muito grande de variáveis (LONGARAY, 2013).

O método mais utilizado para solucionar problemas lineares é o método *simplex*. Desenvolvido por George Dantzig em 1947, o método é extremamente eficiente e pode ser utilizado de forma manuscrita para problemas pequenos. Todavia, como é uma ferramenta potente, ela é muito utilizada para problemas com várias restrições e variáveis, sendo necessário *softwares* para poder implementar as funções (HILLIER; LIEBERMAN, 2013).

2.2.2 Programação Inteira

Para Colin (2017), problemas de Programação Inteira (PI), ou Programação Linear Inteira (PLI), são aqueles que uma ou mais variáveis se encontram na família dos números inteiros. Para ele, há uma subdivisão de dois grupos nos números inteiros no seu uso em programação, a classe dos genéricos (1, 2, 3, ...) e os binários (0 e 1). Estes últimos representam problemas do tipo sim e não. No geral, a programação inteira é classificada em: problema de programação inteira pura (todas variáveis são inteiras), inteira mista (parte das variáveis é do tipo inteiro e o restante é do tipo real) e programação inteira binária (todas variáveis assumem 0 ou 1).

O algoritmo mais utilizado para a resolução de PLI é o *branch-and-bound*. A ideia geral deste algoritmo é de dividir o conjunto de possíveis soluções em subproblemas, calculando os limites superiores e inferiores desse subproblema e eliminando alguns grupos menores conforme restrições já conhecidas. Esse processo irá se repetir até encontrar uma solução ótima, para facilitar o uso da ferramenta é

desenhado uma árvore de soluções para cada etapa realizada, de forma que os ramos finais sejam as soluções que se busca (LACHTERMACHER, 2016).

Outro algoritmo que pode ser utilizado para a solução desse tipo de problema é o plano de cortes. Inicialmente se resolve o problema original sem as restrições de integralidade, podendo ser pelo método *simplex* ou método gráfico. A próxima etapa será a introdução de um corte (uma restrição funcional para reduzir o espaço de soluções) essa etapa se repetirá até não haver mais possibilidades, e assim utilizar algum método novamente para encontrar a solução ótima (BELFIORE; FÁVERO, 2012).

Belfiore e Fávero (2012) mostram alguns dos mais famosos problemas que a programação inteira ajuda a resolver no âmbito da PO. Como por exemplo o problema do caixeiro viajante, problema da mochila, problema de localização de facilidades:

- Problema do caixeiro viajante: resolvido através da programação inteira binária, esse problema também é conhecido como *Travelling Salesman Problem* (TSP), busca resolver o problema do vendedor que precisa sair de uma cidade X e passar por todas as cidades (nós) uma única vez, e retornar à cidade X , minimizando o custo total. As variáveis binárias dirão se o caixeiro irá diretamente da cidade i para a cidade j (ou seja, a variável será igual a 1) ou caso ele não vá (variável igual a 0);
- Problema da mochila: busca determinar quais objetos a pessoa irá carregar dentro da sua mochila dentre n possibilidades, sendo que a mochila possui um limite máximo de peso e cada objeto tem seu peso próprio e um valor de utilidade. Também resolvido através da programação binária, tem como objetivo maximizar a soma dos valores de utilidade de todos os objetos;
- Problema de localização de facilidades: esse problema tem como objetivo determinar o número de localidades (fábricas, centros de distribuição, portos, aeroportos ou terminais), selecionar em quais locais eles serão instalados e distribuir a produção dos produtos finais para atender a demanda com o menor custo possível. Com os números binários, irá se decidir se a localidade i será aberta ou não, além de em qual local será e se a instalação produzirá ou não certo produto.

Os modelos das programações lineares e inteiras propõem uma decisão racional com a aplicação de ferramentas que possam provar o motivo de tais respostas. Porém, no cotidiano os tomadores de decisões acabam desenvolvendo modelos próprios que são de fácil acesso e rápida aplicação, o resultado obtido não é o melhor, mas é uma solução razoável e que está dentro do esperado. Essa estratégia de solução de heurística que irá obter, de alguma forma, um resultado parcialmente correto (ANDRADE, 2015).

2.3 Scheduling

Scheduling é atividade que se propõe sequenciar as tarefas que serão realizadas para que a demanda dos clientes seja atendida conforme o planejamento prometido, definindo em palavras mais objetivas, seria a “programação” ou “agendamento” da produção. É um momento que exige atenção, pois caso seja realizado de forma ruim poderá causar filas, estoques desnecessários, causando aumento de custos e redução de lucros. Porém a realização dessa atividade não é fácil, realizada dentro do PCP, ela deve estar alinhada com as restrições de capacidade, a quantidade de matéria prima que possui e as paradas para manutenção das máquinas (LAGE JÚNIOR, 2019).

Para Pinedo (2016) o *scheduling* é um processo de tomada de decisão que é utilizado em várias empresas. Possui um importante papel na maioria das empresas, além de ser responsável pelo manejo de materiais. Além de conseguir prever o uso de transporte e como será distribuído seus produtos.

Um aspecto deste problema é a ordenação das operações de cada máquina (o sequenciamento). Um sequenciamento que faça com que as operações sejam feitas na ordem correta é dito possível ou executável. Nesta ordenação pode haver a necessidade de priorizar certo sequenciamento, que faça aumentar a produção de um certo produto. Essa ferramenta busca, de forma geral, obter uma programação que minimize determinado custo (REIS, 1996).

Lage Júnior (2019) define que antes de se começar a realizar uma programação é necessário encontrar a resposta das seguintes perguntas:

- Quais são as tarefas envolvidas no processo e suas características? Deve-se encontrar o tempo de processamento, data prometida e de liberação;

- Qual o ambiente produtivo? É uma única máquina? São máquinas paralelas? É um *flow shop*? É um *job shop*?
- Os tempos de *setup* são dependentes entre um processo e outro?
- Qual a medida de desempenho de interesse? Qual o objetivo que se almeja alcançar? Irá medir através do tempo total de fluxo, número de tarefas atrasadas ou *makespan*?

Colin (2017) estabelece que através de heurísticas há algumas regras que facilitam a programação da produção. Um dos métodos mais conhecidos é a regra de despacho, que se resume a um procedimento de ordenação. Ela irá selecionar a melhor ordem de produção dentro daquelas disponíveis, para otimizar o tempo de processamento das máquinas. Dentro da regra de despacho há algumas regras internas que são mais conhecidas:

- SPT (*Shortest Processing Time* – menor tempo de processamento): começar o processo com aquela que possui o menor tempo de processamento;
- LPT (*Longest Processing Time* – maior tempo de processamento): iniciar de acordo com o maior tempo de processamento;
- EDD (*Earliest Due Date* – menor tempo de entrega): priorizando a menor data de entrega;
- FIFO (*First In First Out* – primeiro a entrar é o primeiro a sair): priorizar aquela que está há mais tempo disponível;
- LIFO (*Last In First Out* – último a entrar é o primeiro a sair): sequenciar pensando naquela que está há menos tempo disponível.

