

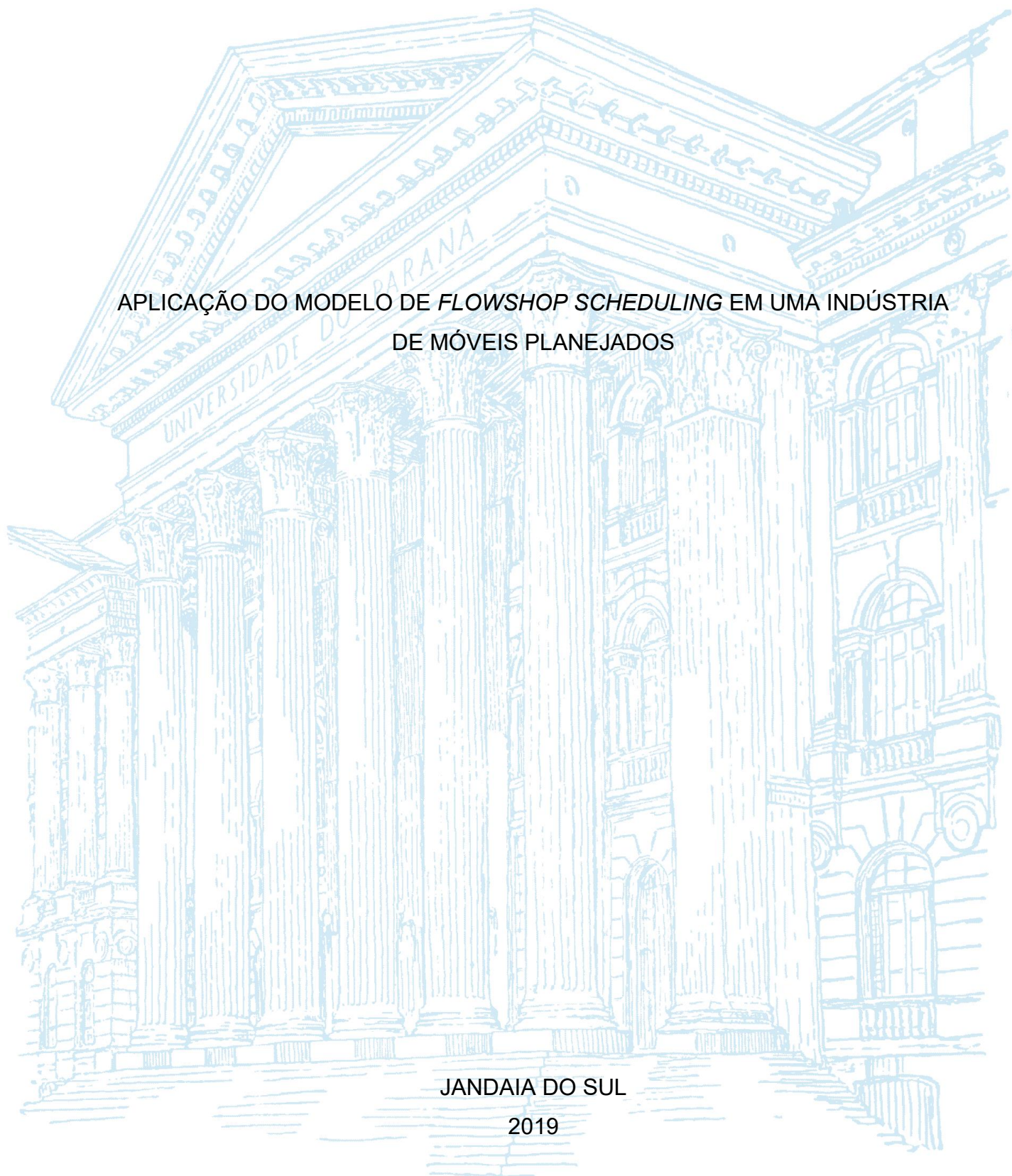
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GUSTAVO TOSHIYUKI SHIMADA

APLICAÇÃO DO MODELO DE *FLOWSHOP SCHEDULING* EM UMA INDÚSTRIA
DE MÓVEIS PLANEJADOS

JANDAIA DO SUL

2019



GUSTAVO TOSHIYUKI SHIMADA

APLICAÇÃO DO MODELO DE *FLOWSHOP SCHEDULING* EM UMA INDÚSTRIA
DE MÓVEIS PLANEJADOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia de Produção, Campus Jandaia do Sul, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio Reis dos Santos

JANDAIA DO SUL

2019

S556a Shimada, Gustavo Toshiyuki
Aplicação do modelo de *flowshop scheduling* em uma indústria de móveis planejados. / Gustavo Toshiyuki Shimada. – Jandaia do Sul, 2019. 53 f.

Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio Reis dos Santos
Trabalho de Conclusão do Curso (graduação) – Universidade Federal do Paraná. Campus Jandaia do Sul. Graduação em Engenharia de Produção.

1. Sequenciamento. 2. *Job-shop*. 3. *Scheduling*. 4. Programação da produção. I. Santos, Marco Aurélio Reis dos. II. Título. III. Universidade Federal do Paraná.

CDD: 658.5



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PARECER Nº 019 GUSTAVO TOSHIYUKI SHIMADA/2019/UFPR/R/JA/CCEP
PROCESSO Nº 23075.079917/2019-87
INTERESSADO: GUSTAVO TOSHIYUKI SHIMADA

TERMO DE APROVAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO.

Título: APLICAÇÃO DO MODELO DE *FLOWSHOP SCHEDULING* EM UMA INDÚSTRIA DE MÓVEIS PLANEJADOS

Autor(a): GUSTAVO TOSHIYUKI SHIMADA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do grau no curso de Engenharia de Produção, aprovado pela seguinte banca examinadora.

Marco Aurélio Reis dos Santos (Orientador)

Juliana Verga Shirabayashi

Jair da Silva



Documento assinado eletronicamente por **MARCO AURELIO REIS DOS SANTOS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/12/2019, às 15:12, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **JULIANA VERGA SHIRABAYASHI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/12/2019, às 15:22, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **JAIR DA SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/12/2019, às 13:25, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida [aqui](#) informando o código verificador **2376653** e o código CRC **D1568E7F**.

À minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus! Por ser a base da minha vida.

Agradeço a meus pais, Hitoshi e Roseli por toda dedicação, motivação, amor e carinho que me foi concedido.

Agradeço a minha namorada, Adrieli, pelo amor, paciência e apoio que foi dado.

Agradeço a meu orientador, Marco, pela paciência, dedicação e contribuição para realização desse trabalho.

Muito obrigado a todos!

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.” (Jose de Alencar)

RESUMO

Este trabalho tem o objetivo estabelecer o conhecimento teórico sobre a otimização do sequenciamento de operações na programação da produção para aplicar essas informações em uma situação real. O ambiente de produção estudado foi o *Flow-Shop Scheduling*, e foi estruturado um modelo matemático que tem como objetivo minimizar o tempo total de processamento de todos os produtos, respeitando as limitações e restrições existentes nesse ambiente de produção industrial. E para comprovar a eficácia do modelo, foram coletados dados de uma indústria de móveis planejados, localizada na cidade de Apucarana, centro-norte do Paraná, com a finalidade de aplicar e validar o modelo comparando os resultados obtidos com uma situação real. Após validar o modelo, é comprovada a aplicação desses métodos em qualquer indústria que possui esse ambiente de produção, resultando em melhorias no setor produtivo, gerando redução nos custos e aumento da capacidade da indústria.

Palavras-chave: Sequenciamento. *Job-Shop Scheduling*. Programação da Produção.

ABSTRACT

This paper aims to establish the theoretical knowledge about the optimization of operations sequencing in production scheduling to apply this information in a real situation. The production environment studied was Flow-Shop Scheduling, and a mathematical model was structured that aims to minimize the total processing time of all products, respecting the limitations and restrictions existing in this industrial production environment. And to prove the effectiveness of the model, data were collected from a planned furniture industry, located in the city of Apucarana, north central Paraná, in order to apply and validate the model comparing the results obtained with a real situation. After validating the model, the application of these methods is proven in any industry that has this production environment, resulting in improvements in the production sector, leading to cost savings and increased industry capacity.

Keywords: Sequencing, Job-Shop Scheduling, Production Schedule.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - ETAPAS DA PESQUISA OPERACIONAL.....	20
Figura 2 - MÁQUINA ÚNICA.	26
Figura 3 - MÁQUINAS EM PARALELO.....	26
Figura 4 - <i>JOB SHOP</i>	27
Figura 5 - <i>FLOW SHOP</i>	31
Figura 6 - METODOLOGIA DE PESQUISA EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO....	34
Figura 7 - FLUXO DO PROCESSO DA INDÚSTRIA EM QUESTÃO.	41
Figura 8 - RESTRIÇÕES 26 A 29.	44
Figura 9 - RESTRIÇÕES 30 A 32.	45
Figura 10 - RESTRIÇÃO 33.	45
Figura 11 - RESTRIÇÕES 34 E 35.	46
Figura 12 - RESTRIÇÕES 36 A 41.	46
Figura 13 - RESTRIÇÕES 42 A 47.	47
Figura 14 - SUPLEMENTO <i>SOLVER</i>	48
Figura 15 - <i>MAKESPAN</i>	49

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - EXEMPLO DE GRÁFICO DE GANTT.....	19
Gráfico 2 - REPRESENTAÇÃO DO <i>JOB SHOP SCHEDULING</i>	28
Gráfico 3 - REPRESENTAÇÃO DO SEQUENCIAMENTO UTILIZADO NA INDÚSTRIA MOVELEIRA.....	42
Gráfico 4 - REPRESENTAÇÃO DO SEQUENCIAMENTO OTIMIZADO	49
Gráfico 5 - COMPARATIVO ENTRE O <i>MAKESPAN</i>	50

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - ÍNDICES, PARÂMETROS, VARIÁVEIS DO <i>JOB SHOP</i>	28
Quadro 2 - ÍNDICES, PARÂMETROS, VARIÁVEIS DO <i>FLOW SHOP</i>	32
Quadro 3 - TIPO DE PRODUTO COM SEU TEMPO DE PROCESSAMENTO.....	41
Quadro 4 - ÍNDICES.....	42

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	13
1.2 JUSTIFICATIVA	14
1.3 OBJETIVOS	15
1.3.1 OBJETIVO GERAL.....	15
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.4 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO	16
2 REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1 PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO (PCP).....	17
2.2 PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO	18
2.3 PESQUISA OPERACIONAL	19
2.3.1 PROGRAMAÇÃO LINEAR.....	21
2.4 SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO (<i>SCHEDULING</i>).....	22
2.4.1 DEFINIÇÃO DE <i>SCHEDULING</i>	23
2.4.2 REGRAS DE SEQUENCIAMENTO	24
2.4.3 CARACTERÍSTICAS E RESTRIÇÕES OPERACIONAIS	25
2.4.3.1 MÁQUINA ÚNICA.....	25
2.4.3.2 MÁQUINAS EM PARALELO.....	26
2.4.3.3 <i>JOB SHOP</i>	27
2.4.3.4 <i>FLOW SHOP</i>	30
3 MATERIAL E MÉTODOS	34
3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA.....	34
3.1.1 QUANTO À NATUREZA.....	35
3.1.2 QUANTO AOS OBJETIVOS.....	35
3.1.3 QUANTO À ABORDAGEM.....	36
3.1.4 QUANTO AO MÉTODO	36
3.2 EMPRESA.....	37
3.2.1 PROBLEMA.....	38
3.3 ETAPAS DA PESQUISA	38
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	40
4.1 MODELAGEM MATEMÁTICA.....	40
4.2 RESULTADOS	47

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
REFERÊNCIAS.....	52

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

O mundo empresarial atual é caracterizado por possuir elevado nível de competitividade, obrigando as organizações a buscarem ações que possam otimizar os processos da cadeia produtiva, e conseqüentemente, obterem um maior grau de desempenho em relação a seus concorrentes de mercado. Sendo assim, estratégias que visam a melhoria dos processos são fundamentais para qualquer tipo, porte ou ramo que organização possui.

