



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO SEMIÁRIDO
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

MAÍTALA ANDRÉIA ANDRADE ALVES DE SOUZA

**MINIMIZAÇÃO DO MAKESPAN EM UM SISTEMA FLEXIBLE FLOW
SHOP SCHEDULING UTILIZANDO MÉTODOS COMPUTACIONAIS EM
UMA ORGANIZAÇÃO BENEFICIADORA DE MINÉRIOS**

**SUMÉ - PB
2023**

MAÍTALA ANDRÉIA ANDRADE ALVES DE SOUZA

**MINIMIZAÇÃO DO MAKESPAN EM UM SISTEMA FLEXIBLE FLOW
SHOP SCHEDULING UTILIZANDO MÉTODOS COMPUTACIONAIS EM
UMA ORGANIZAÇÃO BENEFICIADORA DE MINÉRIOS**

Monografia apresentada ao Curso Superior de Engenharia de Produção do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharela em Engenharia de Produção.

Orientador: Professor Dr. Yuri Laio Teixeira Veras Silva.

**SUMÉ - PB
2023**



S729m Souza, Maítala Andréia Andrade Alves de.
Minimização do makespan em um sistema flexible flow shop scheduling utilizando métodos computacionais em uma organização beneficiadora de minérios. / Maítala Andréia Andrade Alves de Souza. - 2023.

50 f.

Orientador: Professor Dr. Yuri Laio Teixeira Veras Silva.

Monografia - Universidade Federal de Campina Grande; Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido; Curso de Engenharia de Produção.

1. Makespan. scheduling. flexible flow shop. 2. Sequenciamento de produção. 3. Granulados higiênicos - linha de produção. 4. Software Lekin®. 5. Heurística de busca gulosa. 6. Planejamento e controle da produção. I. Silva, Yuri Laio Teixeira Veras. II. Título.

CDU: 658.5(043.1)

Elaboração da Ficha Catalográfica:

Johnny Rodrigues Barbosa
Bibliotecário-Documentalista
CRB-15/626

MAÍTALA ANDRÉIA ANDRADE ALVES DE SOUZA

**MINIMIZAÇÃO DO MAKESPAN EM UM SISTEMA FLEXIBLE FLOW
SHOP SCHEDULING UTILIZANDO MÉTODOS COMPUTACIONAIS EM
UMA ORGANIZAÇÃO BENEFICIADORA DE MINÉRIOS**

Monografia apresentada ao Curso Superior de Engenharia de Produção do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharela em Engenharia de Produção.

BANCA EXAMINADORA:

**Professor Dr. Yuri Laio Teixeira Veras Silva.
Orientador - UAEP/CDSA/UFPG**

**Professora Maria Creuza Borges de Araújo.
Examinadora Interna - UAEP/CDSA/UFPG**

**Professor Me. Josean da Silva Lima Júnior.
Examinador Externo - UFPE**

Trabalho Aprovado em: 28 de novembro de 2023.

SUMÉ - PB

AGRADECIMENTOS

A Deus, pois diante dos desafios enfrentados ao longo do caminho, Ele estava me guiando, abençoando, dando forças para persistir e continuar em busca dos meus objetivos.

Aos meus pais, Ítalo e Márcia, que trabalham e se dedicam a cuidar de suas filhas, eles nunca mediram esforços para que eu pudesse me dedicar a sempre estudar. Vibraram felizes a cada conquista minha, como também sentiram minhas dores ao ligar triste e desesperada, mas sempre com a mesma calma de sempre estavam lá para me tranquilizar, assim como minha irmã, Mairla, esteve sempre a me apoiar. Obrigada pelo apoio e tanto amor.

Aos meus familiares, que em algum momento durante o curso eu precisei, não negaram e me disponibilizaram a me ajudar.

Ao meu professor e orientador, Yuri, por toda orientação, pela paciência que teve comigo, por acreditar em mim pela oportunidade de buscar mais conhecimentos da área de engenharia de produção.

Ao meu parceiro de vida, Guilherme, que esteve a me apoiar e sempre me incentivar. Quando eu estava triste, me fez sorrir e acreditar no quão eu sou capaz de fazer o que eu desejo. Além de madrugar noites comigo, mesmo cansado, só para me ajudar. Obrigada por ser essa pessoa presente, companheira, que em momentos difíceis esteve ao meu lado sem hesitar.

Aos meus amigos, da faculdade, Andressa, Júnior e Mariane, que tanto me ajudaram, juntos compartilhamos sofrimentos, angústias e felicidades, vocês são muito especiais e importantes na minha vida. Obrigada pelo apoio e amizade de vocês. Heloyza, minha recente amiga e não menos importante, dividimos nosso dia a dia de trabalho e nos tornamos mais amigas. Obrigada por todos os ensinamentos, parceria, preocupação e por me ajudar a me adaptar nesse novo lugar.

Aos meus companheiros de trabalho, por me acolher e me tratar tão bem e por toda ajuda que precisei ao realizar o meu TCC. Grata por tanta atenção.

RESUMO

A globalização conectada aos avanços das tecnologias computacionais, fez com que a redução de custos e minimização de desperdícios se tornasse uma necessidade para a sobrevivência no mercado. Nesse contexto, a determinação de um sequenciamento de produção eficaz para empresas que produzem um grande *mix* de produtos, se caracteriza como uma importante ferramenta de otimização, garantindo a essa empresa maior eficiência produtiva, evitando situações como a ociosidade de recursos produtivos. Considerando o *makespan* como tempo de conclusão da última tarefa, o presente trabalho tem como objetivo estruturar o sequenciamento de uma empresa beneficiadora de minérios afim de minimizá-lo. Para isso, foram conduzidas entrevistas semiestruturadas com o coordenador do PCP, analista de qualidade e o líder de produção da organização objeto de estudo, a fim de viabilizar a coleta dos dados referentes a linha de produção dos granulados higiênicos. Posteriormente foi realizada a estruturação desses dados, formando cinco instâncias/bases de dados, correspondentes a cinco semanas de produção distintas, as quais, foram utilizadas para obtenção das soluções via LEKIN® e via Heurística Gulosa, que foi formulada especificamente para o problema. Por fim, os resultados alcançados com os experimentos computacionais conduzidos foram comparados, no qual a aplicação da heurística foi 33,08% melhor que o *software*, a fim de demonstrar o nível de eficiência dos métodos aplicados na resolução do problema em questão.

Palavras-chave: makespan. scheduling. flexible flow shop. otimização. produção.

ABSTRACT

A globalization connected to advances in computer technologies has made cost reduction and waste minimization a necessity for survival in the market. In this context, determining an effective production sequencing for companies that produce a wide range of products is seen as an important optimization tool, ensuring greater production efficiency, and avoiding situations such as the idle use of production resources. Considering makespan as the time for the completion of the last task, this study aims to structure the sequencing of an ore beneficiation company to minimize it. To achieve this, semi-structured interviews were conducted with the Production Control Coordinator, Quality Analyst, and Production Leader of the organization under study, to facilitate the collection of data related to the production line of hygienic granules. Subsequently, the data were structured, forming five instances/databases corresponding to five distinct production weeks, which were used to obtain solutions via LEKIN® and via Greedy Heuristic, specifically formulated for the problem. Finally, the results obtained from the conducted computational experiments were compared, with the heuristic application being 33.08% better than the software, demonstrating the level of efficiency of the methods applied in solving the problem at hand.