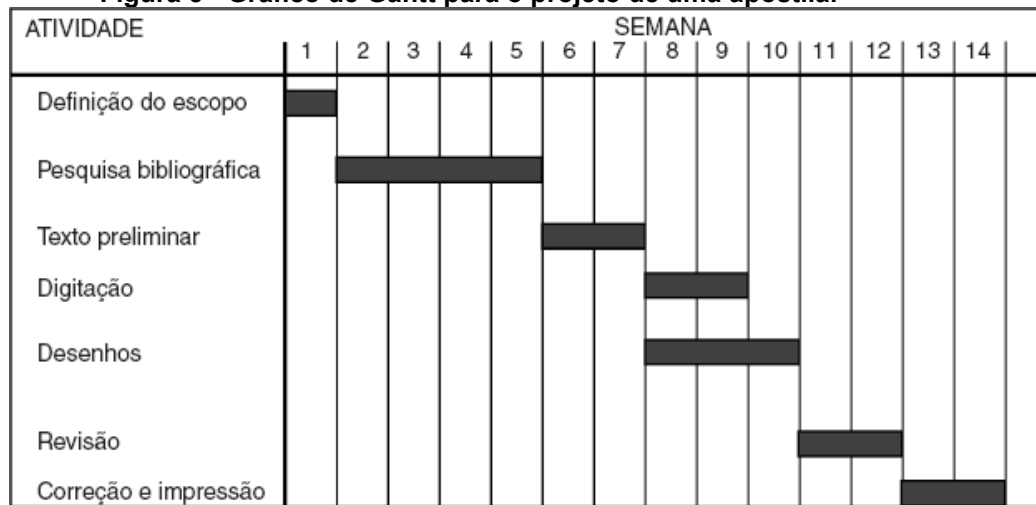
Das regras apresentadas não há uma melhor do que a outra. Cada uma possui um melhor resultado para determinada condição de disponibilidade de capacidade produtiva. Quando essa condição é mudada a regra vigente pode perder a sua eficiência. Isso evidencia que mesmo as regras tendo um papel de melhorar o desempenho produtivo, não significa que elas possuam grande influência. Todavia, há algumas preferências na hora de escolher as regras: preferir as dinâmicas no lugar das regras estáticas, preferir as globais em relação às locais (CORRÊA; CORRÊA, 2017).

Um problema de sequenciamento possui como variáveis o número de máquinas (que pode ser 1, 2, ..., m) e as tarefas (variando de 1, 2, ..., n). Os atributos

relevantes para o problema são r_i (*ready-time* é o tempo em que a primeira tarefa poderia começar) e d_i (*due-date* que é a data de vencimento que o momento que a última operação deve terminar), em que i é a o número da tarefa em questão. A diferença entre d_i e r_i é o tempo total permitido para essa tarefa (CONWAY; MAXWELL; MILLER, 1967).

Uma das ferramentas mais usuais para ajudar a programação é o Gráfico de Gantt. Desenvolvido por Herry Gantt em 1917, esse gráfico de barras é usado para ilustrar o avanço das etapas de cada operação em uma linha de operação ou projeto. O gráfico é estilizado da forma em que o eixo x represente o tempo e o eixo y os recursos que a tarefa irá passar, conforme demonstrado na Figura 5. Utilizado em diversas áreas, esta ferramenta consegue apresentar de forma visual o controle da produção, assim o analista irá visualizar o tempo que cada tarefa necessita para ser concluída e qual será a próxima estação que o produto irá passar (TUBINO, 2017).

Figura 5 - Gráfico de Gantt para o projeto de uma apostila.



Fonte: Andrade (2015)

Gantt (1919) baseia a sua ferramenta em dois princípios:

- Medição das tarefas pelo seu tempo de duração;
- O espaço do gráfico é uma representação da quantidade de atividades que devem ser realizadas naquele tempo.

Os sistemas de programação, ou gráfico de Gantt, podem ser considerados sistemas de carregamento finito ou infinito, e sistemas de programação para trás ou para frente no tempo:

- Finito: considerada a capacidade dos recursos transformadores como finitos. Verifica-se se a data prometida será cumprida, caso não, a entrega será reagendada;
- Infinito: não considera as capacidades dos centros de trabalho, alocação de tarefas é baseada no prazo de entrega, o que acaba ultrapassando o limite diário;
- Para trás: as tarefas são alocadas para o último momento disponível. Começa a programar as tarefas a partir da última tarefa e no dia da entrega, pensando do fim ao começo;
- Para frente: programa-se a partir do momento atual, determinando a data de término após a soma das durações das tarefas da data de início.

O *scheduling* possui interação com várias outras funções da empresa, interações que podem possuir diferentes graus de necessidade conforme cada situação. Comumente a programação de tarefas é realizada junto com sistemas de ERP (*Enterprise Resource Planning* – Planejamento de Recursos Empresariais), que facilita o acesso da informação de todas as tarefas que um produto precisa passar. As tarefas (habitualmente chamada de *jobs*) são o processo em que a matéria prima passa por máquinas para seguirem a linha de processo, o produto pode necessitar passar por certa sequência de máquinas ou todos possuem a mesma sequência de ordem (PINEDO, 2016).

Um dos dados de entrada que é importante realçar a respeito do sequenciamento é o tempo de *setup*, que é o tempo necessário antes de se iniciar a tarefa na máquina. O *setup* pode ser independente ou dependente da sequência de tarefas que está sendo aplicada, ou seja, depender da tarefa que antecedeu ela na máquina, devido a alguma peça que necessite ser trocada em específico para cada tarefa, algum insumo de cada tarefa ou necessitar de um tempo para baixar a temperatura da máquina para que possa receber a próxima tarefa. No caso da independência da sequência, o tempo de *setup* é uma constante para a tarefa que será processada. Quando há dependência da sequência, o valor do tempo irá variar de acordo com a dificuldade de trocar as peças da máquina que tarefa atual utiliza para as peças da que a próxima tarefa necessita (KHALILI; NADERI, 2015).

Para Pinedo (2016), uma das funções objetivo a serem minimizadas em problemas de sequenciamento é o *makespan*, que é o tempo de conclusão da última

tarefa a deixar o sistema. Uma forma de visualizar problemas de minimização do *makespan* em que as tarefas possuem *setups* dependentes é pela mesma lógica do problema do Caixeiro Viajante (*TSP*), já que o problema do caixeiro é encontrar a menor rota entre as cidades e visitando todas elas, o problema de minimização do *makespan* com *setups* dependentes é de encontrar o menor tempo total de processamento das tarefas. Um exemplo de *setups* dependentes pode ser visto na Tabela 1, em que há 4 tarefas e seus tempos dependem da sequência. Cada valor representa o tempo de *setup* que necessita do *job* da linha para o *job* da coluna. As sequências e os tempos de *setup* total podem ser encontrados na Tabela 2:

Tabela 1 - Exemplo tempos de *setup*

Jobs	J₁	J₂	J₃	J₄
J₁	0	30	50	90
J₂	40	0	20	80
J₃	30	30	0	60
J₄	20	15	10	0

Fonte: Adaptado de Baker e Trietsch (2019)

Tabela 2 - Sequência e tempos de *setup* total

Sequência	Tempo de <i>setup</i> total
1-2-3-4-1	$30 + 20 + 60 + 20 = 130$
1-2-4-3-1	$30 + 80 + 10 + 30 = 150$
1-3-2-4-1	$50 + 30 + 80 + 20 = 180$
1-3-4-2-1	$50 + 60 + 15 + 40 = 165$
1-4-2-3-1	$90 + 15 + 20 + 30 = 155$
1-4-3-2-1	$90 + 10 + 30 + 40 = 170$

Fonte: Adaptado de Baker e Trietsch (2019)

A Tabela 2 mostra que o tempo total de não produtividade (tempo de *setup*), depende da sequência das tarefas, a fim de minimizar o tempo do total de produção, não é interessante colocar uma sequência que gere um alto tempo de não produtividade.

2.4 Classificação de problemas de Sequenciamento

Segundo Nagano, Moccellini, Lorena (2004) os problemas de *scheduling* são classificados conforme o fluxo de operações nas máquinas, podendo ser: Máquina única; Máquinas paralelas; *Job shop*; *Flow shop*; *Open shop*.

Para Conway, Maxwell, Miller (1967) um problema específico de sequenciamento através de quatro tipos de informações:

- As tarefas e operações a serem processadas;
- O número e tipos de máquinas que compreendem o ambiente;
- Disciplinas que restringem a maneira que as tarefas são feitas;
- O critério que será avaliado.