Toda indústria que almeja crescer ou se manter no mercado necessita de investimento no departamento de produção, visando gerar vantagens e aprimoramento no setor produtivo. Técnicas variadas de otimização têm sido desenvolvidas e empregadas nas indústrias com o objetivo de reduzir ao máximo os custos de produção e até mesmo aumentar o rendimento dos processos produtivos (BOWERSOX, 2011).

A gestão da produção pode ser definida como a área que está envolvida diretamente com os níveis operacionais de uma empresa, sendo responsável por conquistar as metas, seja elas a curto, médio e longo prazo. A utilização da Pesquisa Operacional (PO) se tornou fundamental para o crescimento das organizações, por obter parâmetro de decisão mais confiável e ter como um dos propósitos a alocação ótima dos recursos existentes no sistema, tornando os modelos matemáticos fundamentais e aplicáveis (SILVA, 2008).

Para Taha (2008) o sequenciamento de operações bem planejado e executado de maneira correta, pode ser o fator chave da eficiência produtiva, pois é capaz de reduzir estoques, melhorar datas de entregas e gargalos do sistema. Segundo Blasewicz et al. (1996), as restrições dos problemas de sequenciamento são que cada tarefa deve ser processada por uma única máquina e que cada máquina é capaz de realizar um trabalho por vez.

Na atividade de Programação e Controle da Produção, especificamente no sequenciamento, as decisões que visam a ordem em que os produtos devem ser fabricados, podem ser responsáveis pelos resultados obtidos nos prazos de entrega

e nos custos do produto. Desta forma com o progresso da tecnologia computacional e dos métodos de programação, quando aplicados no sequenciamento de operações, resultam em resultados satisfatórios (SLACK, 2009).

Dessa maneira este trabalho apresenta um modelo de Programação Linear para o problema de Sequenciamento de Operações em um ambiente de *flow shop* com máquinas distintas, visando minimizar o tempo total de processamento com o melhor proveito dos recursos existente no sistema.

O estudo foi aplicado em uma indústria do setor moveleiro, localizada no norte do Estado do Paraná. Onde foram coletados os tempos de processamento para quatro produtos diferentes, essa demanda compreende a primeira semana do mês de julho de 2019. A finalidade é definir uma proposta de sequenciamento com objetivo de aumentar a capacidade da indústria com a redução do tempo total de processamento de todas as tarefas existentes para aquele período.

1.2 JUSTIFICATIVA

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) divulga que neste ano o estado do Paraná alcançou o maior índice de crescimento da produção industrial do país. O percentual acumulado entre os meses de janeiro a julho teve o acréscimo de 7,2% e o índice nacional teve queda de -1,7%.

Esse avanço traz consigo o aumento do nível competitivo entre as indústrias, logo, se tornou fundamental a agilidade dos processos e a rapidez nas tomadas de decisões, e para isso o planejamento, controle e a programação da produção bem estruturada se tornou imprescindível para sobrevivência no mercado (ARENALES, 2007).

A programação da produção possui inúmeros desafios, e um deles é otimizar o sequenciamento de operações, por ter como consequência desse aperfeiçoamento a redução do tempo total de processamento, aumento da capacidade e redução de custo (PAIVA, 2006).

Este trabalho visa gerar embasamento teórico e conhecimento prático sobre o problema de sequenciamento de operações, primeiramente foi realizado a busca de informações em livros, teses, dissertações e artigos, em seguida, a fim de gerar

conhecimento prático, foi aplicado um modelo matemático na indústria, com objetivo de minimizar o tempo total de processamento de diversas tarefas distintas, em um ambiente que possui máquinas de funções variadas e produtos diferentes a serem produzidos, sendo que todos os produtos possuem a mesma sequência de processamento, problema conhecido com *Flow-Shop Scheduling*.

1.3 OBJETIVOS

Em vista do contexto explicitado nas seções 1.1 e 1.2, apresenta-se nesta seção o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

1.3.1 OBJETIVO GERAL

Estabelecer embasamento teórico para conseguir aplicar o modelo matemático sobre o problema de sequenciamento de operações em uma indústria, com objetivo de minimizar o tempo total de processamento, considerando um ambiente de *flow-shop* com máquinas distintas.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Buscar informações para estabelecer o embasamento teórico sobre sequenciamento de operações;
- b) Obter os pré-requisitos de cada operação e/ou tarefa por meio da análise dos processos produtivos;
- c) Apresentar um modelo matemático para melhoria do processo;
- d) Encontrar uma solução ótima para o problema apresentado;
- e) Validar a solução obtida comparando com uma situação real.

1.4 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho é dividido em cinco capítulos. O primeiro retrata uma breve introdução do estudo em questão, com a definição do problema, a justificativa para a sua realização, o objetivo geral e específico e as limitações da pesquisa. O segundo capítulo refere-se à fundamentação teórica necessária para entendimento do assunto, onde são descritos os principais conceitos e os métodos utilizados. O terceiro capítulo refere-se a metodologia que foi utilizada, onde contem a classificação da pesquisa e os procedimentos realizados. O quarto capítulo é responsável por descrever a experimentação computacional e os resultados obtidos. O quinto e último capítulo são as conclusões da pesquisa e as recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo são apresentados os conceitos teóricos relevantes para o desenvolvimento deste trabalho. A divisão desde capítulo foi elaborada de modo a demonstrar a estrutura geral do trabalho com embasamento bibliográfico. O mesmo está subdividido em cinco partes: planejamento e controle da produção; programação da produção; Pesquisa Operacional; sequenciamento da produção com ênfase na problemática do trabalho, que é o *Job-Shop Scheduling*.

2.1 PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO (PCP)

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). Os objetivos do planejamento e controle da produção são assegurar que os processos aconteçam de forma eficiente e eficaz, ou seja, o planejamento da produção visa definir antecipadamente o que fazer, quando fazer, como fazer e quem deve fazer (CHIAVENATO, 2004).

A principal atividade do PCP é formular o planejamento estratégico da produção à longo prazo, onde são feitos planos referentes aos objetivos almejados, quantificando os recursos necessários para atingir tais metas por meio da previsão de demanda. Uma vez que o planejamento busca alcançar um determinado objetivo no futuro, o controle tem o papel de lidar com alterações que podem ocorrer durante o tempo de modo a garantir que o objetivo seja atingido (TUBINO, 2000).

O controle da produção assegura que as ordens de produção sejam executadas na data e de maneira correta, por esse motivo é necessário que exista um sistema de informações eficientes que consigam relatar algumas características, como: material em processo, estado atual de cada ordem de produção, quantidades produzidas, nível de estoque de matéria prima (MP) e de produto acabado (CHIAVENATO, 2008). Nesse contexto, a programação da produção torna-se essencial na gestão da produção.

2.2 PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO

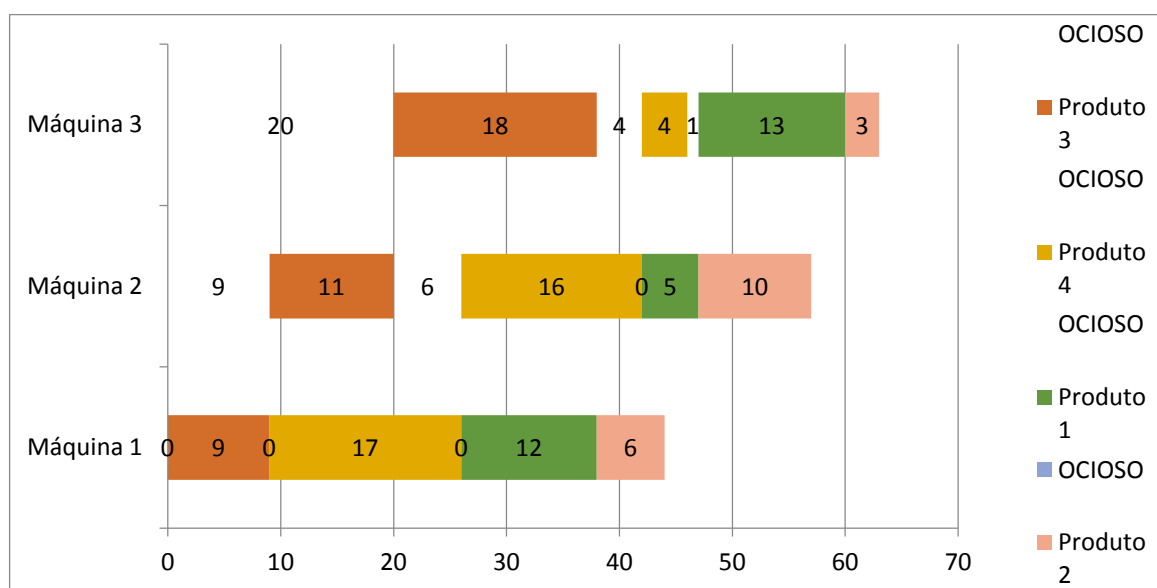
A programação da produção é responsável por determinar de maneira antecipada os produtos que serão produzidos por uma empresa, com período de médio a curto prazo. Planeja o que deve ser produzido em termos de quantidade e delimita o início e fim da produção, tomando com base: previsão de demanda, histórico de pedidos, capacidade e recurso necessários, com o objetivo de constituir a melhor estratégia de produção (RUSSOMANO, 1995).

Segundo Chiavenato (2008), os principais objetivos da programação da produção são:

- Entregar os produtos nas datas estabelecidas;
- Coordenar e integrar todos os envolvidos no processo produtivo;
- Garantir a disponibilidade de todo recurso (matéria prima, mão de obra, máquinas) necessário para a produção;
- Balancear o processo produtivo para que não haja ou amenize os gargalos e ociosidades;
- Coordenar todos os recursos existentes no processo de maneira racional;
- Distribuir o trabalho de forma proporcional para garantir a melhor sequência de produção e maior eficiência e eficácia.

Existem ferramentas que são muito utilizadas na programação, e uma delas é o gráfico de Gantt, que é uma representação gráfica semelhante a um cronograma, onde as informações contidas facilitam o entendimento da alocação dos recursos ao longo do tempo (KRAJEWSKI; RITZMAN; MALHOTRA, 2009). O Gráfico 1 é um exemplo de como seria a utilização desta ferramenta na programação da produção, onde é evidenciado o tempo de processamento de cada produto em cada máquina e facilita a visualização do sequenciamento da produção e também dos tempos ociosos do processo.

GRÁFICO 1 - EXEMPLO DE GRÁFICO DE GANTT.



Fonte: Autor (2019).