Keywords: makespan. scheduling. flexible flow shop. optimization. production.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Níveis do horizonte de planejamento	14
Figura 2 – Exemplo do HFSP-IPM	19
Figura 3 - Heurística de construção gulosa de uma solução inicial	21
Figura 4 – Dados de entrada do LEKIN®.....	22
Figura 5 – Aplicações do LEKIN®.....	22
Figura 6 – Classificação da pesquisa.....	26
Figura 7 – Fluxo metodológico da pesquisa.....	27
Figura 8 – Fluxo do Processo.	30
Figura 9 - Sequenciamento obtido com a aplicação do LEKIN® em uma instância arbitrária	33
Figura 10 – Fluxo do Heurística Gulosa.....	34
Figura 11 – Representação gráfica da melhor solução obtida na Instância 1.....	36
Figura 12 – Representação gráfica da melhor solução obtida na Instância 2.....	37
Figura 13 – Representação gráfica da melhor solução obtida na Instância 3.....	37
Figura 14 – Representação gráfica da melhor solução obtida na Instância 4.....	37
Figura 15 – Representação gráfica da melhor solução obtida na Instância 5.....	37
Figura 16 – Benefícios da aplicação para empresa.	41

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resumo dos trabalhos relacionados	25
Quadro 2 – Especificação dos Produtos.....	31
Quadro 3 – Tempo de <i>setup</i> no Estágio 1	31
Quadro 4 – Tempo de <i>setup</i> no Estágio 2	32
Quadro 5 – Informações das instâncias.....	36

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

C_{\max} – *Makespan*

DD – *Data Devida*

FFc – *Flexible Flow Shop*

FFS – *Flexible Flow Shop*

FIFO – *First In First Out*

FM – *Flow shop*

GAP – *Menor Desvio Relativo Médio*

HFS – *Flow Shop Híbrido*

HFSP – *Flow Shop Híbrido*

HFSP-IPM – *Flow-Shop Híbrido com Máquinas Paralelas Idênticas*

ICS – *Cuckoo Search Aprimorado*

JM – *Job Shop*

LIFO – *Last In First Out*

LOT – *Longest Operation Time*

LPT – *Longest Processing Time*

OM – *Open Shop*

PCP – *Planejamento e Controle da Produção*

PM – *Máquinas Paralelas Idênticas*

PMP – *Plano Mestre da Produção*

QM – *Máquinas Paralelas Uniformes*

SOT – *Shortest Operartion Time*

SPT – *Shortest Processing Time*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	DEFINIÇÃO DO TEMA.....	10
1.2	JUSTIFICATIVA.....	11
1.3	OBJETIVOS.....	12
1.3.1	Objetivo Geral.....	12
1.3.2	Objetivos Específicos.....	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
2.1	PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO (PCP).....	13
2.2	SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO.....	14
2.3	SCHEDULING OPTIMIZATION PROBLEM.....	17
2.4	FLOW SHOP PARALLEL MACHINES SCHEDULING.....	18
2.5	MÉTODOS HEURÍSTICOS DE OTIMIZAÇÃO.....	20
2.6	SOFTWARE LEKIN®.....	21
2.7	TRABALHOS RELACIONADOS.....	23
3	METODOLOGIA.....	26
3.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA.....	26
3.2	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	29
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA.....	29
4.2	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	29
4.3	MÉTODOS DE RESOLUÇÃO.....	32
4.3.1	Aplicação do LEKIN® para Resolução do Problema.....	32
4.3.2	Abordagem de Resolução Baseada em Heurística de Busca Gulosa.....	33
4.4	RESULTADOS COMPUTACIONAIS.....	35
4.4.1	Instâncias de dados.....	35
4.4.2	Resultados experimentais.....	36
4.4.2.1	<i>Resultados obtidos usando o LEKIN®.....</i>	36
4.4.2.2	<i>Resultados obtidos usando a Heurística Gulosa.....</i>	38
4.4.2.3	<i>Análise e discussão dos resultados experimentais.....</i>	39
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	43
	REFERÊNCIAS.....	45

1 INTRODUÇÃO

Frente aos avanços tecnológicos mais recentes e à crescente necessidade por produtos personalizados, maior complexidade, qualidade aprimorada e custos mais baixos, a discussão global sobre o surgimento de novos modelos industriais está em pauta, centrada no conceito da Indústria 4.0 (Hermann *et al.*, 2016).

1.1 DEFINIÇÃO DO TEMA

A competição global destaca a necessidade crescente das empresas em dedicar esforços significativos para reduzir desperdícios, gerenciar estoques, cumprir prazos e satisfazer as expectativas dos clientes. Como resultado, o planejamento, a programação e o controle da produção desempenham um papel fundamental nas organizações. Uma maneira de alcançar certos objetivos desejados é por meio da utilização de regras de sequenciamento (Dos Santos *et al.*, 2017).

Um sequenciamento de produção sem organização e sem um bom planejamento pode resultar no acúmulo de produtos em estoque intermediário, ou seja, aguardando a próxima máquina para processamento. A programação inadequada da produção tem consequências prejudiciais para o fluxo do processo (Flizicoski, 2017). Por isso, atualmente estão sendo estudados métodos de otimização relacionados ao problema de sequenciamento da produção, também conhecido na literatura como *scheduling*. Essas novas abordagens permitem alcançar resultados desejáveis pelas organizações e tornam-nas mais competitivas no mercado.

O termo *scheduling* é traduzido de várias maneiras, muitas vezes dependendo do contexto de aplicação. Em Engenharia de Produção, é mais comum referir-se a isso como programação da produção, especialmente quando se trata de uma das atividades no âmbito do Planejamento e Controle da Produção (PCP). Nas áreas de Otimização e Pesquisa Operacional, é frequentemente chamado de problema de sequenciamento ou escalonamento de tarefas em máquinas. Isso destaca a importância e a interdisciplinaridade da área de *scheduling*, mas também cria a falta de uma única nomenclatura padrão para esses problemas. Por essa razão, muitas vezes usa-se a denominação em inglês, como uma forma mais abrangente de se referir a essa área multidisciplinar, e porque certos termos técnicos relacionados, como *flow shop*, *job shop*, *setup*, normalmente não são traduzidos (Fuchigami, 2014).

Dessa forma, pensando em *scheduling* no âmbito de otimização, sua aplicação se torna um diferencial nas empresas, uma vez que permite encontrar com eficiência a ordem que melhor executa as tarefas em uma linha de produção. Isso se faz considerando critérios como tempo,

custos, recursos limitados, os quais resultam na redução dos atrasos de pedidos e na minimização do tempo total de processamento dos pedidos, também conhecido como *makespan*.

Nesse contexto a minimização do tempo de processamento pode ser aplicada nos mais diversos tipos de configurações. Uma das configurações de máquinas mais significativas e amplamente aplicadas em cenários industriais reais é conhecido como escalonamento *flexible flow shop* (FFS). O FFS, também referido como *flow shop híbrido* (HFS), envolve uma sequência de estágios de produção, onde cada etapa conta com uma ou mais máquinas idênticas operando simultaneamente. Além disso, todas as tarefas seguem o mesmo padrão de processamento em diferentes estágios (Rahmani; Ramezani, 2016).

1.2 JUSTIFICATIVA

A globalização conectada aos avanços das tecnologias computacionais, fez com que a redução de custos e a minimização de desperdícios se tornasse uma necessidade para a sobrevivência no mercado. Muitas vezes, as indústrias mantêm um amplo portfólio de produtos e utilizam o mesmo conjunto de máquinas para processar matéria-prima e fabricar diferentes itens. Nesse contexto, é fundamental determinar a ordem mais eficaz para a produção de diversos tipos de artigos, a fim de otimizar o uso dos recursos disponíveis. Isso implica levar em consideração as perdas relacionadas a reconfiguração das máquinas (*setup*) e evitar que os recursos de produção fiquem ociosos, contribuindo para uma operação mais eficiente e econômica (Oliveira; Souza; Santos, 2019).

A empresa objeto de estudo processa uma diversidade de mercadorias e sua programação é realizada de maneira empírica pelo coordenador do PCP, no entanto, trata-se de uma produção em alta escala, que por vezes leva um tempo de processamento longo, o que acarreta pontos negativos para empresa, como atraso na entrega, baixa utilização dos recursos, aumento de custos, máquinas ociosas e estoques excessivos. Nesse sentido, observa-se a necessidade de utilizar um método computacional que considere a situação da empresa e otimize o sequenciamento.

Dessa forma, por meio da otimização do sequenciamento é possível obter vantagens, tais como a diminuição de períodos de inatividade, resultando em uma utilização mais eficaz do sistema, o aumento da previsibilidade no término das tarefas, o que contribui para uma maior confiabilidade do processo, além da redução dos custos de produção. (Galvão, 2007).