Os fluxos de operações das máquinas diferem conforme a composição e organização dos recursos. É denominado por n o número de tarefas para sequenciar, m o número de máquinas totais disponíveis (T'KINDT; BILLAUT, 2006).

Um problema de sequenciamento pode ser descrito através de $\alpha | \beta | \gamma$. O campo α , que contém apenas um único valor, representa o ambiente em que o problema de sequenciamento se encontra (se é máquina única, máquinas paralelas, máquinas paralelas não relacionadas, *job shop*, *flow shop*). O campo β contém detalhes da característica do processamento (se são tarefas preemptivas, *setup* depende da sequência, *no-wait*, entre outras), também pode não contar nenhuma informação nesse campo. Por fim, o campo γ descreve o objetivo que o problema almeja, normalmente contém apenas uma entrada (PINEDO, 2016).

Para este trabalho, o modelo utilizado é de Máquinas Paralelas Não-Relacionadas, o qual é aprofundado na próxima seção.

2.4.1 Máquinas Paralelas Não-Relacionadas

Para Arenales *et al.* (2007) há três categorias de ambientes de máquinas paralelas: idênticas, uniformes e não relacionadas. O que difere cada ambiente são os tipos de máquinas que estão disponíveis: idênticas possuem o mesmo tempo de processamento e de *setup* para os mesmos *jobs*; em máquinas uniformes há uma proporcionalidade dos tempos entre as máquinas; e em máquinas não relacionadas não há nenhuma relação dos tempos entre as máquinas.

Segundo Pinedo (2016), o ambiente de máquinas paralelas não-relacionadas é definido através da denotação R_m , que é o caso em que há m máquinas diferentes em paralelo. Uma máquina k pode processar a tarefa i em uma determinada velocidade, e a máquina $k+1$ pode processar a mesma tarefa com diferente velocidade, o que acarreta em tempos de processamentos diferentes.

2.5 Heurística

Método heurístico é um procedimento que encontra uma solução viável preferencialmente boa, não necessariamente ótima e com rapidez. Quando bem aplicado ele gera um resultado bem próximo da solução ótima. Normalmente é um algoritmo iterativo que irá procurar uma nova solução que pode ser melhor do que a solução encontrada anteriormente, podendo ser aplicada para problemas com mais de 100 variáveis e com duas funções objetivo. Caso a duração da busca acabe se tornando muito extensa, é possível parar as iterações e ficar com a última solução encontrada, que será a melhor até então (HILLIER; LIEBERMAN, 2013).

Conforme Pinedo (2016), o problema de sequenciamento com *setups* dependentes pode utilizar da mesma estratégia que o problema do TSP. Para isso Taha (2008) explica a aplicação do algoritmo do TSP. O problema é de um viajante que precisa percorrer apenas uma vez todas as cidades em uma menor rota. A primeira cidade escolhida irá se conectar com a que estiver mais próxima a ela, até se formar um circuito. Todavia a qualidade do resultado desse método é dependente do nó inicial. O ideal é realizar algumas tentativas, a fim de comparar qual o menor valor. De forma análoga o sequenciamento com *setups* dependentes irá verificar qual a tarefa possui o menor tempo de *setup* entre a tarefa atual e a próxima tarefa.

O modelo heurístico de solução apenas garante uma solução viável, não a ótima, porém, é muito útil para problemas grandes e complexos. A utilização da heurística e tem sua vantagem que não precisa conhecer a função que será otimizada e também é possível adaptar o seu uso para casos particulares (COLIN, 2017).

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa pode ser classificada segundo alguns critérios apresentados por Cauchick (2018). É uma pesquisa de abordagem quantitativa que utilizará métodos de pesquisa de modelagem, devido a testar hipóteses e permitir a replicação por outra pessoa. Há a manipulação das variáveis que está sendo replicadas no modelo e não na realidade, por isso é considerada de modelagem.

O problema pode ser considerado da classe np-difícil, em que np é *Non-Deterministic Polynomial time* (Tempo polinomial não determinístico). A sua dificuldade vem de se obter uma solução ótimo em um tempo aceitável, quando o número de tarefas aumenta.

A divisão dos procedimentos da pesquisa irá seguir uma ordem de quatro fases. Conforme descritas no Quadro 1:

Quadro 1 - Estrutura dos procedimentos da pesquisa

<p>Fase 1 - Definição do escopo do problema Reconhecer a linha de processo e suas variáveis, definir o objetivo. Coletar os tempos das tarefas</p>
<p>Fase 2 - Formulação do modelo matemático Representar o modelo matemático e aplicar em uma programação computacional</p>
<p>Fase 3 – Comparar o algoritmo com métodos heurísticos Comparar o resultado do algoritmo exato com métodos heurísticos possíveis para se aplicar</p>
<p>Fase 4 – Validação e conclusões Verificar quais foram os resultados obtidos para a função objetivo e validar qual o melhor método</p>

Fonte: Autoria própria (2022)

A primeira fase irá compreender a inspeção da atual situação que a linha de processo se encontra, coletando os tempos de processamento e de *setup* durante um determinado período para se calcular a média e poder trabalhar com esses tempos. Esta fase irá verificar se há restrições de tarefas que só podem ser executadas em uma máquina específica e observar de que modo as máquinas operam, se são iguais ou há certa diferença entre elas.

A segunda fase refere-se à formulação do modelo matemático, com o intuito de quantificar os dados coletados na fase anterior. Irá ser formulado um modelo matemático que represente a situação que busca verificar, também definir a função objetivo que irá ser trabalhada. Com o modelo pronto irá rodar ele em um programa para solucioná-lo e encontrar a solução ótima para uma instância com 10 tarefas.

A terceira fase tem como foco o desenvolvimento de métodos heurísticos construtivos para ser aplicados no problema e encontrar o resultado. Serão aplicados três métodos heurísticos a fim de avaliar se os resultados encontrados estão próximos daquele da solução ótima, de modo a ter um método heurístico com melhor eficiência para aplicar futuramente com 15 tarefas.

A última fase traz como resultados e conclusões dos métodos aplicados. Discutindo as vantagens e desvantagens de cada método, e também verificar o quão longe estão os resultados das heurísticas ao da solução ótima. Será feita uma comparação dos resultados obtidos e será feita uma discussão sobre quais as possíveis melhorias possam ser feitas para os próximos trabalhos.

Esta ordenação busca auxiliar no norteamo da leitura do trabalho junto com o Quadro 1 que visa facilitar a visualização das fases propostas. Após a definição das fases da pesquisa passa-se ao capítulo que detalha o desenvolvimento do trabalho.

4 DESENVOLVIMENTO

O presente capítulo aborda o desenvolvimento das etapas para a realização do trabalho. O capítulo constitui desde a descrição do ambiente de produção, a etapa de obtenção dos dados, formulação do modelo matemático e sua implementação.

4.1 Ambiente produtivo

Este trabalho tem como base o ambiente de produção de uma indústria madeireira situada no estado do Paraná. O processo da indústria inicia com a serragem das toras de madeiras, passa pela secagem, após o processo de aplainamento o produto está pronto para a expedição. O estudo foi aplicado no setor de aplainamento, devido a presença de duas máquinas que realizam esse trabalho. Uma das máquinas é mais nova, possuindo tecnologias que aperfeiçoam o processo e consegue trabalhar em uma velocidade maior. A outra máquina tem uma velocidade menor, levando um tempo de processamento maior.