A programação pode ser feita de acordo com as necessidades da empresa, e suas motivações são: velocidade na entrega, qualidade, redução de custos, flexibilidade e variabilidade (KRAJEWSKI; RITZMAN; MALHOTRA, 2009). Diante desse contexto a utilização da Pesquisa Operacional se tornou peça fundamental para melhoria da programação da produção.

2.3 PESQUISA OPERACIONAL

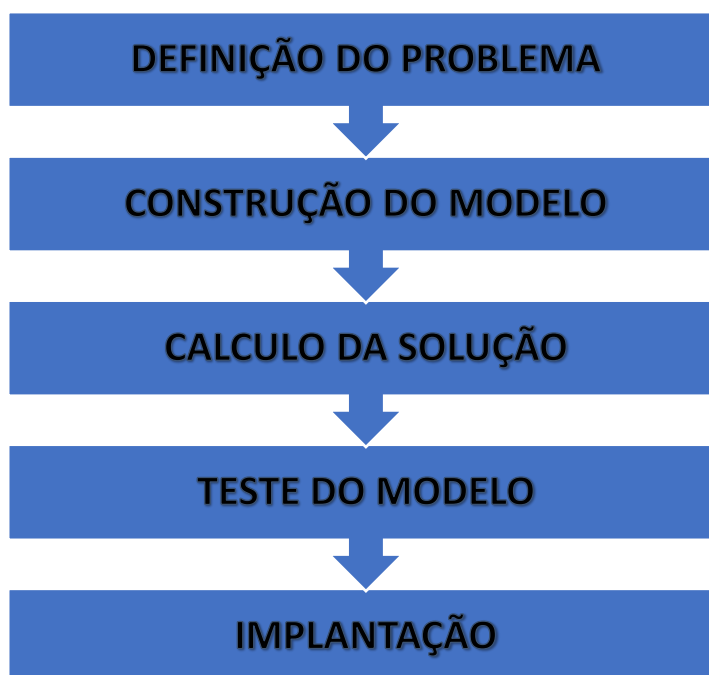
A Pesquisa Operacional surgiu na Inglaterra durante o período da Segunda Guerra Mundial (1939–1945), pela necessidade de solucionar problemas relacionados à logística e a distribuição eficiente do material de guerra. Desde então, as ideias desenvolvidas foram adaptadas para ter aplicação em outros setores, um exemplo é seu uso na indústria, por auxiliar no aumento da produtividade e na melhor utilização dos recursos escassos do sistema (TAHA, 2008).

De acordo com Andrade (2009) a Pesquisa Operacional é definida pelo uso de técnicas e métodos quantitativos com o objetivo de otimizar a utilização dos recursos disponíveis e consequentemente auxiliar na programação da produção.

Silva et al. (1998) apresenta a Pesquisa Operacional como a utilização de um método de descrição de um sistema que é auxiliado por um modelo. E por meio de experimentos e testes do modelo, resultam na maneira ideal de operar o sistema.

Segundo Silva et al. (1998), todo estudo de Pesquisa Operacional deve passar pelas etapas conforme ilustrado na Figura 1.

FIGURA 1 - ETAPAS DA PESQUISA OPERACIONAL.



Fonte: Autor (2019).

- Definição do problema: definição dos objetivos e restrições postas pelo problema;
- Construção do modelo: modelo matemático que contém a função objetivo e as restrições;
- Cálculo da solução: aplicação de técnicas matemáticas para obtenção da solução;
- Teste do modelo: realização de testes empíricos para validação do modelo;
- Implantação: observação do comportamento do sistema com solução aplicada e se necessário efetuar ajustes no modelo.

Segundo Taha (2008) é possível definir duas classes de solução: viável, se satisfazer todas as restrições, e ótima, se resultar no melhor valor da função objetivo juntamente satisfazendo todas as restrições.

Existem diversas técnicas utilizadas para a resolução dos problemas da Pesquisa Operacional, sendo que as mais triviais são: Programação Linear (PL); Programação Não Linear (PNL); Programação Inteira e Mista (PI). Porém, a ênfase desse trabalho está na Programação Linear, pois a resolução da problemática se encontra através da PL.

2.3.1 PROGRAMAÇÃO LINEAR

A Programação Linear foi desenvolvida após a Segunda Guerra Mundial como instrumento em pesquisas econômicas e econométricas e logo se tornou eficaz para estudos de gestão, como: organização de transportes, estoques, fluxo de caixa e os tradicionais problemas de (ANDRADE, 2009).

Podendo ser uma ferramenta utilizada na solução de problemas que se referem à alocação eficiente dos recursos limitados entre atividades que competem entre si, com a finalidade de atender a um determinado objetivo, por exemplo, maximização do lucro ou minimização dos custos. O modelo de Programação Linear é formado por funções matemáticas lineares, sendo formado por uma função objetivo e um conjunto de equações e inequações lineares que representam as restrições do problema (SILVA et al., 1998).

De acordo com Arenales et al. (2007), o modelo do problema de otimização linear possui as seguintes características conforme o conjunto de equações e inequações representados de (1) à (5).

Maximizar ou Minimizar

$$Z = C_1 X_1 + C_2 X_2 + \dots + C_n X_n \quad (1)$$

Sujeito a

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1 \quad (2)$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2 \quad (3)$$

...

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m \quad (4)$$

$$x_i \geq 0 \text{ e } b_j \geq 0, \text{ para } i = 1, 2, \dots, n \text{ e } j = 1, 2, \dots, m. \quad (5)$$

Sendo:

Z= Função a ser maximizada ou minimizada, respeitando o conjunto de restrições;

x_i = Variáveis decisórias que representam as quantidades ou recurso que se quer determinar para otimizar o resultado global;

C_i = Coeficientes do lucro ou custo que cada variável é capaz de gerar;

b_j = Quantidade disponível de cada recurso;

a_{ij} =Quantidade de cada recurso que cada variável decisória consome.

(1) É a função que representa o objetivo do problema, denominada função objetivo.

(2) a (5) São as funções que representam as principais restrições do problema.

Por esses motivos a utilização da Pesquisa Operacional no sequenciamento da produção se tornou indispensável, por ter como propósito diminuir os tempos de produção, otimizar a utilização dos recursos, diminuir os tempos em filas, minimizar os desperdícios, auxiliar no cumprimento do prazo de entrega e como consequência disso aumentar a satisfação dos clientes (PAIVA, 2006).

2.4 SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO (*SCHEDULING*)

No mundo empresarial, a ideia de aprimoramento nos processos produtivos está associada ao conceito de competitividade, e o sequenciamento adequado se tornou uma necessidade para a sobrevivência no mercado atual, onde o menor

prazo de entrega pode ser o diferencial nesse contexto competitivo, e seu fracasso resulta na perda significativa da imagem da empresa perante seus clientes (PINEDO, 2002).

O sequenciamento de operações são as decisões que determinam a ordem em que os produtos devem ser fabricados, obedecendo às prioridades e restrições impostas pelo processo industrial. Mas o número de restrições é variado de acordo com cada segmento e processo produtivo, por esse motivo é fundamental a utilização eficiente de cada recurso existente no sistema (PINEDO, 2012).

2.4.1 DEFINIÇÃO DE *SCHEDULING*

Existem diversas definições de *scheduling*, segue abaixo algumas delas encontradas em sua teoria clássica:

- *Scheduling* é a alocação ótima de recursos limitados a atividades no tempo (LAWLER, 1989).

- *Scheduling* trabalha com o destino de recursos escassos para tarefas durante um período, onde existe um processo de tomada de decisão com a finalidade de otimizar um ou mais objetivos (PINEDO, 2002).

- Destino de recursos (máquinas, ferramentas, operadores humanos) em determinado tempo, em grupos de tarefas definidos, respeitando uma variedade de objetivos e restrições (TAHA, 2008).

Segundo Arenales (2007), existem diversos tipos de sequenciamento e cada modelo apresenta propriedades específicas dependendo do meio que se encontram, e para o estudo do *scheduling* deve-se ter alguns conceitos fundamentais, que são:

- RECURSOS: pode ser um bem ou serviço que é usufruído para execução ou operação de uma tarefa. Exemplo: matéria-prima, máquinas, mão de obra, etc.
- ORDEM DE FABRICAÇÃO: indica o que, onde, quando e quanto vou produzir de um determinado produto.
- OPERAÇÃO: conjunto de atividades num recurso que demandam uma quantidade de tempo de processamento.

- TAREFA (*JOB*): conjunto de operações que acarretam na materialização de um produto.

Para que não ocorram interrupções indesejadas no sistema é necessária a verificação da disponibilidade dos recursos antes de dar início ao sequenciamento para garantir o fluxo contínuo da produção.

2.4.2 REGRAS DE SEQUENCIAMENTO

Para a determinação das ordens de processamento utilizam-se regras de sequenciamento que definem qual lote terá prioridade em uma fila, com o objetivo de redução do tempo de produção, redução de custos entre outros.

Barbosa et al. (2012), define como as principais e mais utilizadas regras de sequenciamento da produção são:

FIFO (*First In First Out*): os trabalhos que entram primeiro no sistema são os primeiros a sair. Utilizado quando o foco é na diminuição do tempo de permanência nas máquinas.

LIFO (*Last In First Out*): prioridade para o último que entra no sistema, sendo o primeiro a sair. Pouco utilizado por não auxiliar na qualidade, flexibilidade e no custo.

SPT (*Shortest Processing Time*): preferência para aquele que possui menor tempo de processamento total. Utilizado quando busca aumentar o fluxo e reduzir o tamanho das filas.

LPT (*Longest Processing Time*): preferência para aquele que possui maior tempo de processamento total. Utilizado quando necessitada diminuir a quantidade de setup e troca de máquinas.

EDD (*Earliest Due Date*): prioridade para tarefas mais urgentes, com prazo de entrega inadiável. Sua finalidade é diminuir atrasos.

LS (*Least Slack*): prioridade para tarefa com menor folga entre a data de entrega e o tempo total de processamento. Visa reduzir atrasos.

SIPT (*Shortest Imminent Processing Time*): preferência é cedida para aquele que possui menor tempo de processamento individual. Utilizado quando visa o aumento do fluxo e redução de filas.

LIPT (*Longest Imminet Processing Time*): preferência para aquele que possui maior tempo de processamento individual. Utilizado quando necessita diminuir a quantidade de setup e troca de máquinas.

LWQ (*Least Work Next Queue*): prioridade para tarefa que tem destino à máquina que possui a menor fila no momento. Utilizado quando se visa evitar parada no processo.

CR (*Critical Ratio*): prioridade para aquele que possui a menor razão crítica (tempo de vencimento dividido pelo tempo total de produção)

DSL (*Dynamic Least Slack*): prioridade para menor folga (diferença entre data de entrega e tempo restante de processamento). Utilizado para tarefas mais urgentes, visa reduzir atrasos.

Existem diversas possibilidades de procedimentos admitidos para definir a ordem no sequenciamento, porém a escolha da melhor regra depende de cada objetivo e necessidade da indústria em questão.