Nesse contexto, uma maneira de realizar o sequenciamento eficiente é por meio da aplicação de métodos heurísticos de otimização, uma vez que são empregados para auxiliar no processo de tomada de decisão. É importante ressaltar que esses métodos são desenvolvidos considerando as características do problema em específico e podem ser utilizados desde problemas mais simples até problemas mais complexos.

Atualmente existe no mercado *softwares*, que são formulados com base nos métodos heurísticos, dentre eles destaca-se o LEKIN®, onde por meio de sua aplicação pode-se encontrar soluções viáveis para diversos problemas de sequenciamento, podendo ainda ser configurado conforme a situação que a empresa se encontra.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Estruturar o sequenciamento da empresa beneficiadora de minérios com a finalidade de minimizar o *makespan*.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Identificar o tipo de configurações das máquinas;
- Coletar dados do processamento das máquinas;
- Desenvolver uma Heurística Gulosa para estruturar o sequenciamento;
- Utilizar o software LEKIN® para definir o sequenciamento;
- Desenvolver uma análise comparativa entre os resultados apresentados pelo software e a heurística.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção são abordados alguns conceitos e definições relacionadas ao planejamento e controle da produção, ao sequenciamento da produção e aos problemas específicos encontrados na literatura. Em seguida, uma breve revisão dos principais trabalhos relacionados a esse tópico será apresentada.

2.1 PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO (PCP)

O Planejamento e Controle da Produção (PCP) assume um papel fundamental dentro de uma organização, uma vez que é encarregado de supervisionar e administrar as operações de fabricação de forma a atender de maneira constante a demanda dos clientes, além de reduzir os custos associados aos processos, como matéria-prima, insumos e mão de obra. A ausência desse planejamento tem um impacto direto nas operações de produção e logística, resultando em retrabalho, atrasos nas entregas, falta de estoque de materiais essenciais e comprometimento da reputação junto aos clientes e fornecedores, além de sobrecarregar os operadores (Estender *et al.*, 2017).

Para Chiavenato (2014), o planejamento estabelece antecipadamente o que precisa ser realizado, quando, por quem e de que maneira, com base em planos que estão estreitamente interligados. Por outro lado, o controle é a atividade de gestão que envolve a verificação da conformidade com o que foi planejado e organizado, seguindo as instruções dadas, a fim de identificar erros ou desvios e corrigi-los, evitando que ocorram novamente.

O Planejamento e Controle da Produção (PCP) é a atividade administrativa que tem como objetivo principal formular planos que direcionarão o processo produtivo e que também servirão como referência para sua gestão, que é igualmente realizada pelo próprio PCP. Em outras palavras, o PCP tem a responsabilidade de maximizar a eficiência dos recursos de produção com o objetivo de alcançar os melhores resultados possíveis. (Veggian; Silva, 2015).

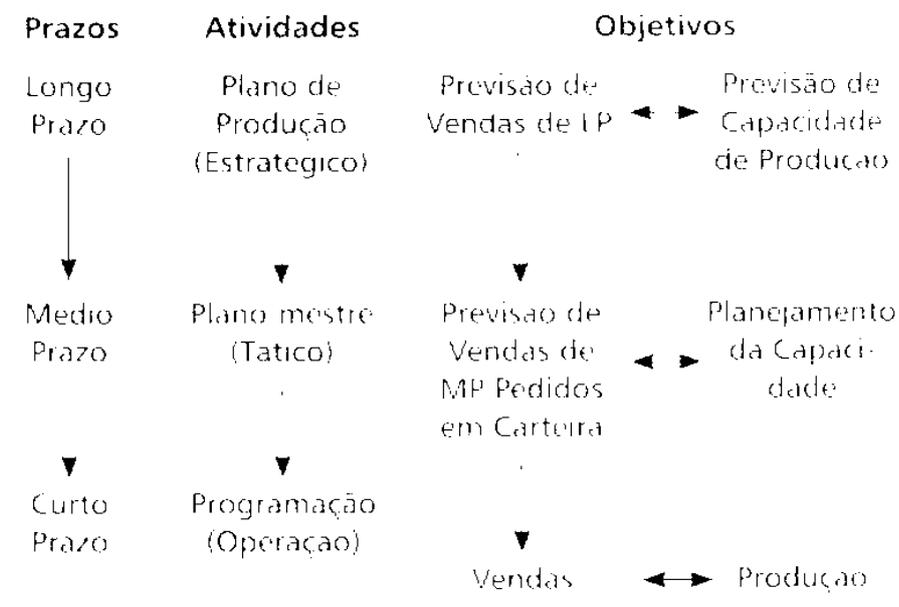
Conforme Slack *et al.* (2006), é amplamente reconhecido que, em qualquer operação, os recursos disponíveis não são ilimitados, pois a maioria dos processos enfrenta restrições que afetam as atividades de planejamento e controle. De maneira geral, essas limitações podem ser resumidas da seguinte forma:

- Limitações de custos – Os produtos e serviços precisam ser fabricados dentro de orçamentos específicos de despesas.

- Limitações de capacidade – Os produtos e serviços devem ser fabricados dentro das capacidades planejadas para a operação.
- Limitações de tempo – Os produtos e serviços devem ser fabricados dentro de um determinado período durante o qual ainda são relevantes e valiosos para o consumidor.
- Limitações de qualidade – Os produtos e serviços devem estar em conformidade com os limites de tolerância estabelecidos para eles durante o processo de design ou fabricação.

Tubino (2009) aborda que é possível segmentar o período de planejamento de um sistema de produção em três níveis: o de longo prazo, o de médio prazo e o de curto prazo. No nível estratégico, onde as estratégias de longo prazo são delineadas, o PCP desempenha um papel na concepção do Planejamento Estratégico da Produção, resultando na criação de um Plano de Produção. No nível tático, onde os planos de médio prazo são estabelecidos, o PCP elabora o Plano Mestre da Produção (PMP). Por fim, no nível operacional, que envolve a preparação de programas de produção de curto prazo e o acompanhamento de sua execução, o PCP desenvolve a Programação da Produção, onde o sequenciamento das atividades de produção é realizado. A Figura 1 ilustra todos os níveis.

Figura 1 – Níveis do horizonte de planejamento.



Fonte: Tubino, 2009.

2.2 SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO

O sequenciamento é uma prática comum em várias indústrias de manufatura e serviços. Envolve a alocação de tarefas a recursos durante intervalos de tempo específicos e busca

otimizar um ou mais resultados desejados por meio de decisões estratégicas. Nesse contexto, as tarefas podem representar operações em um processo produtivo, enquanto as máquinas desse processo são os recursos. Assim o sequenciamento objetiva a redução do tempo necessário para concluir a última tarefa e a diminuição da quantidade de tarefas concluídas após seus respectivos prazos individuais (Pinedo, 2016).

Para Corrêa e Corrêa (2007), em ambientes de produção onde várias tarefas precisam ser executadas, passando por diferentes estações de trabalho, a administração das operações deve tomar decisões sobre o sequenciamento das ordens de produção à medida que chegam a cada estação. Isso ocorre porque essas ordens frequentemente precisam esperar até que outras tarefas em andamento sejam concluídas antes de serem processadas. Para determinar a posição que cada ordem ocupará na fila, diversas variáveis são consideradas, tais como:

- Em termos de ordem:
 - Datas de entrega diferentes;
 - *Setup* com tempo diferente;
 - Ordem com roteiros alternativos;
 - Produtividade, de roteiros alternativos, diferente.
- Em termos de recursos
 - Máquinas quebradas ou em manutenção;
 - Sem disponibilidade de matérias-primas;
 - Falta de mão de obra.
- Em termos de operações:
 - Falhas relacionadas à qualidade;
 - Tempo de pós-produção;
 - Restrição para definição de lote.

Coelho (2023), cita que o sequenciamento procura estabelecer a prioridade e a sequência das atividades em um sistema operacional, levando em conta os objetivos de desempenho definidos para a operação. Para realizar isso, são empregadas várias regras que determinam como a ordem de produção deve ser organizada, visando aprimorar a utilização dos recursos disponíveis e amplificar a eficácia do processo produtivo, logo é uma ferramenta essencial na administração da produção, cujo propósito é assegurar a entrega de produtos de alta qualidade e pontualidade, atendendo às demandas dos clientes e otimizando os resultados da organização.