As tarefas são os produtos que necessitam passar por alguma das duas máquinas. Os *jobs* se diferem devido a comprimentos diferentes, larguras diferentes e um certo processo de acabamento que apenas a segunda máquina fornece (que irá ser realizado em duas tarefas). A empresa atualmente trabalha com 10 tipos de produtos diferentes (tarefas), entretanto está estudando a possibilidade de aumentar a produção para 15 tipos diferentes. Para isso, é aplicado o sequenciamento para 10 tarefas, encontrando a solução ótima e realizando comparativos com métodos heurísticos, aquele que possuir o resultado mais próximo da solução ótima será o método utilizado para as 15 tarefas.

4.2 Obtenção dos Dados

Os tempos coletados se referem a etapa do aplainamento, o último processo antes do produto ser levado para a expedição. A coleta de dados foi realizada para esse processo pois é onde há duas máquinas que realizam essa atividade, onde há variações na velocidade devido aos produtos que passam nas máquinas. A contagem se iniciou no momento que a primeira peça termina de ser aplainada e é colocada

para se formar o fardo. O cronômetro é zerado quando a última peça é colocada para fechar o fardo.

Os tempos variados acontecem devido ao tamanho da peça, número de peças que vão para um fardo e velocidade da máquina. Peças com comprimentos e larguras maiores tendem a levar mais tempo para passar pela máquina, assim como fardos que exigem maior número de peças precisam de mais tempo para completar a tarefa. A velocidade da máquina é relacionada à manutenção que está sendo aplicada nela. Máquinas que possuem a manutenção em dia podem operar a uma velocidade maior, conseqüentemente tem um tempo de operação menor.

Durante os dias de 12 de setembro a 28 de outubro, as informações apresentadas foram utilizadas para obter os dados reais da empresa. As tarefas foram enumeradas de 1 a 10 e se referem aos produtos que a empresa oferece. Os tempos coletados foram referentes a 10 tarefas operando em duas máquinas diferentes. Dentre as tarefas há algumas que só podem ser realizadas em uma determinada máquina. Nesse período as tarefas acabaram se repetindo. Desses tempos calculou a média dos tempos de processamento para se poder trabalhar. Os tempos de cada tarefa e a data coletada estão representados na Tabela 3, as médias dos tempos de processamento em suas respectivas máquinas é apresentado na Tabela 4:

Tabela 3 - Medições Tempos de Processamento

(continua)

Data	Tarefa	Máquina	Tempo
12/set	6	1	926,80s
12/set	6	1	919,57s
13/set	6	1	910,88s
19/set	1	2	1159,04s
20/set	1	2	894,03s
20/set	1	2	785,07s
20/set	2	1	313,01s
20/set	2	1	216,07s
22/set	1	1	362,78s
22/set	3	2	791,08
22/set	3	2	1045,05s
22/set	3	2	1051,01s
22/set	1	1	339,22s
29/set	3	1	560,05s
29/set	3	1	339,03s
29/set	3	1	390,01s

Tabela 3 - Medições Tempos de Processamento**(conclusão)**

Data	Tarefa	Máquina	Tempo
30/set	7	1	226,08s
30/set	7	1	325,05s
30/set	7	1	316,07s
03/out	4	1	821,19s
03/out	4	1	806,91s
03/out	5	2	825,40s
03/out	5	2	802,10s
07/out	2	2	667,45s
07/out	2	2	649,17s
07/out	2	2	639,05s
10/out	7	2	1109,64s
10/out	7	2	1040,16s
19/out	10	1	405,08s
19/out	10	1	414,09s
20/out	8	2	2876,09s
21/out	9	2	3843,09s
24/out	10	2	950,38s
24/out	10	2	964,54s
27/out	6	2	777,19s
27/out	6	2	730,43s
27/out	6	2	736,82s
28/out	4	2	1341,27s
28/out	4	2	1189,73s
28/out	4	2	1078,20s
28/out	5	1	790,14s
28/out	5	1	780,90s
28/out	5	1	775,00s

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 4 – Tempo médio de processamento das tarefas

Tarefas	Máquina 1	Máquina 2
1	351,00s	946,04s
2	264,54s	651,89s
3	429,69s	962,38s
4	814,05s	1203,07s
5	782,01s	813,75s
6	919,08s	748,15s
7	289,07s	1074,90s
8	-	2876,09s
9	-	3843,09s
10	409,59s	957,46s

Fonte: Autoria própria (2022)

Os dados presentes estão processados em segundos. Das informações da tabela é possível afirmar algumas situações. A primeira que as tarefas 8 e 9 são exclusivas da Máquina 2 (M2), devido a uma peça específica que só a M2 possui. Outra situação é a de que os tempos de processamentos da Máquina 1 (M1) são menores do que a da M2 e isso ocorre devido ao fato da M1 ser mais nova que a outra máquina.

Houve também a coleta de dados dos tempos de *setups* para essas tarefas. O tempo de *setup* se refere ao tempo necessário de preparo para a máquina estar apta a processar a tarefa. Todas as operações realizadas para o preparo das máquinas foram feitas com elas paradas, dessa forma se classificam como um *setup* interno. Os tempos de *setup* dependem de qual tarefa precede, ou seja, dependendo da tarefa que precede o tempo pode ser maior ou menor. Os tempos de *setup* para as operações da M1 e M2 podem ser observados na Tabela 5 e Tabela 6 respectivamente:

Tabela 5 - Tempos de *setup* entre tarefas na Máquina 1

(continua)

	Tarefa 1	Tarefa 2	Tarefa 3	Tarefa 4	Tarefa 5	Tarefa 6	Tarefa 7	Tarefa 8	Tarefa 9	Tarefa 10
Tarefa 1	-	372,6 1s	915,5s	563,4 7s	765,8 1s	1161, 87s	1172, 29s	-	-	918,2 9s
Tarefa 2	1158, 58s	-	1082, 89s	734,9 7s	1049, 09s	1163, 4s	532,8 1s	-	-	862,7 9s
Tarefa 3	816,6 6s	1075, 78s	-	385,0 6s	1199, 79s	846,3 3s	893,2 6s	-	-	755,5 3s
Tarefa 4	551,0 5s	500,9 9s	766,4 8s	-	865,3 1s	773,6 6s	599,0 3s	-	-	388,3 9s

Tabela 5 - Tempos de *setup* entre tarefas na Máquina 1

(conclusão)

	Tarefa 1	Tarefa 2	Tarefa 3	Tarefa 4	Tarefa 5	Tarefa 6	Tarefa 7	Tarefa 8	Tarefa 9	Tarefa 10
Tarefa 6	991,62s	1084,34s	682,69s	748,29s	988,22s	-	547,68s	-	-	867,35s
Tarefa 7	701,96s	341,27s	934,94s	689,25s	744,27s	1161,68s	-	-	-	502,27s
Tarefa 8	1066,19s	1033,82s	1183,18s	1194,02s	418,66s	1147,19s	1142,66s	-	-	465,14s
Tarefa 9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tarefa 10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tarefa 11	700s	700s	700s	700s	700s	700s	700s	-	-	700s

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 6 - Tempos de *setup* entre tarefas na Máquina 2

	Tarefa 1	Tarefa 2	Tarefa 3	Tarefa 4	Tarefa 5	Tarefa 6	Tarefa 7	Tarefa 8	Tarefa 9	Tarefa 10
Tarefa 1	-	613,61s	767,89s	584,05s	1066,89s	960,94s	1176,5s	1075,16s	1008,04s	1150,43s
Tarefa 2	1158,58s	-	626,99s	635,24s	488,9s	361,37s	1051,87s	483,94s	628,42s	676s
Tarefa 3	1083,03s	659,15s	-	415,86s	487,33s	1194,56s	803,36s	753,87s	1113,15s	433,84s
Tarefa 4	955s	500,37s	641,13s	-	430,72s	1155,49s	957,37s	522,19s	636,31s	979,88s
Tarefa 5	968,58s	901,04s	857,53s	1197,09s	-	981,22s	661,51s	696,66s	716,81s	1030,37s
Tarefa 6	530,45s	364,81s	362,53s	942,07s	452,15s	-	1101,14s	757,4s	843,03s	416,74s
Tarefa 7	327,27s	936,91s	597,07s	480,59s	836,9s	657,19s	-	808,64s	608,4s	553,55s
Tarefa 8	811,21s	1196,06s	910,05s	679,42s	944,02s	795,41s	366,24s	-	401,7s	480,15s
Tarefa 9	336,26s	322,54s	670,8s	1077,1s	1048,76s	953s	599,13s	1033,51s	-	720,02s
Tarefa 10	580,79s	1031,27s	606,14s	581,77s	332,27s	807,38s	1130,08s	457,78s	823,74s	-
Tarefa 11	700s	700s	700s	700s	700s	700s	700s	-	-	700s