2.4.3 CARACTERÍSTICAS E RESTRIÇÕES OPERACIONAIS

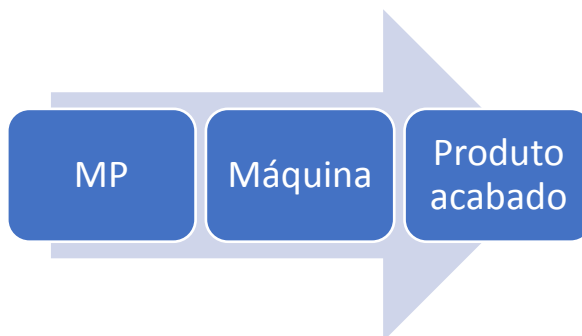
Conforme Tocha (2014), o processamento das tarefas possuem características distintas, divididos conforme o seu sistema produtivo e por suas restrições particulares, sendo os principais modelos: sequenciamento de máquina única, máquinas em paralelo, *job-shop* e *flow-shop*. Porém, esse projeto possui ênfase no *job-shop scheduling* por possuir maior aplicabilidade na realidade industrial.

2.4.3.1 MÁQUINA ÚNICA

Segundo Pinedo (2008), o modelo de máquina única é o mais simples, quando comparado com os demais, nesse caso todos os produtos são processados em uma máquina. É considerada a existência de apenas um recurso ou um conjunto

de recursos sendo modelados como único. A Figura 2 representa um exemplo desse modelo.

FIGURA 2 - MÁQUINA ÚNICA.

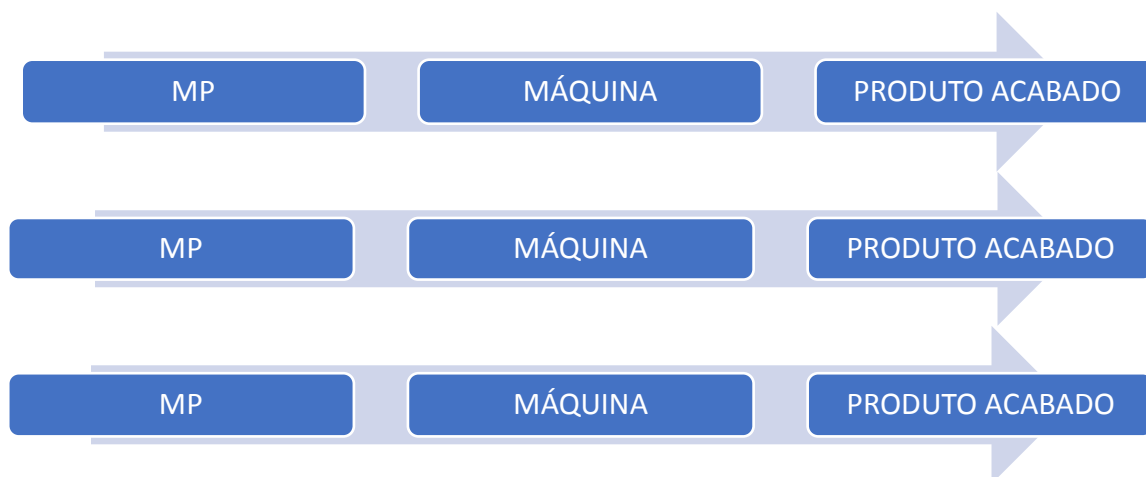


Fonte: Autor (2019).

2.4.3.2 MÁQUINAS EM PARALELO

Ainda segundo Pinedo (2008), o modelo de máquinas em paralelo pode considerar que são máquinas idênticas ou com diferença no tempo de processamento, mas que estejam alocadas em paralelo. Esse modelo refere-se a um conjunto de máquinas que podem ter a mesma função ou não, e com tempos de processamento idênticos ou variados de acordo com sua particularidade. A Figura 3 representa um exemplo desse modelo.

FIGURA 3 - MÁQUINAS EM PARALELO.



Fonte: Autor (2019).

2.4.3.3 JOB-SHOP SCHEDULING

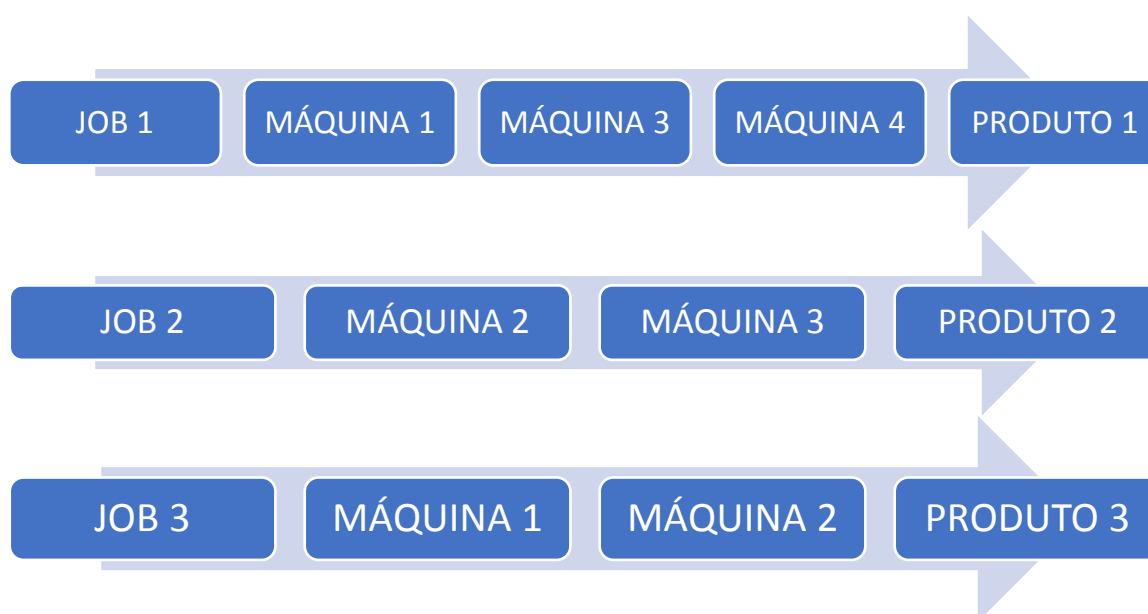
O *Job-Shop* é todo ambiente de produção que possui n tarefas (*Jobs*) e m máquinas, onde cada tarefa é processada nas m máquinas de acordo com um roteiro pré-estabelecido (TAHA, 2008).

Os parâmetros de desempenho desse projeto estão na minimização do *makespan*, que pode ser estabelecido como instante de término de processamento de todas as tarefas a serem processadas, e seu menor valor define o sequenciamento da produção, garantindo maior eficiência operacional (ARENALES et. al., 2007).

A criação de modelos matemáticos embasados em dados e fatos definidos pelo problema permite simular e avaliar um resultado hipotético, servindo de base para propor decisões. Por esse motivo que a Pesquisa Operacional atua junto ao planejamento e controle da produção, onde a solução ótima dos modelos matemáticos influencia na tomada de decisão do sequenciamento da produção (ARENALES et. al., 2007).

A Figura 4 ilustra o ambiente de produção onde existem diversas máquinas e produtos, sendo que cada produto possui sua particularidade de processamento.

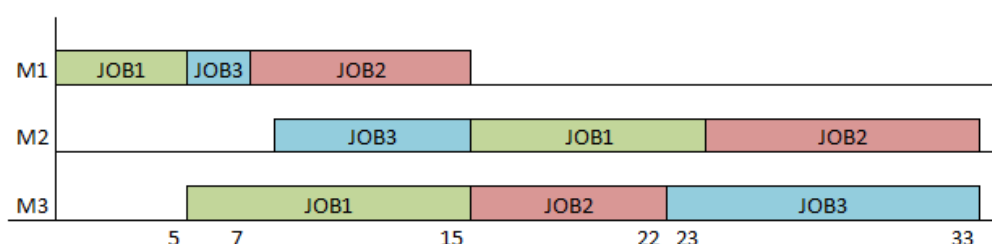
FIGURA 4 - JOB SHOP.



Fonte: Autor (2019).

Para todo problema de *job-shop scheduling* existe um número finito de produtos e máquinas, e cada produto possui uma sequência de operações que devem ser executada. Porém cada uma dessas operações é realizado por um grupo de máquinas, lembrando que cada máquina realiza uma tarefa de cada vez e cada tarefa é processada em apenas uma máquina e as sequências de máquinas de cada tarefa são pré-definidas e fixas, e as operações não podem ser interrompidas. Então, esse método consiste em definir as sequências dos produtos em cada máquina com objetivo de minimizar o tempo de processamento, desde o início do primeiro produto até o término do último (BLASEWICZ; DOMSCHKE; PESCH, 1996). O Gráfico 2 representa o sequenciamento de operações, respeitando as restrições existentes no modelo.

GRÁFICO 2 - REPRESENTAÇÃO DO *JOB SHOP SCHEDULING*.



Fonte: Autor (2019).

E a modelagem do seu problema pode ser feita como um problema de programação linear, onde existe uma função objetivo e as restrições que definem as necessidades e os limites existentes no sistema em questão, e admita que para resolução desse problema, exista no princípio, disponibilidade para as n tarefas no instante zero do sistema e não haja a possibilidade de interrupções no processo, para isso considere as informações do Quadro 1.

QUADRO 1 - ÍNDICES, PARÂMETROS, VARIÁVEIS DO *JOB SHOP*.

Índices	
i	Representa uma tarefa
j	Representa a posição na sequência de tarefas
k	Representa a máquina ou setor

m	Representa o número total de máquinas ou setores
n	Representa o número total de tarefas
Parâmetros	
M	Número grande
p_{ik}	Representa o tempo de processamento da tarefa i na máquina ou setor k
Variáveis	
C_{ik}	Representa o instante de término do processamento da tarefa na posição j na máquina ou setor k
x_{ijk}	Assume valor igual a 1 se a tarefa i precede a tarefa j na máquina k e valor igual a 0 caso contrário.
$C_{i(m)}$	Representa o <i>makespan</i> (Instante de conclusão da última tarefa)

Fonte: Autor (2019).

O somatório do $C_{i(m)}$ corresponde ao *makespan*, e seu objetivo é ser minimizado, pois o foco é no menor tempo de processamento total de todas as tarefas. Será adotado o seguinte modelo, onde a função objetivo é a Equação 1 e as restrições são o conjunto de equações e inequações de (6) a (11).

$$\min \sum_{i=1}^n C_{i(m)} \quad (6)$$

Sujeito à:

$$C_{i,i(1)} \geq p_{i,j} \quad i = 1, \dots, n \quad (7)$$

$$C_{i,i(k+1)} \geq C_{i,i(k)} + p_{i,j(k+1)}, \quad i = 1, \dots, n, \quad k = 1, \dots, m-1 \quad (8)$$

$$C_{jk} \geq C_{ik} + p_{jk} - M(1 - x_{ijk}), \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, n, \quad k = 1, \dots, m \quad (9)$$

$$C_{ik} \geq C_{jk} + p_{jk} - Mx_{ijk}, \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, n, \quad k = 1, \dots, m \quad (10)$$

$$C \in R_+^{mn}, x \in B^{mnn} \quad (11)$$

A equação (6) é a função objetivo do modelo que está associado ao menor tempo de fluxo total das tarefas. As restrições representadas pelas inequações (7) garante a condição de que a primeira operação de cada tarefa i é completada após o respectivo tempo de processamento. As restrição (8) dizem que a operação $k + 1$ da tarefa i é completada após o termino da operação k e do tempo de processamento

da operação $k + 1$. E as restrições (9) e (10) são disjuntivas, ou seja, elas não podem ser executadas simultaneamente e a ativação de uma anula a outra.