Slack, Jones e Brandon (2020), mencionam um conjunto de regras complexas e relevantes para a determinação da ordem de sequenciamento, estas são:

Restrições físicas: a natureza física dos *inputs* processados pode influenciar a ordem de prioridade das tarefas. Dessa forma, é possível programar trabalhos que compartilham características físicas semelhantes, a fim de minimizar o desperdício.

Prioridade do cliente: as operações adotam o sequenciamento com prioridade para os clientes, o que implica que um cliente importante seja tratado com prioridade em relação aos demais, independentemente de sua ordem de chegada.

Data devida (DD): Priorizar pela data devida significa que o trabalho é sequenciado de acordo com o momento em que “deve” ser entregue, independentemente do tamanho de cada trabalho ou da importância de cada cliente.

Último a entrar, primeiro a sair (*last in first out* – LIFO): A abordagem o último a entrar, primeiro a sair ou LIFO é frequentemente escolhida como método de sequenciamento devido a considerações práticas.

Primeiro a entrar, primeiro a sair (*first in first out* – FIFO): Algumas operações atendem os clientes na ordem em que eles chegam, seguindo o princípio de primeiro a entrar, primeiro a sair (*first in first out* – FIFO).

Tempo de operação mais longo (*longest operation time* – LOT): As operações têm a opção de priorizar os trabalhos mais longos, uma abordagem conhecida como sequenciamento baseado no tempo de operação mais longo. Essa estratégia tem a vantagem de manter os centros de trabalho ocupados por períodos prolongados. Por outro lado, tarefas menores que estão em andamento durante a operação ocuparão uma fração do tempo em cada centro de trabalho devido às mudanças frequentes entre elas.

Primeiro, o tempo de operação mais curto (*shortest operation time* – SOT – *first*): Em determinados momentos, a maioria das operações enfrenta restrições devido à disponibilidade de recursos financeiros. Nessas circunstâncias, as regras de sequenciamento podem ser adaptadas para favorecer as tarefas de menor duração. Esse método é conhecido como sequenciamento baseado no tempo de operação mais curto. Tarefas maiores, que demandam mais tempo, podem atrasar o processo de faturamento, resultando em um aprimoramento no desempenho de entrega quando a métrica de entrega é medida em termos do número de tarefas concluídas. No entanto, essa abordagem pode ter um impacto adverso na produtividade global e prejudicar o atendimento aos clientes de maior porte.

2.3 SCHEDULING OPTIMIZATION PROBLEM

As regras de sequenciamento comumente conhecidas e muitos usuais não são eficientes para se alcançar determinados objetivos, principalmente quando se trata de uma produção em larga escala. O *scheduling optimization problem* busca métodos de otimização que contribuam para eficiência operacional em várias indústrias, ajudando as organizações a tomar decisões mais informadas sobre como alocar seus recursos de maneira eficaz e eficiente.

Para classificar os problemas de *scheduling* Pinedo (2016) define os tipos configurações das máquinas no processo e os objetivos que se pode tratar com qualquer um desses tipos de configuração, sendo as possíveis configurações as seguintes:

Single machine (1): o cenário de uma única máquina é o mais simples entre todas as configurações de ambientes de máquinas e representa um cenário simplificado em relação aos demais ambientes de máquinas mais complexas.

Máquinas paralelas idênticas (Pm): a configuração de máquinas paralelas idênticas é um cenário comum na programação da produção, onde várias máquinas de produção operam simultaneamente e têm as mesmas capacidades e características.

Máquinas paralelas uniformes (Qm): a configuração de máquinas paralelas uniformes é uma situação frequentemente encontrada na programação da produção. Nesse cenário, várias máquinas de produção operam simultaneamente, porém, cada máquina possui uma capacidade distinta. Ao contrário das máquinas paralelas idênticas, as máquinas paralelas uniformes têm capacidades variáveis.

Flow shop (Fm): nesse cenário, várias máquinas ou estações de trabalho são organizadas sequencialmente, e cada tarefa ou trabalho precisa passar por todas as máquinas em uma ordem específica.

Flexible flow shop (FFc): *flexible flow shop* é uma extensão da configuração *flow shop* tradicional, na qual várias máquinas ou estações de trabalho estão organizadas sequencialmente, e cada trabalho deve passar por todas as máquinas em uma ordem específica. A principal diferença é que, no "Flow Shop Flexível", há mais de uma máquina disponível em cada etapa do processo.

Job shop (Jm): cada tarefa tem uma sequência de operações nas máquinas que é especificada antecipadamente, podendo ser diferente da sequência de outras tarefas. Além disso, pode não ser necessário que cada tarefa passe por todas as máquinas.

Open shop (Om): cada tarefa j deve ser executada em todas as máquinas m , mas não há restrições específicas em relação à sequência das máquinas nas quais a tarefa será realizada.

Existem diversos objetivos a serem otimizados, Pinedo (2016), aborda alguns deles, os quais estão descritos abaixo:

***Makespan* (C_{\max}):** corresponde ao momento em que a última tarefa deixa o sistema, então, um *makespan* mínimo geralmente indica uma eficiente utilização da(s) máquina(s).

***Total weighted completion time* ($\sum W_j C_j$):** considera o cálculo da soma dos tempos de conclusão ponderados das n tarefas, que pode fornecer uma estimativa dos custos globais associados à manutenção ou ao estoque gerados pelo cronograma.

***Total weighted tardiness* ($\sum W_j T_j$):** trata-se do atraso total ponderado que está atrelado também ao custo mais geral do que o tempo total ponderado de conclusão.

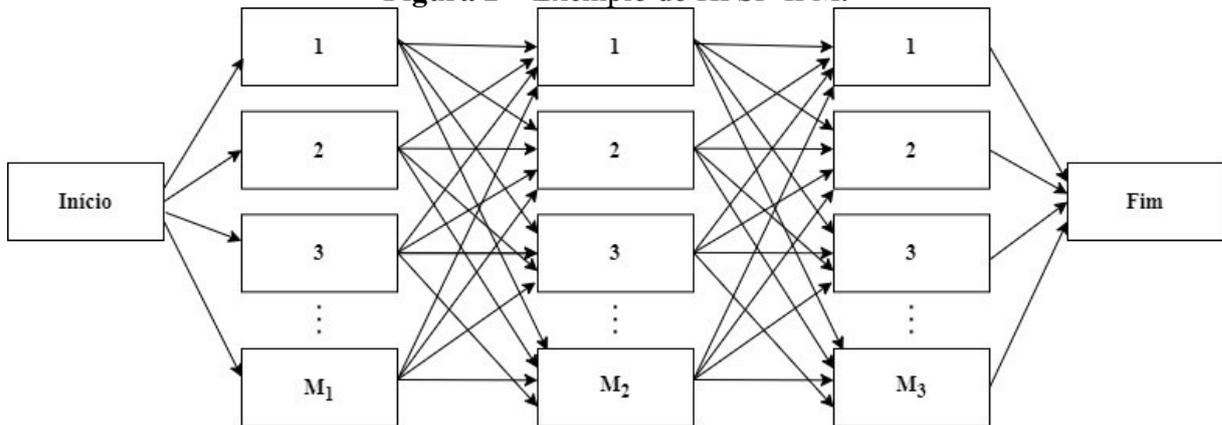
2.4 FLOW SHOP PARALLEL MACHINES SCHEDULING

Em um cenário de *Flow Shop*, o desafio de programação de operações envolve a tarefa de escolher uma ordem para a execução de tarefas a partir de inúmeras sequências possíveis. Essa ordem é aplicada uniformemente em todas as máquinas e tem como objetivo aprimorar uma medida específica de eficiência na programação, geralmente relacionada ao aspecto temporal. (Buzzo; Moccellini, 2000).