Fonte: Autoria própria (2022)

As colunas das tabelas são as tarefas que precedem, as linhas da coluna são as tarefas que sucedem elas, logo o tempo necessário do *setup* para a Tarefa 4 que tem como precedente a Tarefa 1 na M2 é de 584,05 segundos. Esses tempos de *setup* foram coletados durante os dias 12 de setembro a 31 de outubro. Calculou-se a média dos tempos quando havia a preparação para passar a mesma tarefa, os valores estão expressos em segundos. Como as Tarefas 8 e 9 só podem ser processadas na M2, seus tempos de preparação na M1 são nulos, por isso tanto suas linhas, como suas

colunas possuem valores igual a 0,00. A Tarefa 11 que está representada nas Tabelas 1 e Tabela 2, é uma tarefa fictícia e o tempo que está atrelado a ela é o tempo necessário para iniciar a Tarefa no dia.

Para este trabalho, o sequenciamento das tarefas será feito para todo o mês, sendo assim, todos os *jobs* poderão iniciar no momento 0. Para a produção mensal dos itens há uma carteira de pedidos que é enviada no final do mês anterior com a quantidade exigida de cada item. Essa quantidade de cada item pode ser observada na Tabela 7:

Tabela 7 - Carteira de Pedidos

Tarefas	Quantidade pedida
1	120
2	144
3	160
4	224
5	194
6	210
7	119
8	160
9	80
10	80

Fonte: Autoria própria (2022)

Esses valores são interessantes levar em consideração, pois Tarefas que possuem maior número de pedidos acabam gerando maior venda para a empresa, dessa forma podem acabar sendo de interesse alocar elas primeiramente.

4.3 Modelo Matemático

O modelo matemático para este trabalho tem como base o modelo apresentado por Arenales *et al.* (2007) de ambientes de máquinas paralelas não-relacionadas, neste caso são 10 tarefas diferentes que devem ser sequenciadas em 2 máquinas. Os parâmetros e as variáveis que são utilizados no modelo estão descritos da seguinte forma:

Parâmetros:

p_{ik} : Tempo de Processamento da tarefa i na máquina k ;

s_{ik} : Tempo de *Setup* da tarefa i na máquina k ;

G: Número grande;

Variáveis:

C_{ik} : Instante de término da tarefa i na máquina k ;

C_{max} : Maior instante de término entre todas as máquinas;

x_{ijk} : Será igual a 1 quando a tarefa i precede imediatamente a tarefa j na máquina k , caso contrário, assumirá valor 0;

A função objetivo do modelo é de minimizar o *makespan*, o instante em que a última máquina encerra seu processamento finalizando a sequência. A conclusão que o seguinte modelo busca trazer quantitativamente, é a melhor alocação de tarefas em que a máquina mais longa termine o mais cedo possível. Para poder conseguir alcançar o objetivo é utilizado o seguinte modelo matemático:

$$\text{Minimizar } C_{max} \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n x_{ijk} = 1 \quad j = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{0jk} \leq 1 \quad k = 1, \dots, m \quad (3)$$

$$\sum_{i=0; i \neq h}^n x_{ihk} - \sum_{j=0; j \neq h}^n x_{hjk} = 0 \quad h = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m \quad (4)$$

$$C_{jk} \geq C_{ik} - G + (s_{ijk} + p_{ik} + G) \times x_{ijk} \quad i = 0, \dots, n; j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m \quad (5)$$

$$\sum_{j=0}^n x_{8j2} = 1 \quad (6)$$

$$\sum_{j=0}^n x_{9j2} = 1 \quad (7)$$

$$C_{max} \geq C_{ik} \quad i = 0, \dots, n; k = 1, \dots, m \quad (8)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad i = 0, \dots, n; j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m \quad (9)$$

$$C_{ik} \geq 0 \quad i = 0, \dots, n; k = 1, \dots, m \quad (10)$$

A equação (1) expressa a função objetivo que é minimizar o *makespan*. A equação (2) garante que cada tarefa tenha uma única tarefa anterior a ela e que cada

tarefa esteja alocada em uma única máquina. Para iniciar a sequência da programação é necessário iniciar com uma tarefa fictícia, neste caso é a tarefa 0 (zero), e que haverá apenas uma variável com o valor 1, como mostra a equação (3).

Para garantir que cada tarefa possua uma próxima tarefa, incluindo a tarefa fictícia 0, é necessário ter expresso a equação (4). A fim de determinar os instantes de termos adequados para cada tarefa, ativando ou desativando a equação, inclui-se a equação (5) que é responsável por somar o tempo de *setup* e o de processamento de cada tarefa para determinar o tempo que ela irá terminar. As equações (6) e (7) obrigam que as tarefas 8 e 9 estejam alocadas na M2.

A equação (8) aloca o maior valor destes encontrados na variável C_{max} . As equações (9) e (10) definem o tipo das variáveis, tendo que ser binárias, o tempo de término maior que zero, alocando o último término da tarefa da máquina mais sobrecarrega e ele sendo maior que 0 respectivamente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O modelo descrito foi aplicado em um *software* de programação matemática em um computador com processador de modelo AMD Ryzen 5 1600 AF possuindo 6 núcleos, 12 *threads* e 3,2 giga-hertz de *clock* e com memória RAM de 16 gigabytes com uma velocidade de 3200 mega-hertz. O tempo necessário para obter a solução foi de 269,22 segundos (4 minutos e 29 segundos), conforme mostra a Figura 6:

Figura 6 - Resultado do *software* de programação matemática

```

Licensee info: htamura@alunos.utfpr.edu.br
License expires: 26 FEB 2023

Global optimal solution found.
Objective value:                8801.310
Objective bound:                8801.310
Infeasibilities:                 0.000000
Extended solver steps:          1508511
Total solver iterations:         17151990
Elapsed runtime seconds:         269.22

Model Class:                     MILP

Total variables:                  265
Nonlinear variables:              0
Integer variables:               242

Total constraints:                295
Nonlinear constraints:            0

Total nonzeros:                  1341
Nonlinear nonzeros:              0

```

Fonte: Autoria própria (2022)

A solução ótima encontrada pelo programa foi de 8801,31 segundos para o menor *makespan* entre as duas máquinas, ocorrendo na M2. A programação das tarefas pode ser observada no Apêndice A, contendo o gráfico de Gantt das tarefas.

A primeira análise que se tem é que o modelo exato proporciona uma solução ótima para 10 tarefas em um tempo útil, entretanto caso esse número de tarefas aumente o tempo também irá aumentar de forma que a viabilidade da aplicação fique em cheque. A aplicação do sequenciamento para o caso futuro de 15 tarefas e *setups* dependentes, com os tempos de processamento e de *setup* das 5 novas tarefas estando dentro dos intervalos de desvio-padrão, necessitou de 1 hora do programa funcionando e não encontrou uma solução ótima. Outra análise a ser feita é que o modelo não levou em consideração a carteira de pedidos fornecida, devido às limitações que o *software* de programação possui.