Existe a necessidade de fazer algumas alterações, para todo $x_{ijk} = 1$, as inequações (9) e (10), tornam-se:

$$\begin{aligned} C_{jk} &\geq C_{ik} + p_{jk} \\ C_{ik} - C_{jk} &\geq p_{ik} - M \end{aligned}$$

Logo, a restrição (10) se torna inativa. E para todo $x_{ijk} = 0$ algumas alterações também são necessárias, as restrições (9) e (10) tornam-se:

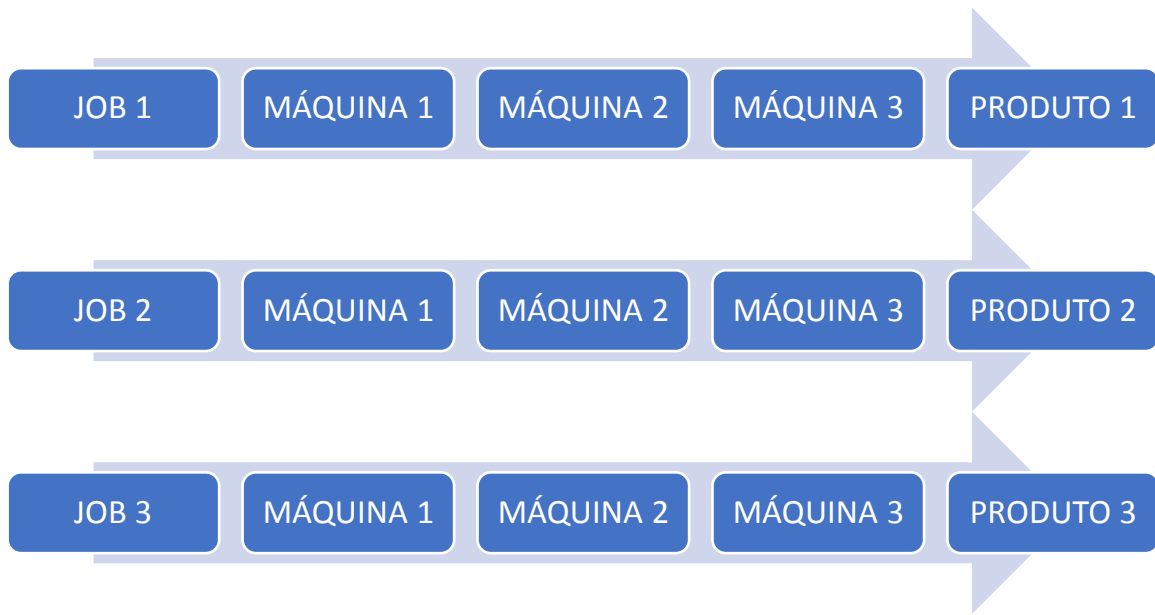
$$\begin{aligned} C_{jk} - C_{ik} &\geq p_{jk} - M \\ C_{ik} &\geq C_{jk} + p_{ik} \end{aligned}$$

Ou seja, a restrição (9) se torna inativa. E a restrição (11) define o tipo das variáveis, determinando que C_{ik} admita apenas valores positivos e retorne resposta binária. Há a possibilidade de modificações do modelo citado para outros critérios de otimização, para isso é necessário fazer alterações adequadas na formulação das equações e inequações de (6) e (11) (ARENALES et. al. 2015).

2.4.3.4 FLOW SHOP

De acordo com Pinedo (2008), no modelo *flow shop* é caracterizado por máquinas em série, onde todo produto deve ser processado por todas as máquinas existentes no sistema, e todos dispõem de mesma sequência de processamento. A fila do processo geralmente opera no esquema *first in first out* (FIFO), onde depois de completar o processamento em uma máquina o item deve entrar na fila para ser processado na máquina seguinte. A Figura 5 ilustra o sequenciamento de todos os produtos.

FIGURA 5 - FLOW SHOP



Fonte: Autor (2019).

O *Flow shop* é um caso particular do *Job shop*, onde todos os produtos possuem a mesma sequência de processamento.

Segundo Arenales *et al.* (2007), a formulação do modelo de Programação Linear Misto pode ser definido conforme o conjunto de equações e inequações representados de (12) à (19).

$$\min C_{max} = s_{mn} + \sum_{i=1}^n p_{in} z_{in} \quad (12)$$

Sujeito à:

$$\sum_{j=1}^n z_{ij}, \quad i = 1, \dots, n \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^n z_{ij}, \quad j = 1, \dots, n \quad (14)$$

$$s_{1j} + \sum_{i=1}^n p_{i1} z_{ij} = s_{1,j+1}, \quad j = 1, \dots, n-1 \quad (15)$$

$$s_{11} = 0 \quad (16)$$

$$s_{k1} + \sum_{i=1}^n p_{ik} z_{i1} = s_{k+1,1}, \quad k = 1, \dots, m-1 \quad (17)$$

$$s_{kj} + \sum_{i=1}^n p_{ik} z_{ij} \leq s_{k+1,j}, \quad j = 2, \dots, n, \quad k = 1, \dots, m-1 \quad (18)$$

$$s_{kj} + \sum_{i=1}^n p_{ik} z_{ij} \leq s_{k,j+1}, \quad j = 1, \dots, n-1, \quad k = 2, \dots, m \quad (19)$$

$$s \in R_+^{nm}, z \in B^{nm} \quad (20)$$

Os índices, as variáveis e os parâmetros do modelo representados pelo conjunto de equações e inequações de (12) a (20) estão definidos no Quadro 2.

QUADRO 2 - ÍNDICES, PARÂMETROS, VARIÁVEIS DO *FLOW SHOP*.

Índices	
i	Representa uma tarefa
j	Representa a posição na sequência de tarefas
k	Representa a máquina ou setor
m	Representa o número total de máquinas ou setores
n	Representa o número total de tarefas
Parâmetros	
p_{ik}	Representa o tempo de processamento da tarefa i na máquina ou setor k
Variáveis	
s_{kj}	Representa o instante de início de processamento da tarefa na posição j na máquina ou setor k
z_{ij}	Assume valor igual a 1 se a tarefa i é designada à j -ésima posição e valor igual a 0 caso contrário.
C_{max}	Representa o <i>makespan</i> (Instante de conclusão da última tarefa)

Fonte: Autor (2019).

A equação (12) é a função objetivo que corresponde à minimização do *makespan*, ou seja, o instante de conclusão da última tarefa da sequência (posição n) na última máquina ou setor (máquina ou setor m). O conjunto de restrições (13) garante que cada tarefa i esteja associada a uma única posição na sequência, e as restrições (14) asseguram que cada posição j da sequência deve estar associada

apenas a uma única tarefa. As restrições (15) obrigam que a tarefa na posição j inicie o seu processamento na máquina ou setor $k=1$ logo após que sua tarefa predecessora tenha sido processada nessa máquina. A restrição (16) estabelece que a primeira tarefa da sequência $j=1$ comece seu processamento na máquina ou setor $k=1$ no instante zero. As restrições (17) garante que a primeira tarefa na sequência seja processada na próxima máquina ou setor $k+1$, desde que o seu processamento na máquina ou setor k tenha sido completado. As restrições (18) garantem que uma tarefa na posição j não pode ser iniciada na próxima máquina ou setor $k+1$ antes do termino do seu processamento na máquina ou setor k . As restrições (19) asseguram que uma tarefa na posição $j+1$ não pode iniciar a sua operação na máquina ou setor k antes que o processamento da tarefa j na máquina ou setor k tenha sido completado. As restrições (20) indicam que todas as variáveis s_{kj} são não negativas e que todas as variáveis z_{ij} são binárias.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

A classificação do estudo aqui proposto para a definição do método mais adequado foi obtido de acordo com a proposta da figura 6, onde é possível identificar as características presentes na pesquisa e conduzir o desenvolvimento de maneira concordante.

FIGURA 6 - METODOLOGIA DE PESQUISA EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO.



Fonte: Miguel, 2010 (Adaptado)

Dessa forma, a pesquisa pode ser classificada mediante alguns critérios, tais como: natureza, abordagem, objetivos e procedimentos técnicos utilizados (SILVA; MENEZES, 2005).

Diante disso, essa pesquisa foi classificada como de natureza aplicada, objetivo com caráter normativo, abordagem quantitativa e método mais adequado foi modelagem e simulação.

3.1.1 QUANTO À NATUREZA

Quanto a sua natureza, a pesquisa pode ser classificada como básica ou aplicada. Onde o objetivo da pesquisa básica é adquirir novos conhecimentos que contribuem no desenvolvimento da ciência, mesmo que não exista aplicação prática. Mas na pesquisa aplicada o objetivo é criar conhecimentos científicos com aplicação prática com propósito à solução de problemas específicos. (SILVA; MENEZES, 2005).

Logo, esta pesquisa possui um caráter de natureza aplicada, pois visa gerar conhecimento prático a partir do aprimoramento dos métodos e abordagens disponíveis na literatura vigente.

3.1.2 QUANTO AOS OBJETIVOS

Quanto aos objetivos, a pesquisa pode ser classificada como exploratória, descritiva, explicativa ou normativa. A pesquisa exploratória é utilizada quando há poucos dados disponíveis, onde é necessário aprofundar e apurar ideais para construção de hipóteses. Já a pesquisa descritiva tem como finalidade enumerar e ordenar dados, sem comprovar ou contestar hipóteses exploratórias. A pesquisa explicativa tem como objetivo identificar os aspectos que podem contribuir ou determinar a ocorrência dos fenômenos. Já a pesquisa normativa visa melhorar os resultados presentes na literatura por meio do desenvolvimento de normas, políticas,

estratégias e ações com a finalidade de encontrar uma solução ótima para um problema e comparar os resultados e desempenhos com estratégias que tratam do mesmo problema, para aperfeiçoamento dos resultados disponíveis (MIGUEL et. al., 2012).

Portanto essa pesquisa possui objetivo com caráter normativo, pelo fato de buscar uma solução ótima para um problema e comparar os resultados e desempenhos com soluções do mesmo problema, e gerar o aprimoramento dos resultados disponíveis.

3.1.3 QUANTO À ABORDAGEM

Sobre a abordagem, a pesquisa pode ser classificada como quantitativa ou qualitativa. Segundo Silva e Menezes (1998) a abordagem de pesquisa quantitativa determina que tudo pode ser quantificável, ou seja traduzir em números as informações. Já a pesquisa qualitativa é descritiva, as informações são analisadas por meio da indução, ou seja, não são utilizados métodos estatísticos ou outros métodos quantitativos.

Este trabalho possui caráter quantitativo, onde toda informação é traduzida em números para ser aplicado em um modelo de Programação Linear, com a finalidade de determinar o melhor sequenciamento de operações, para atingir o menor tempo total de processamento.

3.1.4 QUANTO AO MÉTODO

A pesquisa pode ser feita por meios de experimentos, modelagem e simulação ou *survey*. De acordo com Turrioni e Mello (2012) a principal característica da pesquisa experimental é que o pesquisador estabelece e controla os valores que serão utilizados e demonstra utilizando de análises estatísticas as causas, conforme as variações dos parâmetros definidos. Já o método de

modelagem e simulação é utilizado quando se pretende testar e analisar um sistema através de um modelo, aplicando algumas alterações e verificando o comportamento do sistema em questão. A pesquisa *survey* é um método de coleta de dados diretamente de pessoas a respeito de suas ideias, planos, sentimentos e educacional e financeiro, onde é analisada a amostra de um problema a ser investigado a fim de extrair conclusões acerca dessa amostra.