Wang *et al.* (2013), retrata o problema do escalonamento em um ambiente de *flow-shop* híbrido (HFSP), que representa uma extensão do problema clássico de escalonamento *flow-shop* (FSP) adaptado para sistemas de fabricação flexíveis, nos quais ocorrem estágios de processamento com máquinas em paralelo. O problema clássico do HFSP abrange três categorias distintas: o *flow-shop* híbrido com máquinas paralelas idênticas, o *flow-shop* híbrido com máquinas uniformes e o *flow-shop* híbrido com máquinas paralelas não relacionadas.

Para o autor, o problema de *flow-shop* híbrido com máquinas paralelas idênticas (HFSP-IPM) pode ser declarado da seguinte forma. Existe um conjunto de n tarefas que necessitam ser executadas em S estágios consecutivos, onde o estágio j ($j = 1, 2, \dots, S$) contém M_j ($M_j \geq 1$) máquinas paralelas idênticas. Cada tarefa precisa passar por todos os estágios em uma ordem sequencial, e em cada estágio, é possível que a tarefa seja processada por qualquer uma das máquinas disponíveis. Pode-se observar esse tipo de configuração na Figura 2.

Figura 2 – Exemplo do HFSP-IPM.



Fonte: Autoria própria (2023).

No HFSP-IPM, tem-se tipicamente que:

- Todas as tarefas são independentes e estão disponíveis para processamento desde o início;
- Não há limites para os *buffers* entre os estágios;
- Uma única máquina é capaz de executar apenas uma operação, e uma tarefa pode ser processada em uma única máquina de cada vez;
- Não se considera o tempo de liberação das máquinas, ou seja, ele é presumido como 0;
- Todos os tempos de processamento para todas as tarefas em cada etapa são determinísticos e conhecidos com antecedência;
- O tempo de transporte entre máquinas diferentes é negligenciável, uma vez que uma operação é iniciada, não pode ser interrompida.

Dessa maneira, o HFSP-IPM é um problema que busca determinar tanto a alocação de máquinas em cada estágio quanto a sequência de tarefas em todas as máquinas, com o objetivo de otimizar uma função específica, como a redução do tempo total de conclusão da última tarefa, ou seja, a minimização do *makespan* (C_{\max}) (Wang *et al.*, 2013).

Assim, considerando t_{ij} como o tempo de processamento da tarefa i no estágio j , e s_{ij} como hora de início da tarefa i no estágio j e e_{ij} como o tempo de conclusão da tarefa i no estágio j . Assim o HFSP-IPM minimização do *makespan* pode ser descrito matematicamente da seguinte forma:

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

$$\text{Sujeito a: } \sum_{l=1}^n x_{i,l} = 1, \quad l = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{l=1}^n x_{i,l} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^{m_j} y_{i,j,k} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, S \quad (4)$$

$$e_{i,j} = s_{i,j} + t_{i,j}, \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, S \quad (5)$$

$$e_{i,j} = s_{i,j} + t_{i,j}, \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, S - 1 \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i,l} s_{i,j} \leq \sum_{i=1}^n x_{i,l} + 1s_{i,j}, \quad i = 1, 2, \dots, n; l = 1, 2, \dots, n - 1; j = 1, 2, \dots, S \quad (7)$$

2.5 MÉTODOS HEURÍSTICOS DE OTIMIZAÇÃO

De acordo com Souza (2008), a heurística é descrita como um método que se baseia em processos intuitivos para buscar uma solução satisfatória com um custo computacional aceitável, embora não seja capaz de assegurar sua total otimalidade, assim como avaliar a quão próxima está da solução ótima. Os métodos heurísticos se destacam por suas estruturas que são menos rígidas em comparação com os métodos clássicos de otimização, sem, no entanto, cair em uma flexibilidade desordenada.

De acordo com Arroyo (2002), as heurísticas construtivas são procedimentos que utilizam regras específicas para criar uma solução em problemas de otimização. Normalmente, os métodos construtivos são caracterizados por sua rapidez, e os resultados que produzem podem servir como ponto de partida para algoritmos de aprimoramento e/ou meta-heurísticas.

Seguindo a explicação de Souza (2008), nas heurísticas clássicas, os candidatos a elementos são tipicamente classificados com base em uma função gulosa que avalia o benefício da inserção de cada elemento, sendo apenas o “melhor” elemento inserido em cada etapa." O autor aborda em seu estudo a representação de um pseudocódigo, que indica a solução inicial em um problema de otimização com base numa Heurística Gulosa $g(\cdot)$, como apontado na Figura 3.

Figura 3 - Heurística de construção gulosa de uma solução inicial

```

procedimento ConstrucaoGulosa( $g(\cdot), s$ );
1   $s \leftarrow \emptyset$ ;
2  Inicialize o conjunto  $C$  de elementos candidatos;
3  enquanto ( $C \neq \emptyset$ ) faça
4       $g(t_{melhor}) = \text{melhor}\{g(t) \mid t \in C\}$ ;
5       $s \leftarrow s \cup \{t_{melhor}\}$ ;
6      Atualize o conjunto  $C$  de elementos candidatos;
7  fim-enquanto;
8  Retorne  $s$ ;
fim ConstrucaoGulosa;

```

Fonte: Souza (2008).

Na função, t_{menor} representa o elemento do conjunto mais favorável da função de avaliação, ou seja, quando se deseja a minimização do problema, este indica o menor valor, por outro lado, situações em que se busca maximização, é a variável que representa o maior valor.

2.6 SOFTWARE LEKIN®

Conforme Silva, Boschetto e Zattar (2015), O LEKIN® se trata de um *software* onde é possível sequenciar tarefas em seis ambientes de produção, sendo eles *single machine*, *parallel machines*, *flow shop*, *flexible flow shop*, *job shop* e *flexible job shop*, os quais se encontram na tela inicial. Para que o *software* encontre o sequenciamento deve ser definido e escolhido o ambiente, em seguida alimentar com dados a respeito do estágio, da máquina e das tarefas, conforme a ilustra a Figura 4.

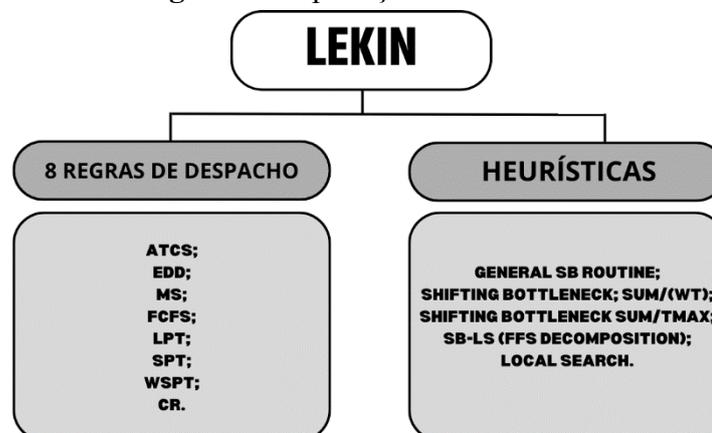
Figura 4 – Dados de entrada do LEKIN®.



Fonte: Autoria própria (2023).

Ainda para o autor, o LEKIN® disponibiliza 13 opções para definir o sequenciamento, incluindo 8 regras de despacho e 5 heurísticas disponíveis exclusivamente para determinados ambientes de produção. Após a inserção dos dados, é possível escolher mais de uma opção para que o *software* determine o sequenciamento. A Figura 5 ilustra suas aplicações.

Figura 5 – Aplicações do LEKIN®.



Fonte: Autoria própria (2023).

Depois, pode-se aplicar mais de uma das opções de acordo com os objetivos desejáveis. É possível escolher reduzir atrasos de entrega, minimizar o *makespan* e atribuir peso de acordo com a importância do pedido. Com o sequenciamento obtido, é possível analisar o desempenho, visualizar o gráfico de Gantt, identificar os pedidos que iriam atrasar, além das demais funções.

2.7 TRABALHOS RELACIONADOS

Em sua pesquisa, Wang et al. (2022), investiga um estudo de caso no departamento de etiquetagem de identificação por radiofrequência da empresa Avery Dennison. O objetivo central do estudo era desenvolver um modelo matemático para abordar o desafio de programação no contexto do sistema de manufatura FFS (*Flexible Flow Shop*). Os pesquisadores conceberam uma heurística considerando as restrições de recursos e o tempo limitado, com o propósito de reduzir atrasos em pedidos e minimizar o *makespan*, que é o tempo total de processamento.