Pensando para o caso futuro de 15 tarefas e *setups* dependentes e a demanda necessária do cliente, os métodos heurísticos são utilizados para priorizar certas tarefas e encontrar uma solução com maior rapidez. Desta forma a próxima seção é dedicada a aplicação dos métodos heurísticos.

5.1 Aplicação da Heurística

A aplicação da heurística é pensada para obter um resultado bom em um tempo menor do que o modelo exato necessita para obter a solução. Outro momento em que é vantajoso utilizar a heurística é para caso aumente o número de tarefas a serem programadas, pois o *software* de programação matemática não é usualmente utilizado para problemas com um grande número de *jobs*.

Com o *software*, na versão encontrada, não é possível de aplicar variáveis de quantidade de produtos a serem produzidos, as heurísticas acabam sendo vantajosas para aplicar o sequenciamento. A escolha dos métodos utilizados tem como base algumas regras de despacho, cada método utiliza como prioridade alguma característica do modelo. O Método 1 é de uma heurística construtiva, com base no tempo de processamento das tarefas. O Método 2 busca priorizar as tarefas que necessitam maior produção e organiza de modo que nenhuma máquina fique ociosa. O Método 3 prioriza as tarefas que possuem o menor tempo de *setup* dependente entre as tarefas. As heurísticas aplicadas conseguem ser realizadas utilizando planilhas eletrônicas, o que torna o desenvolvimento delas mais acessível.

5.1.1 Método Heurístico 1

O primeiro método a ser aplicado, que é chamado por Método Heurístico 1 (MH1), analisa apenas o tempo de processamento da tarefa em determinada máquina. A ordenação das tarefas foi obtida através do SPT, para realizar a aplicação da heurística segue-se os passos:

- Passo 1) Listar as tarefas com seus respectivos tempos de processamentos das máquinas 1 e 2 em uma única lista;
- Passo 2) Ordenar todos os tempos de processamentos do menor para o de maior valor;

Passo 3) Selecionar a tarefa com o menor tempo e alocar na máquina que possui esse tempo;

Passo 4) Repete-se até todas as tarefas forem alocadas.

De forma a facilitar o entendimento do método Heurístico a Tabela 8 apresenta alguns dados fictícios para poder aplicar esse método:

Tabela 8 - Dados fictícios

	Máquina 1	Máquina 2	Pedidos
Tarefa 1	10 segundos	12 segundos	50
Tarefa 2	20 segundos	15 segundos	25
Tarefa 3	19 segundos	17 segundos	100

Fonte: Autoria própria (2022)

Seguindo as etapas propostas teremos quatro passos que podem ser observados nas Tabelas 9, Tabela 10 e Tabela 11:

Tabela 9 - Exemplo Passo 1 do MH1

Tarefa-Máq	Tempo	Pedidos
1-1	10 segundos	50
1-2	12 segundos	50
2-1	20 segundos	25
2-2	15 segundos	25
3-1	19 segundos	100
3-2	17 segundos	100

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 10 - Exemplo Passo 2 do MH1

Tarefa-Máq	Tempo	Pedidos
1-1	10 segundos	50
1-2	12 segundos	50
2-2	15 segundos	25
3-2	17 segundos	100
3-1	19 segundos	100
2-1	20 segundos	25

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 11 - Exemplo Passo 3 e Passo 4 do MH1

Tarefa	Máquina Alocada	Tempo
1	1	10
2	2	15
3	2	17

Fonte: Autoria própria (2022)

Neste exemplo o resultado encontrado para o *makespan* é de 32 segundos, que ocorre na Máquina 2, a qual recebe as Tarefas 2 e 3.

Para o modelo que este trabalho busca solucionar, o resultado encontrado com esse método é de 9.332,43 segundos na M2. O gráfico de Gantt para esse método pode ser encontrado no Apêndice B.

5.1.2 Método Heurístico 2

O segundo método, chamado neste trabalho de Método Heurístico 2 (MH2), prioriza as tarefas que possuem maior quantidade de pedidos, como é possível ver na Tabela 7. Os passos para realizar este método são:

- Passo 1) Ordenar as tarefas em relação ao número de pedidos de forma decrescente;
- Passo 2) Alocar a tarefa com maior quantidade de pedidos na máquina que a processa mais rápido como a primeira tarefa;
- Passo 3) A segunda tarefa com mais pedidos será alocada na máquina que não recebeu a tarefa anterior;
- Passo 4) A partir da terceira tarefa verificar qual máquina está disponível primeiro. Alocar a tarefa que ainda não foi alocada e maior quantidade de pedidos na máquina disponível primeiro;
- Passo 5) Repete-se o Passo 4 até todas tarefas forem alocadas.

Utilizando os dados da Tabela 8, irá aplicar o MH2 para melhor visualização do método, como mostra as Tabelas 12, Tabela 13, Tabela 14:

Tabela 12 – Exemplo Passo 1 do MH2

Tarefa-Máq	Tempo	Pedidos
3-1	19 segundos	100
3-2	17 segundos	100
1-1	10 segundos	50
1-2	12 segundos	50
2-1	20 segundos	25
2-2	15 segundos	25

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 13 - Exemplo Passo 2 e Passo 3 do MH2

Tarefa	Máquina Alocada	Tempo	Pedidos
3	1	19 segundos	100
1	2	12 segundos	50

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 14 - Exemplo Passo 4 e Passo 5 do MH2

Tarefa	Máquina Alocada	Tempo	Pedidos
3	1	19 segundos	100
1	2	12 segundos	50
2	2	15 segundos	25

Fonte: Autoria própria (2022)

Aplicando o MH2 para os dados do exemplo o *makespan* encontrado é de 37 segundos na máquina 2, que irá processar as Tarefas 1 e 2.

Para o modelo com 10 tarefas deste trabalho, esse método encontra um *makespan* de 10.653,81 segundos na M2. O gráfico de Gantt pode ser encontrado no Apêndice C.

5.1.3 Método Heurístico 3

O terceiro método Heurístico, chamado neste trabalho de Método Heurístico 3 (MH3), tem como base a regra Menor Tempo de *Setup* (MTS). Nesta regra, ao terminar uma tarefa, a próxima a ser processada será aquela que necessitar o menor tempo de *setup*. Este método só é interessante de ser aplicado em sequenciamentos que possuem o tempo de *setup* dependente. Os passos para realizar este método seguem:

- Passo 1) Para cada máquina a primeira tarefa que será alocada, será aquela que possuir o menor tempo de processamento na máquina em questão;
- Passo 2) A partir da segunda tarefa, verificar aquela que possui o menor tempo de *setup* em relação a tarefa que a antecede. Alocar as tarefas conforme a disponibilidade das máquinas (a máquina que terminar uma tarefa antes poderá receber a tarefa antes);
- Passo 3) Repete-se o Passo 2 até alocar todas as tarefas.

Os dados da Tabela 15 e Tabela 16 serão utilizados para exemplificar este método:

Tabela 15 – Tempos de processamento de exemplo para o MH3

	Tempo de processamento na Máquina 1	Tempo de processamento na Máquina 2
Tarefa 1	10 segundos	12 segundos
Tarefa 2	20 segundos	15 segundos
Tarefa 3	19 segundos	17 segundos
Tarefa 4	15 segundos	20 segundos
Tarefa 5	13 segundos	10 segundos

Fonte: autoria própria (2022)

Tabela 16 - Tempos de processamento de exemplo para o MH3

	Tarefa 1	Tarefa 2	Tarefa 3	Tarefa 4	Tarefa 5
Tarefa 1	0	3	4	11	9
Tarefa 2	7	0	11	9	8
Tarefa 3	5	6	0	7	8
Tarefa 4	3	6	6	0	5
Tarefa 5	4	7	9	10	0

Fonte: autoria própria (2022)

Os passos para solucionar este exemplo estão descritos a seguir nas Tabelas 17 e Tabela 18:

Tabela 17 - Exemplo Passo 1 do MH3

Tarefa-Máq	Tempo Processamento	Tempo Setup	Posição
1-1	10 segundos	0	1
5-2	10 segundos	0	1

Fonte: autoria própria (2022)

Tabela 18 - Exemplo Passo 2 e Passo 3do MH3

Tarefa-Máq	Tempo Processamento	Tempo Setup	Posição-Máquina
1-1	10 segundos	0	1 – 1
5-2	10 segundos	0	1 – 2
2-1	20 segundos	3 segundos	2 – 1
3-2	17 segundos	9 segundos	2 – 2
4-1	15 segundos	9 segundos	3 – 1

Fonte: autoria própria (2022)

Para este exemplo o *makespan* encontrado é de 57 segundos na máquina 1. O tempo total de produção na máquina 2 é de 36 segundos.