Segundo Goldman et al.(2019) uma simples pesquisa de campo para o levantamento de dados com objetivo de aplicar, comprovar ou validar algum método ou modelo não pode ser definido como estudo de caso. O estudo de caso é caracterizado: como estratégia de pesquisa que analisa profundamente o caso; efetua exame detalhado do ambiente; envolve numerosos níveis de análise; combinam métodos de coletas de dados como arquivos, questionários, entrevistas e observações; e podem ter evidências qualitativas e/ou quantitativas.

Sendo assim, este trabalho é classificado quanto ao método como modelagem e simulação.

3.2 EMPRESA

A empresa que disponibilizou os dados está localizada no município de Apucarana, centro-norte do estado do Paraná, é uma indústria de móveis planejados que visa à alta qualidade e sofisticação dos seus produtos; seu quadro de colaboradores conta com 10 talentos distribuídos nas áreas de administração, engenharia, manufatura, vendas e gestão.

Iniciou suas atividades no ano de 1998, tendo sempre como foco, oferecer personalização completa de todos os ambientes, tornando-se especialista no segmento e conquistando título de uma das indústrias de móveis planejados de mais respeito em seu município.

A qualidade e a durabilidade de seus produtos são resultado do: comprometimento de todos os profissionais que trabalham na indústria; matéria prima de alta qualidade; máquinas de alto padrão utilizadas nos processos produtivos.

3.2.1 PROBLEMA

A indústria busca cada vez mais por excelência e melhoria continua dos seus processos produtivos, tendo em vista a ampla concorrência no setor industrial. Sendo que a qualidade, o preço reduzido e menor prazo de entrega podem ser um diferencial entre seus competidores de mercado.

O sequenciamento da produção é quem define a ordem que os produtos são fabricados, e a maioria das indústrias de pequeno porte não aplicam nenhum método para otimizar essa etapa do planejamento da produção, sendo que geralmente definem o sequenciamento de acordo com os prazos de entrega ou por questões financeiras. Esse trabalho visa gerar a aplicação de um modelo matemático em uma indústria de móveis planejados, onde o objetivo é minimizar o tempo total de processamento em determinado tempo, resultando no aumento da capacidade por conseguir produzir mais no mesmo período e reduzir os custos de produção por produzir o mesmo produto em menor tempo.

3.3 ETAPAS DA PESQUISA

Esse trabalho foi dividido em cinco etapas, onde a primeira consiste na pesquisa bibliográfica. Essa etapa é caracterizada pela busca de informações relacionadas com o tema em livros, artigos científicos, monografias e teses. O seu objetivo é reunir dados que servirão de base para construção e desenvolvimento do tema proposto.

A segunda etapa refere-se à identificação do objetivo e limitações do problema, nesse momento é definido o escopo da pesquisa, que é análise e coleta das informações para desenvolver o modelo matemático, tais como tempo de processamento, sequencia de processamento particular de cada produto, número de produtos, máquinas e quantidade demandada.

A terceira etapa compreende no desenvolvimento do modelo matemático, onde o objetivo é compreendido com uma função principal que neste caso é o menor

tempo total de processamento de todos os produtos, que é disposta em termos das variáveis de decisão, sendo denominada como função objetivo. As limitações ou restrições do problema estão também relacionadas às variáveis de decisão e são expressas através de equações e inequações.

A quarta etapa é a simulação do modelo matemático, e nesse trabalho foi utilizado o suplemento *Solver* do *Microsoft Office Excel™ 2010*. Os algoritmos aplicados para solução do problema utilizam estratégias que visam a busca por soluções que se encontram no conjunto de soluções ótimas do problema, que faz com que a busca pela solução ótima não se estacione em ótimos locais mas encontre as melhores soluções existentes. Mesmo não tendo a certeza de atingir a solução ótima do problema esse método garante a obtenção da melhor solução ou as mais próximas dela.

A quinta e última etapa consiste na análise dos resultados e validação do modelo. Para isso foi coletado dados de uma empresa moveleira, e em seguida foi aplicado essas informações no modelo matemático e comparado os resultados obtidos com os resultados reais da empresa, logo a validação do modelo é feita por meio de comparação. Caso a solução obtida não seja satisfatória, é necessária a reformulação do modelo.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

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

4.1 MODELAGEM MATEMATICA

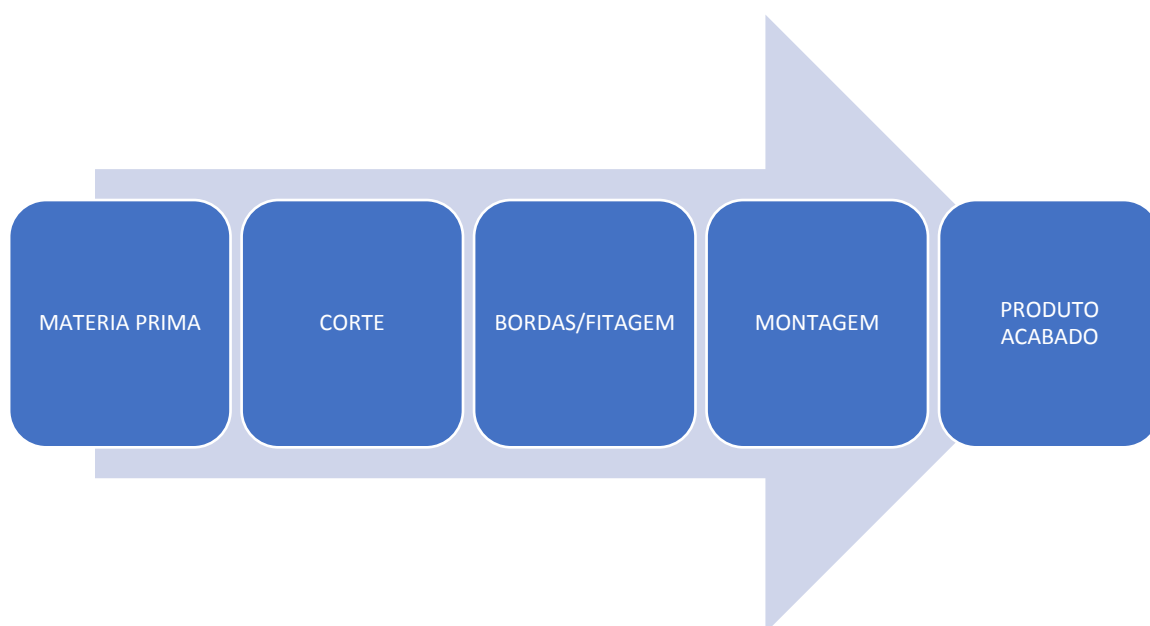
Existe um conjunto de informações que são necessárias para a construção do modelo, que são:

- Quantidade de maquinas;
- Quantidade de produtos;
- Sequencia de processamento dos produtos;
- Tempo de processamento particular de cada produto em cada maquina;
- Cada maquina processa um produto por vez;
- Tempo de processamento total por item.

Foram utilizadas informações coletadas de uma indústria do setor moveleiro, com a finalidade de aplicar o modelo matemático e verificar sua eficiência através da comparação dos resultados obtidos com os dados reais da indústria.

Foi analisada somente a produção de quatro produtos: armário de banheiro, cozinha, roupeiro e um painel de TV.

FIGURA 7 - FLUXO DO PROCESSO DA INDÚSTRIA EM QUESTÃO.



Fonte: Autor (2019).

A sequência de processamento é a mesma para todos os itens, começando no corte, em seguida é feita a colagem das bordas e por fim a montagem do móvel, conforme representado na Figura 7.

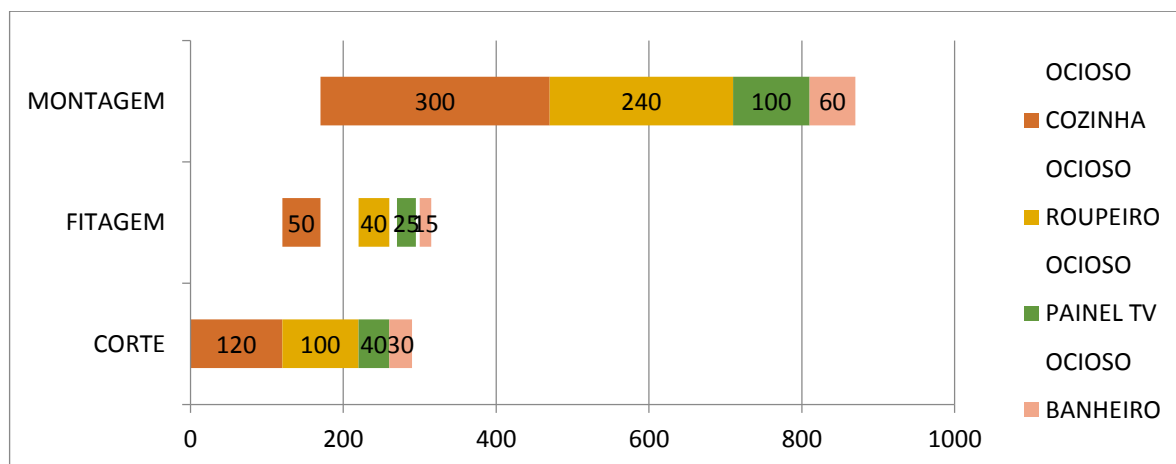
QUADRO 3 - TIPO DE PRODUTO COM SEU TEMPO DE PROCESSAMENTO..

	BANHEIRO	COZINHA	ROUPEIRO	PAINEL TV
CORTE	30	120	100	40
BORDAS	15	50	40	25
MONTAGEM	60	300	240	100

Fonte: Autor (2019).

O Quadro 3 representa a relação entre todos os produtos a serem processados com os tempos de processamento em cada etapa.

GRÁFICO 3 - REPRESENTAÇÃO DO SEQUENCIAMENTO UTILIZADO NA INDÚSTRIA MOVELEIRA



Fonte: Adaptado dos dados coletados da empresa (2019).

O Gráfico 3, demonstra todas as restrições e limitações do processo e também o sequenciamento adotado pela empresa, sendo que o responsável por organizar e definir a ordem em que os produtos são fabricados, afirmou que, define o sequenciamento por ordem de chegada e por prioridades no prazo de entrega.

Sendo assim, com os parâmetros dos tempos de processamento de cada tarefa conforme mostrado no Quadro 3, tem-se a formulação do modelo de programação linear mista conforme o conjunto de equações e inequações de (21) a (48) e o modelo mostrado pelo conjunto de equações e inequações de (12) à (20) no capítulo 2 que diz respeito ao referencial teórico.

QUADRO 4 - ÍNDICES.

Índices	
$i=1$	Banheiro
$i=2$	Cozinha
$i=3$	Roupeiro
$i=4$	Painel de TV
$k=1$	Setor de corte
$k=2$	Setor de colagem de bordas
$k=3$	Setor de Montagem

Fonte: Autor(2019).