Ao aplicar com sucesso o algoritmo heurístico em uma pequena amostra, os resultados foram promissores. Os pesquisadores obtiveram um resultado onde dois pedidos tiveram atraso de apenas um dia e otimizaram o tempo de processamento desses pedidos. Para eles os resultados foram de muita relevância e o algoritmo pode ser utilizado em modelos de FFS.

Os autores Guimarães, Souza e Yalaoui (2015) conduziram um estudo de caso em uma indústria de material electro-eletrônico. Neste estudo, eles aplicaram técnicas práticas utilizando modelagem de programação inteira e variantes da heurística NEH para resolver um problema de sequenciamento de produção no formato *flowshop* com uma linha semi-paralela. Os resultados obtidos indicaram que uma das variantes do algoritmo NEH foi eleita como o método mais eficaz por apresentar o menor desvio relativo médio (GAP) em relação às demais.

Já os autores Oliveira, Souza e Santos (2019) desenvolveram um algoritmo genérico com o objetivo de minimizar o *makespan* em um problema de sequenciamento do tipo *flow shop* permutacional. Eles aplicaram e compararam seus resultados com o algoritmo NEH, muito conhecido para a resolução desse tipo de problema. Os resultados apresentados mostram que o algoritmo desenvolvido pelos autores proporcionou uma solução mais satisfatória na minimização do tempo total de processamento.

No estudo de Correia e Nascimento (2016), eles realizaram aplicação de técnicas de sequenciamento de produção no setor de confecções de uma empresa, o qual possui um ambiente do tipo *flexible flow shop*, com o objetivo de reduzir o *makespan*. Para isso, além de empregarem métodos clássicos de programação, aplicaram também um método heurístico, para posteriormente compará-los com o método empírico adotado pela empresa. Os resultados mostraram que o método empírico se sobressaiu melhor do que os métodos como SPT e LPT, no entanto a heurística se destaca melhor que as demais, uma vez que foi a que apresentou o menor *makespan* ao ser aplicada.

Marichelvam, Prabakaran e Yang (2014) apresentam o algoritmo meta-heurístico Cuckoo Search aprimorado (ICS) com o objetivo de otimizar o sequenciamento em um ambiente de flow shop híbrido, buscando a minimização do *makespan*. Inicialmente, aplicaram esse algoritmo em uma empresa fabricante de móveis, a qual, até então, seguia um sequenciamento baseado no princípio do primeiro que entra, primeiro que sai. Os resultados revelaram que o sequenciamento proposto pelo algoritmo ICS superou a sequência anteriormente adotada e posteriormente fizeram uso de outros algoritmos que também não superaram o resultado do ICS.

No estudo realizado por Zobolas, Tarantilis e Ioannou (2008), o principal objetivo consiste em encontrar uma permutação de tarefas que minimize o *makespan*. Para atingir esse objetivo, eles propuseram a utilização de uma abordagem híbrida baseada em metaheurísticas. Os resultados da pesquisa, obtidos por meio de um teste com um conjunto de 120 instâncias de benchmark, demonstraram a eficácia e a eficiência do método, que fornece resultados computacionais em um curto espaço de tempo de processamento. Além disso, a abordagem requer um número reduzido de parâmetros definidos pelo usuário, o que a torna aplicável a problemas reais de agendamento em ambientes de *flow shop*. O Quadro 1 descreve os trabalhos relacionados que foram abordados anteriormente.

Quadro 1 – Resumo dos trabalhos relacionados

Autores	Trabalho	Objetivo
Wang et al. (2022)	<i>Scheduling flexible flow shop in labeling companies to minimize the makespan</i>	Desenvolver um método eficiente para sequenciar e agendar tarefas, garantindo que sejam concluídas até a data de vencimento do cliente, com o intuito de minimizar atrasos nos pedidos.
Guimarães, Souza e Yalaoui (2015)	O problema de sequenciamento da produção em um ambiente <i>flowshop</i> com linhas semi-paralelas e operação de sincronização final	Obter a programação das tarefas de forma a otimizar o <i>makespan</i>
Oliveira, Souza e Santos (2019)	Minimização do tempo total de produção em sistemas produtivos <i>flow shop</i> permutacional utilizando otimização bio-inspirada	Estudar e desenvolver sistemas computacionais baseados em heurísticas evolutivas, para a programação de tarefas em ambiente <i>flow shop</i> permutacional
Correia e Nascimento (2016)	A aplicação de técnicas de sequenciamento da produção para a minimização do <i>makespan</i> ; estudo de caso de uma empresa do setor de confecções com o ambiente <i>flexible flow shop</i>	minimizar o <i>makespan</i> utilizando métodos clássicos de programação e um método heurístico
Marichelvam, Prabaharan e Yang (2014)	<i>Improved cuckoo search algorithm for hybrid flow shop scheduling problems to minimize makespan</i>	minimizar o <i>makepan</i> em um sistema HSF
No estudo realizado por Zobolas, Tarantilis e Ioannou (2008)	<i>Minimizing makespan in permutation flow shop scheduling problems using a hybrid metaheuristic algorithm</i>	Propor uma metaheurística híbrida para a minimização do <i>makespan</i> em problemas de escalonamento de <i>flow shop</i> de permutação.

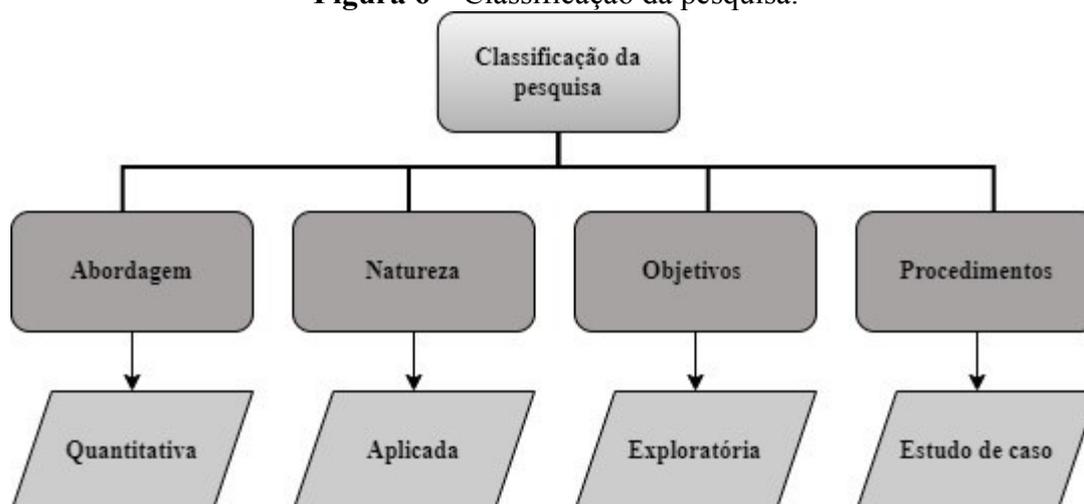
Fonte: Autoria própria (2023).

3 METODOLOGIA

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Para Gerhardt e Silveira (2009), os tipos de pesquisa podem ser classificados com base na abordagem (qualitativa ou quantitativa), na natureza (básica ou aplicada), nos objetivos (exploratória, descritiva, explicativa) e nos procedimentos (pesquisa experimental, pesquisa bibliográfica, estudo de caso, entre outros). No âmbito dessas categorias, elaborou-se a Figura 6 para ilustrar e classificar o tipo de pesquisa abordado no presente trabalho.

Figura 6 – Classificação da pesquisa.



Fonte: Autoria própria (2023).