Para o modelo com 10 tarefas deste trabalho, esse método encontrou um *makespan* de 12.041,06 segundos na M2. O gráfico de Gantt com o sequenciamento das tarefas pode ser visto no Apêndice D.

5.2 Análise de Resultados

Os valores encontrados para o menor *makespan* dos três métodos podem ser encontrados no Tabela 19:

Tabela 19 - Resultados dos métodos

Método	Resultado do <i>makespan</i>	Diferença porcentual
Algoritmo exato	8.801,31 segundos	0%
MH1	9.332,43 segundos	6%
MH2	10.653,81 segundos	21%
MH3	12.041,06 segundos	37%

Fonte: autoria própria (2022)

A solução ótima sempre será aquela encontrada pelo algoritmo exato. Todavia, o programa utilizado possui certas limitações (restrição da quantidade de variáveis) o que torna alguns problemas inviáveis de serem colocados. Dentre as heurísticas desenvolvidas a Heurística 1 obteve um resultado satisfatório, possuindo uma diferença de 531,12 segundos do resultado ótimo. Por sua vez, a Heurística 2 teve uma diferença de 1.852,5 segundos. A Heurística 3 teve 3.239,75 segundos de diferença. O desenvolvimento da solução da Heurística também tem vantagem por ser mais rápida e, caso haja a necessidade, pode ser mudada alguma regra de prioridade, como por exemplo a necessidade de entregar um produto com maior antecedência. Portanto, para o caso futuro da empresa que almeja aumentar para 15 tarefas diferentes, o mais adequado é utilizar o MH1 para futuros sequenciamentos.

O resultado encontrado pelo algoritmo exato utiliza da técnica *branch-and-bound* para solucionar o problema. De forma que elimina as áreas em que o tempo de *setup* entra uma tarefa e a próxima é alto, tendo preferência para alocar tarefas que possuem um tempo de *setup* dependentes menores.

Analisando os resultados encontrados, o tempo necessário para encontrá-los e os programas necessários, os métodos heurísticos são mais vantajosos para este tipo de problema, porém o algoritmo exato é necessário para que possa ser feita a comparação das heurísticas.

6 CONCLUSÕES

O estudo da aplicação de sequenciamento de tarefas através da programação delas é de grande importância, pois é um tópico que leva um importante papel dentro das indústrias. Por meio do sequenciamento é que se encontra a melhor forma de produzir sem perder tempo desnecessariamente.

O método que proporciona o melhor resultado é através de algoritmos exatos aplicados em programas específicos, neste trabalho utilizou-se um *software* de programação, mas no mercado há outros programas que possam ser utilizados. A grande vantagem que esse método possui é de proporcionar o melhor resultado possível para tal modelo fornecido, entretanto há as limitações que o programa roda com um número de variáveis limitadas.

Para contornar essas limitações os métodos Heurísticos ganham vantagem sobre, já que não possuem nenhuma delas e são utilizados de maneira prática para ser resolvidos em um tempo hábil. O primeiro método Heurístico desenvolvido neste estudo encontra um resultado 6% maior que a solução ótima, o segundo método encontra um tempo 21% maior, já o resultado do terceiro método é 38% maior que a solução ótima. Isso mostra que o Método 1 pode ser utilizado no lugar do algoritmo exato sem possuir uma grande perda de tempo. Também caso aumente o número de tarefas desenvolvidas por esta indústria este método possui a vantagem de obter a solução mais rápida que o algoritmo exato.

Os métodos heurísticos utilizado não necessitaram de programas específicos para encontrar a solução, bastando planilha eletrônica (ou papel) para realizar as ordenações. Caso o número de tarefas aumente drasticamente é de interesse a transformação desses passos em linguagem de programação para facilitar a obtenção do resultado e do sequenciamento de tarefas.

Em pesquisas futuras, outras abordagens que podem ocorrer é a elaboração de um outro modelo matemático, alterar a função objetivo, adição de novas restrições para o algoritmo, o desenvolvimento de outros métodos heurísticos e aplicação de heurísticas de melhorias nos modelos já construídos.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, E. L. D. **Introdução à Pesquisa Operacional - Método e Modelos para Análise de Decisões, 5ª edição**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2015. 978-85-216-2967-2. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-2967-2/>. Acesso em: 24 abr. 2022.

ARENALES, Marcos *et al.* **Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

BARCO, C. F.; VILLELA, F. B. Análise dos sistemas de programação e controle da produção. A integração das cadeias produtivas com a abordagem da manufatura sustentável. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 28., 2008, Rio de Janeiro. **Anais[...]** Rio de Janeiro: ABEPRO, 2008. p. 1-7

BAKER, Kenneth R.; TRIETSCH, Dan. **Principles of Sequencing and Scheduling**. 2. ed. Hoboken: Wiley, 2019. (Wiley series in operations research and management science).

BELFIORES, P.; FÁVERO, L. P. **Pesquisa Operacional - Para Cursos de Engenharia**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2012. 9788595155626. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595155626/>. Acesso em: 25 abr. 2022.

BISPO, F. A. *et al.* ANALISE DA IMPORTÂNCIA DO PLANEJAMENTO, PROGRAMAÇÃO E CONTROLE DA PRODUÇÃO - (PPCP) EM UM PROCESSO PRODUTIVO. **Colloquium Exactarum**, Presidente Prudente, v. 7, n. , p. 49-56, 20 dez. 2015. Associação Prudentina de Educação e Cultura (APEC). <http://dx.doi.org/10.5747/ce.2015.v7.nesp.000092>. Disponível em: [http://www.unoeste.br/site/enepe/2015/suplementos/area/Exactarum/Engenharia%20de%20Produção/ANALISE%20DA%20IMPORTÂNCIA%20DO%20PLANEJAMENTO,%20PROGRAMAÇÃO%20E%20CONTROLE%20DA%20PRODUÇÃO%20-%20\(PPCP\)%20EM%20UM%20PROCESSO%20PRODUTIVO.pdf](http://www.unoeste.br/site/enepe/2015/suplementos/area/Exactarum/Engenharia%20de%20Produção/ANALISE%20DA%20IMPORTÂNCIA%20DO%20PLANEJAMENTO,%20PROGRAMAÇÃO%20E%20CONTROLE%20DA%20PRODUÇÃO%20-%20(PPCP)%20EM%20UM%20PROCESSO%20PRODUTIVO.pdf). Acesso em: 23 abr. 2022.

CARDOSO, W. **Planejamento e Controle da Produção (PCP): a teoria na prática**. São Paulo: Editora Blucher, 2021. 9786555062427. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786555062427/>. Acesso em: 21 abr. 2022.

CAUCHICK, Paulo. **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2018. E-book. ISBN 9788595153561. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595153561/>. Acesso em: 10 nov. 2022.