Nota-se que o índice j é um conjunto que vai de 1 à 4, pois representa a posição em que cada produto i (veja o Quadro 4) vai ser processado na sequencia de operações que devem ser programados.

$$\min C_{max} = s_{34} + 60z_{14} + 300z_{24} + 240z_{34} + 100z_{44} \quad (21)$$

Sujeito à:

$$z_{11} + z_{12} + z_{13} + z_{14} = 1 \quad (22)$$

$$z_{21} + z_{22} + z_{23} + z_{24} = 1 \quad (23)$$

$$z_{31} + z_{32} + z_{33} + z_{34} = 1 \quad (24)$$

$$z_{41} + z_{42} + z_{43} + z_{44} = 1 \quad (25)$$

$$z_{11} + z_{21} + z_{31} + z_{41} = 1 \quad (26)$$

$$z_{12} + z_{22} + z_{32} + z_{42} = 1 \quad (27)$$

$$z_{13} + z_{23} + z_{33} + z_{43} = 1 \quad (28)$$

$$z_{14} + z_{24} + z_{34} + z_{44} = 1 \quad (29)$$

$$s_{11} + 30z_{11} + 120z_{21} + 100z_{31} + 40z_{41} = s_{12} \quad (30)$$

$$s_{12} + 30z_{12} + 120z_{22} + 100z_{32} + 40z_{42} = s_{13} \quad (31)$$

$$s_{13} + 30z_{13} + 120z_{23} + 100z_{33} + 40z_{43} = s_{14} \quad (32)$$

$$s_{11} = 0 \quad (33)$$

$$s_{11} + 30z_{11} + 120z_{21} + 100z_{31} + 40z_{41} = s_{21} \quad (34)$$

$$s_{21} + 15z_{11} + 50z_{21} + 40z_{31} + 25z_{41} = s_{31} \quad (35)$$

$$s_{12} + 30z_{12} + 120z_{22} + 100z_{32} + 40z_{42} \leq s_{22} \quad (36)$$

$$s_{22} + 15z_{12} + 50z_{22} + 40z_{32} + 25z_{42} \leq s_{32} \quad (37)$$

$$s_{13} + 30z_{13} + 120z_{23} + 100z_{33} + 40z_{43} \leq s_{23} \quad (38)$$

$$s_{23} + 15z_{13} + 50z_{23} + 40z_{33} + 25z_{43} \leq s_{32} \quad (39)$$

$$s_{14} + 30z_{14} + 120z_{24} + 100z_{34} + 40z_{44} \leq s_{24} \quad (40)$$

$$s_{24} + 15z_{14} + 50z_{24} + 40z_{34} + 25z_{44} \leq s_{34} \quad (41)$$

$$s_{21} + 15z_{11} + 50z_{21} + 40z_{31} + 25z_{41} \leq s_{22} \quad (42)$$

$$s_{22} + 15z_{12} + 50z_{22} + 40z_{32} + 25z_{42} \leq s_{23} \quad (43)$$

$$s_{23} + 15z_{13} + 50z_{23} + 40z_{33} + 25z_{43} \leq s_{24} \quad (44)$$

$$s_{31} + 60z_{11} + 300z_{21} + 240z_{31} + 100z_{41} \leq s_{32} \quad (45)$$

$$s_{32} + 60z_{12} + 300z_{22} + 240z_{32} + 100z_{42} \leq s_{33} \quad (46)$$

$$s_{33} + 60z_{13} + 300z_{23} + 240z_{33} + 100z_{43} \leq s_{34} \quad (47)$$

$$s \in R_+^{43}, z \in B^{43} \quad (48)$$

Com a resolução do modelo matemático baseado nos dados coletados da indústria, é possível efetuar a comparação dos resultados obtidos, com as informações reais, e verificar se o resultado do modelo proposto é válido ou não.

O modelo foi formulado dentro de planilhas eletrônicas do Excel™, conforme estão ilustradas nas Figuras 8, 9, 10, 11, 12 e 13.

FIGURA 8 - RESTRIÇÕES 26 A 29.

	G	H	I	J	K	L
1		$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$	SOMA
2	BANHEIRO ($i=1$)	1	0	0	0	1
3	COZINHA ($i=2$)	0	0	0	1	1
4	ROUPEIRO ($i=3$)	0	0	1	0	1
5	PAINEL TV ($i=4$)	0	1	0	0	1
6	SOMA	1	1	1	1	4

Fonte: Autor (2019).

No Excel™, conforme ilustrado na Figura 8, as células H2 à K5 representam a variável z_{ij} , sendo que a soma de cada coluna representada nas células de H6, I6, J6, K6 equivalem as restrições representadas nas equações (22), (23), (24), (25) e a soma de cada linha, correspondente as células L2 a L5, equivalem as restrições representadas nas equações de 26 à 29. Nota-se que na Figura 8, as células H6, I6, J6, K6, L2, L3, L4 e L5 possuem valores iguais a 1, respeitando as restrições das equações que vão de (22) à (29). Essas restrições representam as limitações do problema de que cada setor da fábrica de móveis só pode processar apenas um único produto por vez e que cada produto só pode ser processado em apenas num único setor por vez.

FIGURA 9 - RESTRIÇÕES 30 A 32.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
8		TEMPO DE INICIO						TEMPO DE CONCLUSÃO			
9		$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$			$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$
10	CORTE ($k=1$)	0	30	70	170		CORTE ($k=1$)	30	70	170	290
11	FITAGEM ($k=2$)	30	80	170	400		FITAGEM ($k=2$)	45	105	210	450
12	MONTAGEM ($k=3$)	45	105	210	450		MONTAGEM ($k=3$)	105	205	450	750

Fonte: Autor (2019).

De acordo com a Figura 9, as células B10, C10, D10, E10 representam os tempos de início de todas as tarefas na primeira máquina e as células H10, I10, J10, K10 representam o instante de conclusão dos processamentos de todas as tarefas na primeira máquina. Nota-se que os tempos de conclusão das tarefas do primeiro setor, equivalem ao tempo de início das tarefas seguintes no mesmo setor. Ou seja, $H_{10}=C_{10}$, $I_{10}=D_{10}$, $J_{10}=E_{10}$, sendo que essa correlação entre tempo de início com o tempo de conclusão se dão por meio do conjunto de restrições de (30) a (32), por assegurar que o instante de processamento da tarefa seguinte ocorra somente após o processamento da tarefa predecessora. Porém, esses conjuntos de restrições são apenas para o primeiro setor, por não apresentar tempos ociosos.

FIGURA 10 - RESTRIÇÃO 33.

	A	B	C	D	E
8		TEMPO DE INICIO			
9		$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$
10	CORTE ($k=1$)	0	30	70	170
11	FITAGEM ($k=2$)	30	80	170	400
12	MONTAGEM ($k=3$)	45	105	210	450

Fonte: Autor (2019).

A restrição (33) estabelece que a primeiro produto da sequência comece seu processamento na primeira máquina no instante zero, assim como na figura (10), veja a célula B10.

FIGURA 11 - RESTRIÇÕES 34 E 35.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
8		TEMPO DE INÍCIO						TEMPO DE CONCLUSÃO			
9		$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$			$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$
10	CORTE ($k=1$)	0	30	70	170		CORTE ($k=1$)	30	70	170	290
11	FITAGEM ($k=2$)	30	80	170	400		FITAGEM ($k=2$)	45	105	210	450
12	MONTAGEM ($k=3$)	45	105	210	450		MONTAGEM ($k=3$)	105	205	450	750

Fonte: Autor (2019).

Segundo a Figura 11, as células B10, B11, B12, H10, H11 e H12 correspondem aos tempos de início e conclusão de cada processo do produto na posição de sequência $j=1$. Nota-se que as células B11 e B12 equivalem as células H10 e H11, isso acontece por respeitarem as restrições (34) e (35), sendo que essas restrições asseguram que a sequência de processamento deve ser respeitada (primeiro o setor de corte, segundo o setor de fitagem e por último o setor de montagem, veja na Figura 7), impossibilitando a alteração da ordem de processamento. Ou seja, o início do processo 2 ($k=2$), localizado na célula B11, equivale ao tempo de conclusão do processo 1 ($k=1$), que está na célula H10, isso também acontece para o início do processo 3 com a conclusão do processo 2.

FIGURA 12 - RESTRIÇÕES 36 A 41.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
8		TEMPO DE INÍCIO						TEMPO DE CONCLUSÃO			
9		$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$			$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$
10	CORTE ($k=1$)	0	30	70	170		CORTE ($k=1$)	30	70	170	290
11	FITAGEM ($k=2$)	30	80	170	400		FITAGEM ($k=2$)	45	105	210	450
12	MONTAGEM ($k=3$)	45	105	210	450		MONTAGEM ($k=3$)	105	205	450	750

Fonte: Autor (2019).

De acordo com a Figura 12, as células em destaque correspondem às restrições que vão de (36) à (41), sendo que elas são responsáveis por assegurar que o produto na posição j não seja processado no setor $k+1$ antes de ter sido processado no setor k . Ou seja, esse conjunto de restrições garante que o ordenamento em que os produtos serão fabricados seja respeitado. Observa-se na

Figura 12, que cada célula pintada de cor distinta representa uma restrição. Ou seja, o valor da célula I10 é menor ou igual a C11, o valor da célula I11 é menor ou igual a ao valor da célula C12 e assim por diante. Por exemplo, o tempo de conclusão do produto na posição 2 no setor de corte é 70 e o tempo de início de processamento desse mesmo produto no setor de fitagem ocorre em 80, ou seja, logo após o processamento no setor de corte. Isto deve ocorrer para os produtos nas demais posições da sequência de processamento.

FIGURA 13 - RESTRIÇÕES 42 A 47.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
8		TEMPO DE INICIO						TEMPO DE CONCLUSÃO			
9		$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$			$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$
10	CORTE ($k=1$)	0	30	70	170		CORTE ($k=1$)	30	70	170	290
11	FITAGEM ($k=2$)	30	80	170	400		FITAGEM ($k=2$)	45	105	210	450
12	MONTAGEM ($k=3$)	45	105	210	450		MONTAGEM ($k=3$)	105	205	450	750

Fonte: Autor (2019).

Conforme ilustrado na Figura 13, onde as células em destaque representam às restrições de 42 a 47. Sendo que essas restrições garantem que o produto na posição $j+1$ não seja processado na máquina k antes do produto na posição j na mesma máquina k . Ou seja, esse conjunto de restrições garantem a impossibilidade de que dois ou mais produtos sejam processados ao mesmo tempo no mesmo setor.

4.2 RESULTADOS

A partir do modelo estruturado, foi realizado a implementação por meio do *Solver* (suplemento do *Excel*TM), onde foi estabelecida a função objetivo, as células variáveis, as restrições e o método escolhido para a resolução do problema foi o *Simplex*, conforme a Figura 14.

FIGURA 14 - SUPLEMENTO SOLVER.

Parâmetros do Solver

Definir Objetivo:

Para: ☐ Máx. ☒ Mín. ☐ Valor de:

Alterando Células Variáveis:

Sujeito às Restrições:

- \$H\$10:\$H\$11 = \$B\$11:\$B\$12
- \$H\$10:\$J\$10 = \$C\$10:\$E\$10
- \$H\$11:\$J\$11 <= \$C\$11:\$E\$11
- \$H\$12:\$J\$12 <= \$C\$12:\$E\$12
- \$H\$2:\$K\$5 = binário
- \$H\$6:\$K\$6 = 1
- \$I\$10:\$I\$11 <= \$C\$11:\$C\$12
- \$J\$10:\$J\$11 <= \$D\$11:\$D\$12
- \$K\$10:\$K\$11 <= \$E\$11:\$E\$12
- \$L\$2:\$L\$5 = 1

☒ Tornar Variáveis Irrestritas Não Negativas

Selecionar um Método de Solução:

Método de Solução

Selecione o mecanismo GRG Não Linear para Problemas do Solver suaves e não lineares. Selecione o mecanismo LP Simplex para Problemas do Solver lineares. Selecione o mecanismo Evolutionary para problemas do Solver não suaves.