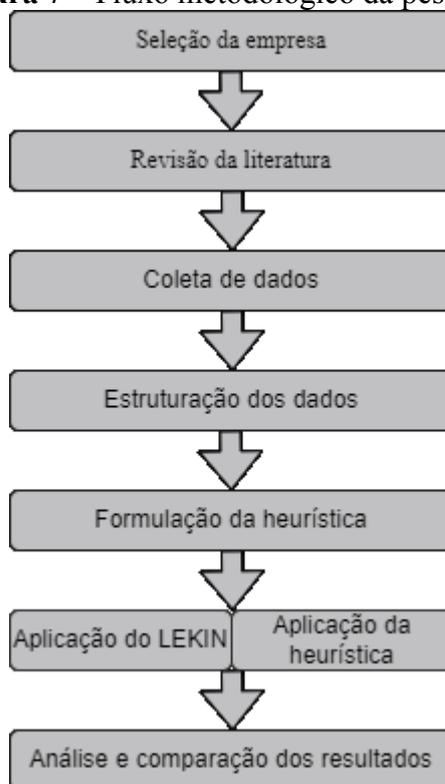
O presente estudo é classificado quanto a abordagem como quantitativa, quanto a sua natureza como aplicada. Nascimento e Sousa (2016) explicam que uma abordagem quantitativa se caracteriza pelo uso de medidas padronizadas e sistemáticas, coletando respostas previamente definidas, tornando mais fácil a comparação e a análise de dados por meio de medidas estatísticas. Enquanto a pesquisa aplicada se concentra na produção de conhecimento com o propósito de resolver problemas específicos, visando a obtenção da verdade para uma aplicação prática em contextos particulares.

Em relação aos objetivos, a pesquisa é categorizada como exploratória, enquanto, no que diz respeito aos procedimentos, é classificada como um estudo de caso. Gil (2008) descreve as pesquisas exploratórias como aquelas desenvolvidas com o propósito de oferecer uma visão geral, aproximada, de um determinado evento. Por outro lado, o estudo de caso se destaca por envolver uma investigação aprofundada de um ou de poucos objetos, possibilitando um conhecimento abrangente e detalhado.

3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos metodológicos do trabalho seguiram os passos descritos na Figura 7.

Figura 7 – Fluxo metodológico da pesquisa.



Fonte: Autoria própria (2023).

A seleção da empresa foi realizada devido a sua facilidade de acesso e coleta de dados, bem como a natureza complexa da problemática de planejamento da produção identificada. Trata-se de uma empresa de beneficiamento de minérios localizada na Paraíba.

O segundo passo compreendeu a realização de um levantamento bibliográfico sobre o tema, abordando tópicos relevantes para a compreensão do trabalho, como Planejamento e Controle da Produção, Sequenciamento da Produção, *Scheduling Optimization Problem* e *Flow shop parallel machines scheduling*.

Posteriormente, no terceiro passo, ocorreu a coleta de dados. Para isso, foram conduzidas entrevistas semiestruturadas com o coordenador do PCP, a analista de qualidade e o líder de produção da organização objeto de estudo. Por meio dessas entrevistas, foi possível compreender e acessar as diversas informações relevantes sobre a demanda, viabilizando a coleta de todos os dados referentes aos pedidos de produção, incluindo seus tempos de processamento em todas as máquinas, as informações da estrutura de cada produto, bem como

os tempos necessários para a configuração e preparação das máquinas para a produção dos produtos em questão.

Em seguida, com todas as informações necessárias, os dados coletados foram estruturados, organizados e tratados utilizando planilhas eletrônicas para uma melhor compreensão do problema, em especial das necessidades de preparação (*setup*) das máquinas em cada estágio a produção. Com a estruturação dos dados, foram construídas cinco instâncias/bases de dados, correspondentes a cinco semanas de produção distintas.

Na etapa seguinte da pesquisa, foi realizada a construção de uma heurística baseada em busca gulosa, a fim de que fosse possível encontrar a solução que indicasse o menor *makespan*. Posteriormente, com o mesmo objetivo, foi utilizado do *software* LEKIN®. Para ambas as aplicações de resolução do problema da empresa, utilizou-se os mesmos dados, que consideram as cinco instâncias estruturadas.

Por fim, os resultados alcançados com os experimentos computacionais conduzidos foram comparados, a fim de demonstrar o nível de eficiência dos métodos aplicados na resolução do problema em questão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA

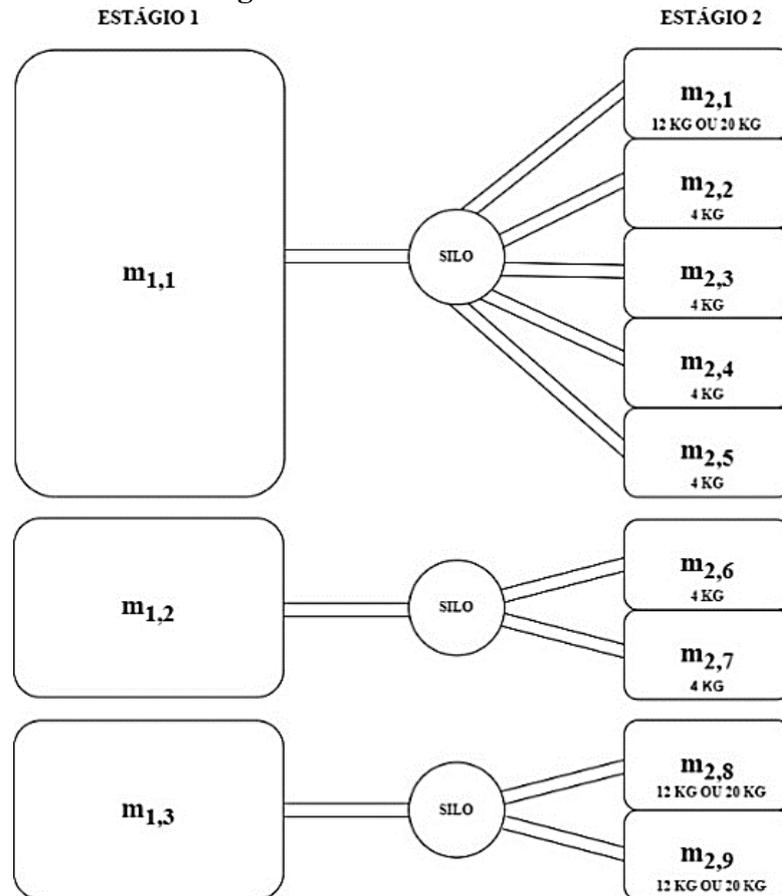
A empresa opera em diversos setores de mercado, com foco principal na fundição, construção e em produtos de higiene para animais de estimação. Para isso, a empresa possui duas linhas de produção. Uma delas é a linha de granulação, dedicada exclusivamente à fabricação de granulados higiênicos para gatos, que é o produto mais demandado pela empresa. Por outro lado, a linha de moagem é responsável pela produção dos demais produtos da empresa.

Para realizar o estudo de sequenciamento da produção neste trabalho, optou-se por focar na demanda e na linha de produção dos granulados higiênicos. Isso se deve ao fato de que esta linha abrange uma maior variedade de produtos, tornando mais desafiador encontrar um sequenciamento que otimize da melhor forma os recursos produtivos e, por consequência, um planejamento de maior dificuldade para a organização.

4.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Na empresa objeto de estudo, o processo de obtenção da areia higiênica para gatos passa por dois estágios de produção. O Estágio 1 possui três máquinas, na qual uma delas possui uma capacidade de processamento maior que as demais. Elas realizam o peneiramento da bentonita para separar os grãos desejados do pó (rejeito do processo). O Estágio 2, por sua vez, dispõe de nove máquinas, das quais três realizam o ensacamento dos produtos em sacos de 12 kg ou 20 kg, enquanto as demais realizam apenas o ensacamento de produtos em sacos de 4 kg, como é possível observar no fluxo do processo exposto na Figura 8.

Figura 8 – Fluxo do Processo.



Fonte: Autoria própria (2023).

Os pedidos de produção da empresa são organizados pelo setor de demanda que se relaciona diretamente com o comercial, eles repassam os pedidos semanalmente para empresa, que são planejados e sequenciados pelo setor de PCP. Dentre esses pedidos, estão distribuídos produtos com a marca da própria empresa e produtos com a marca dos clientes. Os produtos que fazem parte do portfólio da organização, bem como suas especificações, que estão descritos no Quadro 2.

Quadro 2 – Especificação dos Produtos.