COLIN, E. C. **Pesquisa Operacional - 170 Aplicações em Estratégia, Finanças, Logística, Produção, Marketing e Vendas, 2ª edição**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2017. 9788597014488. Disponível em:

<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788597014488/>. Acesso em: 26 abr. 2022.

CONWAY, R. W.; MAXWELL, W. L.; MILLER, L. W.. **Theory of Scheduling**. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1967. 294 p.

CORRÊA, H. L.; CORRÊA, C. A. **Administração de Produção e Operações**. 4ª edição. São Paulo: Grupo GEN, 2017. 9788597013153. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788597013153/>. Acesso em: 23 abr. 2022.

DA SILVA, E. M.; GONÇALVES, V.; MUROLO, A. C.. **Pesquisa Operacional - Para os Cursos de Administração e Engenharia, 5ª edição**. São Paulo: Grupo GEN, 2017. 9788597013559. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788597013559/>. Acesso em: 25 abr. 2022.

GANTT, H. L. **Organizing for work**. New York: Harcour, Brace And Howe, 1919. p. 120.

GUERRINI, F. M. **Planejamento e Controle da Produção - Modelagem e Implementação**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2018. 9788595152519. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595152519/>. Acesso em: 23 abr. 2022.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à Pesquisa Operacional**. Rio Grande do Sul: Grupo A, 2013. 9788580551198. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580551198/>. Acesso em: 24 abr. 2022.

HOPP, W.; SPEARMAN, M.. **Factory Physics**. 3. ed. Long Grove: Waveland Pr Inc, 2008. p. 752.

KHALILI, Majid; NADERI, Bahman. A bi-objective imperialist competitive algorithm for no wait flexible flow lines with sequence dependent setup times. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. Springer, v. 76, n. 1-4, p. 461-469, 2015.

LACHTERMACHER, G.. **Pesquisa Operacional na tomada de decisões, 5ª edição**. Rio de Janeiro Grupo GEN, 2016. 9788521630494. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521630494/>. Acesso em: 26 abr. 2022.

LAGE JÚNIOR. M. **Planejamento e Controle da Produção - Teoria e Prática**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2019. 9788521636304. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521636304/>. Acesso em: 28 abr. 2022.

LONGARAY, A. A. **Introdução à Pesquisa Operacional**. São Paulo: Editora Saraiva, 2013. 9788502210844. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788502210844/>. Acesso em: 24 abr. 2022.

LOPES, J. **Análise e Otimização do Sequenciamento de Produção de uma Empresa de Médio Porte de Embalagens Plásticas**. Juiz de Fora. Universidade Federal de Juiz de Fora (monografia), 2008

LUSTOSA, L. *et al.* **Planejamento e Controle da Produção**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2008.

MOREIRA, D. A. **Pesquisa Operacional: Curso Introductório**. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2018. 9788522128068. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788522128068/>. Acesso em: 24 abr. 2022.

MOREIRA, D.. **ADMINISTRAÇÃO DA PRODUÇÃO E OPERAÇÕES**. São Paulo: Editora Saraiva, 2012. 9788502180420. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788502180420/>. Acesso em: 23 abr. 2022.

NAGANO, M. S.; MOCCELLIN, J. V.; LORENA, L. A. N.. Programação da produção flow shop permutacional com minimização do tempo médio de fluxo. **Anais..** Rio de Janeiro: SOBRAPO, 2004. Disponível em: <http://www.lac.inpe.br/~lorena/nagano/sbpo-nagano-mocellin-lorena.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2022.

PINEDO, M. **Scheduling: theory, algorithms, and systems**. 5. ed. New Jersey: Springer, 2016. *E-book*.

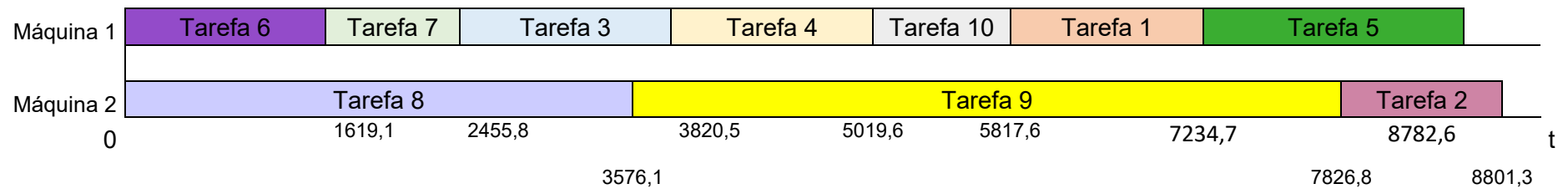
REIS, J.. **Uma Introdução ao Scheduling**. Lisboa: Instituto Superior de Ciências do Trabalho e da Empresa, 1996. 32 p. Disponível em: <https://repositorio.iscte-iul.pt/bitstream/10071/169/1/SCH-INT.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2022.

TAHA, H. A.. **Pesquisa Operacional**. 8. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2008. p. 345.

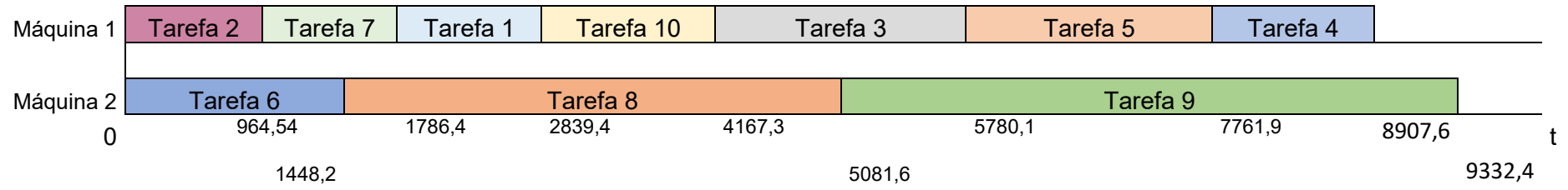
T'KINDT, Vincent; BILLAUT, Jean-Charles. **Multicriteria Scheduling: theory, models and algorithms**. 2. ed. Tours: Springer, 2006. 368 p.

TUBINO, D. F. **Planejamento e Controle da Produção - Teoria e Prática, 3ª edição**. São Paulo: Grupo GEN, 2017. 9788597013726. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788597013726/>. Acesso em: 21 abr. 2022.

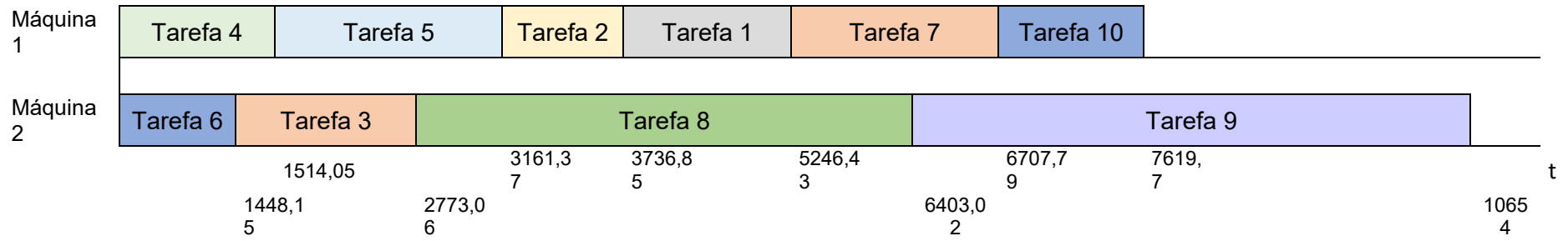
APÊNDICE A - Gráfico de Gantt do Modelo Exato



APÊNDICE B - Gráfico de Gantt do Método Heurístico 1



APÊNDICE C - Gráfico de Gantt do Método Heurístico 2



APÊNDICE D - Gráfico de Gantt do Método Heurístico 3