Ajuda Resolver Fechar

Fonte: Autor (2019).

Esse modelo tem como finalidade minimizar o *makespan* (tempo total de processamento de todas as tarefas), gerando um sequenciamento de operações eficiente e, consequentemente aumentando a capacidade e também reduzindo o custo.

Para autenticar o modelo foi verificado se o resultado obtido através da modelagem era satisfatório, ou seja, se com a resolução do problema os resultados alcançados foram melhores que os encontrados em uma situação real. Os resultados obtidos estão representados na Figura 15.

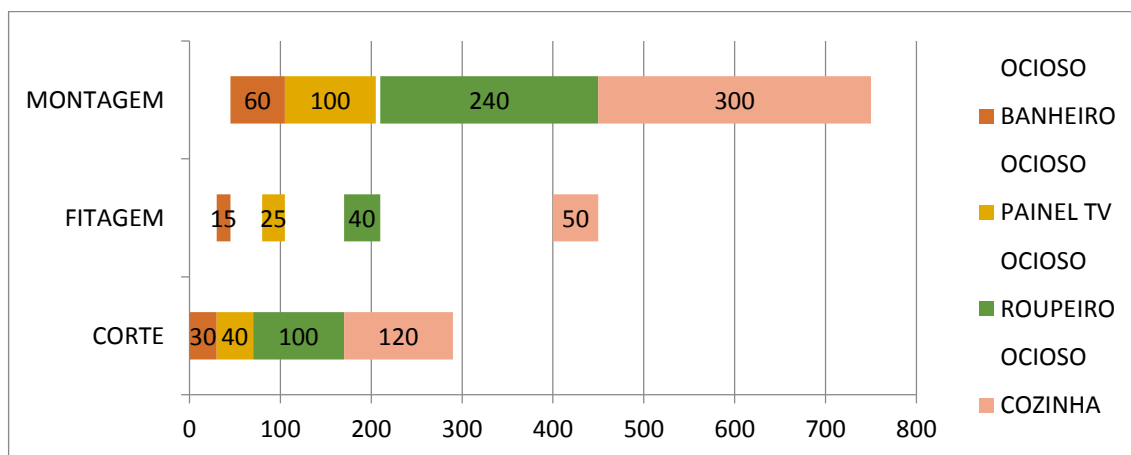
FIGURA 15 - *MAKESPAN*..

8		TEMPO DE INICIO						TEMPO DE CONCLUSÃO				
9		$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$			$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$	
10	CORTE ($k=1$)	0	30	70	170			CORTE ($k=1$)	30	70	170	290
11	FITAGEM ($k=2$)	30	80	170	400			FITAGEM ($k=2$)	45	105	210	450
12	MONTAGEM ($k=3$)	45	105	210	450			MONTAGEM ($k=3$)	105	205	450	750
13												
14	MAKESPAN	750										

Fonte: Autor (2019).

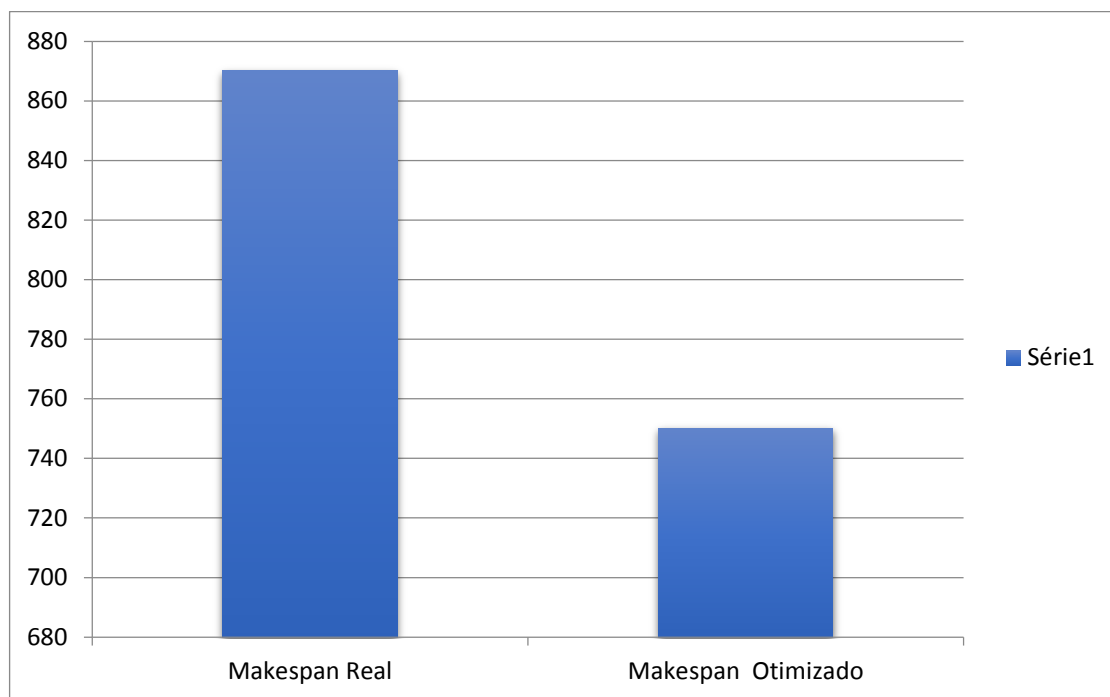
O gráfico 4 ilustra: os tempos de processamento em cada setor, sendo que cada cor representa um produto, os tempos ociosos representados na cor branca e o sequenciamento da produção, relacionando a ordem em que estão dispostos em cada setor com cada produto e sua respectiva cor.

GRÁFICO 4 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS OBTIDOS.



Fonte: Autor (2019).

Em comparação ao sequenciamento da produção que era utilizado, notou-se que o novo sequenciamento possui resultados satisfatórios, pois diminuiu *makespan*. Com isso, foi possível minimizar a utilização do tempo (aumentando a capacidade) e reduzir custos (produzindo mais no mesmo período de tempo). O Gráfico 5 revela a validação do modelo.

GRÁFICO 5 - COMPARATIVO ENTRE O *MAKESPAN*.

Fonte: Autor (2019).

A partir do novo sequenciamento da produção, foi possível reduzir 120 minutos, equivalente a 13,8% do tempo total que era destinado para o sequenciamento anterior, notou que os dados mencionados anteriormente comprovam a eficiência do modelo e do método aplicado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As questões que procedem do sequenciamento da produção possuem grande aplicabilidade, geralmente no setor industrial. Esse trabalho comprovou a aplicação de um modelo matemático para resolução de um problema de programação linear (PL) que tem como objetivo a redução do *makespan*, a partir da otimização do sequenciamento.

Foi considerado como *makespan* o tempo total de processamento de todas as tarefas, onde sua minimização acarreta em grandes benefícios para a empresa. Podendo afirmar que a otimização do sequenciamento da produção gera ganhos financeiros e podendo ser o diferencial entre os concorrentes do mesmo setor, pois influencia diretamente no prazo de entrega do produto acabado.

O planejamento da produção expresso pelo modelo evidenciou uma redução de 120 minutos que representa 13,8% do total de minutos utilizados por um sequenciamento inadequado. Logo o alvo central desse estudo foi atingido, pelo fato de que o desenvolvimento de um modelo matemático para o sequenciamento da produção resultou na redução do *makespan*.

Ainda que o modelo desenvolvido tenha comprovado contribuir na redução do tempo total de processamento, existem outros fatores que podem interferir na produção, como: quebra de máquina, parada para manutenção, ociosidade e erros causados pelo operador de máquina, falta de matéria prima, entre outros. Mesmo assim a utilização do modelo construído apresenta grande contribuição na redução do *makespan*, mas não sendo totalmente eficaz por existir a possibilidade da ocorrência dos fatores citados anteriormente.

Analisando os resultados obtidos durante a execução, nota-se que o modelo pode ter complicações quando o número de tarefas e/ou máquinas é muito elevado, gerando uma restrição na utilização, por necessitar de longo período de tempo para obtenção dos resultados. Portanto para problemas de grande porte é aconselhado a utilização de métodos heurísticos.

Uma outra perspectiva para pesquisas futuras seria desenvolver, ampliar o modelo matemático em questão com adição de novas restrições a fim de adequar ainda mais o modelo com a realidade de uma indústria.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, E. L. **Introdução à pesquisa operacional: métodos e modelos para análise de decisões**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- ARENALES, M.; et al. **Pesquisa operacional**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.
- BOWESOX, D.J.; CLOSS, D.J **Logística empresarial: O processo de integração da cadeia de suprimentos**. Tradução Equipe do Centro de estudos em logística, Adalberto das Neves; coordenação de Paulo Fernando Fleury, Cesar Lavallo. -1 ed. – 10. Reimp. São Paulo, Atlas, 2011.
- BLASEWICZ, J; DOMSCHKE, W. & PESCH, E. **The job shop scheduling problem: conventional and new solutions techniques**. European journal of operation research, v.93, p. 1-33, 1996.
- CHIAVENATO, I. **Planejamento e Controle da Produção**. 2. ed. Barueri- SP: Manole, 2008
- CHIAVENATO, Idalberto. **Introdução à Teoria Geral da Administração**. 3. ed. Rop de Janeiro: Elsevier, 2004.
- GOLDMAN, F.; et al. **A pseudociência empírica e o uso inapropriado do termo estudo de caso em engenharia de produção no brasil**. Santos: ENEGEP, 2019.
- KRAJEWSKI, L.; RITZMAN, L.; MALHOTRA, M. **Administração de produção e operações**. 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.
- MIGUEL, P. A. C. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.
- PAIVA, R.P.O. **Um modelo baseado na seleção de processos e dimensionamento de lotes para planejamento agregado da produção em usinas de açúcar e álcool**. São Carlos, 2006. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia de Produção) – DEP/USFCar.
- PINEDO, Michael, 2002, **Scheduling: Theory, algorithms, and systems** – 2ª ed., New Jersey, Prentice Hall.
- RUSSOMANO, V. H. **Planejamento e controle da produção**. 6. ed. São Paulo: Pioneira, 2000.
- 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.

SLACK, Nigel; JOHNSTON, Robert; CHAMBERS, Stuart. **Administração da produção**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

TAHA, H. A. **Pesquisa Operacional**. 8. ed. São Paulo: Pearson, 2008. 359 p.

TOCHA, Carlos Alberto. **Desenvolvimento de ferramentas computacionais para o sequenciamento da produção**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção)-Universidade Federal do Paraná. 2014.

TUBINO, Dalvio Ferrari. **Planejamento e controle da produção: teoria e prática**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

TUBINO, Dalvio, F., 1997, **Manual de Planejamento e Controle da Produção**. 1ª ed. São Paulo, Editora Atlas.

TURRIONI, J. B.; MELLO, C. H. **Metodologia de pesquisa em Engenharia de Produção**. Itajubá: Unifei, 2012.