Produto	Argila	Tamanho Do Grão	Aditivo Antiodor	Essência
P.U.D.	B	X	-	-
P.M	A		SIM	-
C.A.			SIM	-
P.F.			SIM	SIM (H)
P.C.			SIM	SIM (I)
C.P.F.			-	SIM (J)
M.G.F.			-	-
M.G.P.			-	SIM (J)
C.P.O.			-	-
PI.P.			-	SIM (J)
P.CL.			Y	SIM
M.G.M.		Z	-	-
P.CN.	-		-	
M.CN.	-		-	
M.P.CN	-		SIM (H)	
PI.Cl.	-		-	
B.CN	-		-	
M.M.	-		-	
F.CN	-		-	
BO.CN	-	-	-	

Fonte: Autoria própria (2023).

A maneira de processar cada produto é diferente, variando de acordo com as especificações. Assim, resulta na necessidade de realizar um procedimento de *setup* ao processar produtos de tipos diferentes consecutivamente em uma mesma máquina. As configurações necessárias podem incluir o tipo de argila, o tamanho dos grãos (onde deve-se trocar as telas de peneiramento), e a adição de aditivos antiodor e essência. Todas essas configurações são determinadas antes do início do processamento no segundo estágio. Ao chegar no segundo estágio, é preciso configurar as máquinas para troca de embalagem do produto que será processado ou, no caso das máquinas que lidam com sacos de 12 kg ou 20 kg, há também a necessidade de trocar o bico limitador. O Quadro 3 demonstra os tempos de *setup* no Estágio 1, enquanto o Quadro 4 apresenta os tempos de *setup* referentes ao Estágio 2.

Quadro 3 – Tempo de *setup* no Estágio 1

<i>Setup</i>	Tempo na Máquina 1 (h)	Tempo na Máquina 2 e 3 (h)
Troca de Argila	5	2
Troca de Tela	3	1,5
Aditivo Antiodor	3	1,5

Fonte: Autoria própria (2023).

Quadro 4 – Tempo de *setup* no Estágio 2

<i>Setup</i>	Tempo na Máquinas 4 kg (h)	Tempo na Máquina 12 ou 20 kg (h)
Troca de Embalagem	5	2
Troca do Bico	-	0,8

Fonte: Autoria própria (2023).

É importante destacar que, quando ocorrem mudanças em mais de uma especificação, elas podem ser realizadas simultaneamente. Desse modo, o tempo considerado para a configuração e preparação da máquina é sempre o da especificação que demandar o maior tempo para sua execução.

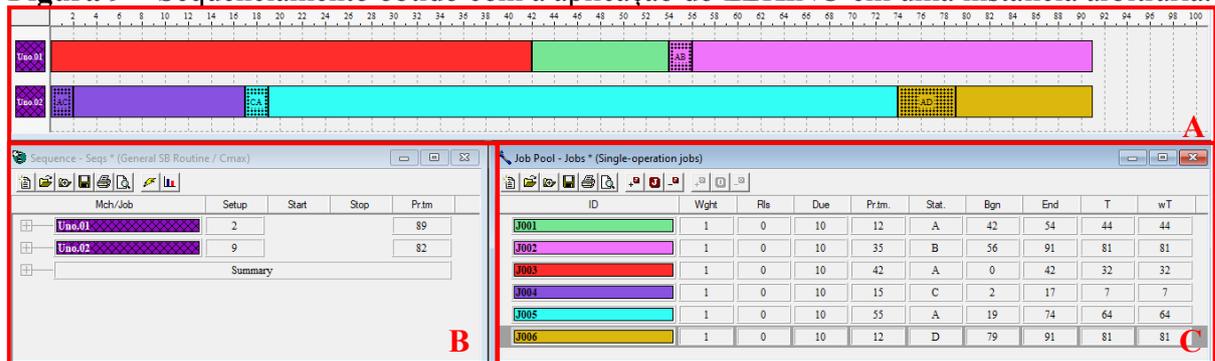
4.3 MÉTODOS DE RESOLUÇÃO

4.3.1 Aplicação do LEKIN® para Resolução do Problema

Ao analisar o problema em questão para que fosse possível realizar a aplicação via LEKIN®, percebeu-se que não se podia analisá-lo fielmente, com todas as especificações que possui, tendo em vista o fato desse *software* possuir algumas limitações ao tratar problemas que envolvem máquinas heterogêneas, ou seja, não é possível analisar máquinas que processam em velocidades diferentes.

Por essa razão, para se resolver o problema em questão, ele foi dividido em dois subproblemas, onde um deles é tratado como máquinas paralelas que processam os pedidos de 4Kg, enquanto o outro é ajustado com *single machine* que trabalha com os pedidos de 12 Kg. Dessa forma a aplicação foi feita separadamente no LEKIN®, para obtenção do resultado do *makespan*. A Figura 9 é dividida em A, B e C para melhor compreensão, exemplificando o sequenciamento obtido ao utilizar o *software*.

Figura 9 – Sequenciamento obtido com a aplicação do LEKIN® em uma instância arbitrária.



Fonte: Autoria própria (2023).

Na parte A, o gráfico de Gantt revela o momento de conclusão da última tarefa. Notavelmente, ambas as máquinas finalizam suas tarefas simultaneamente. Caso uma das máquinas levasse mais tempo, o *makespan* geral do problema seria determinado pelo término da máquina mais lenta, considerando o tempo de conclusão da última tarefa.

Na parte B, apresentam-se as máquinas do problema. Na seção *Setup*, é possível visualizar o tempo dedicado a configuração da máquina na hora de trocar o produto, enquanto em *Pr.tm* são exibidos os períodos em que as máquinas estão ativamente processando os pedidos. Enquanto a parte C detalha todos os pedidos, incluindo o tempo de processamento de cada um e seu status (A, B, C e D), importante para determinar quando será realizado o *setup* e na coluna "*End*", o tempo de conclusão de cada pedido.

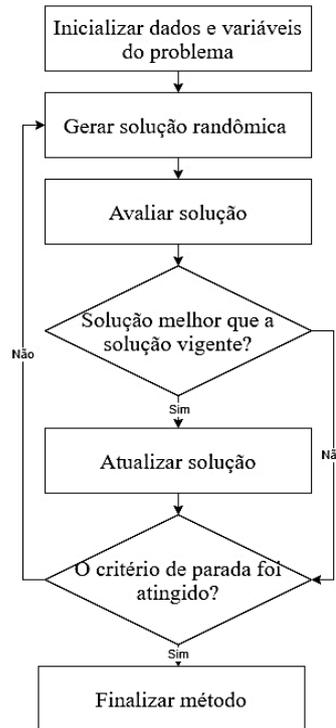
4.3.2 Abordagem de Resolução Baseada em Heurística de Busca Gulosa

Considerando que o problema em estudo foi adaptado e configurado para ser processado no LEKIN®, foi desenvolvida e implementada uma heurística de resolução adicionalmente ao uso do *software*. Esta heurística foi formulada levando em consideração o problema em sua totalidade, contemplando todas as especificações apresentadas, desde as diferentes velocidades de processamento das máquinas até a consideração de mais de um tipo de *setup*. Essa abordagem aprimora a veracidade no processamento dos dados, permitindo uma busca mais coerente pelo *makespan*.

A heurística baseia-se em uma abordagem de busca gulosa, realizando um número *n* de iterações. Em cada iteração, o método procura uma solução de forma randômica, onde sempre que obtém uma solução com *makespan* menor do que o menor *makespan* vigente até então, tal valor é atualizado e a nova melhor solução é armazenada. Ao final das *n* iterações, o método retorna à solução encontrada que possui o menor *makespan*, juntamente com o respectivo valor

mínimo do *makespan*. Esse mecanismo de como se comporta a heurística pode ser observado na Figura 10.

Figura 10 – Fluxo da Heurística Gulosa.



Fonte: Autoria própria (2023).

Além do fluxo que mostra o comportamento, para melhor compreensão foi descrito no Algoritmo 1 o pseudocódigo da heurística desenvolvida.

Algoritmo 1 – Heurística Gulosa

```

1: Procedimento ConstruçãoGulosa
2: entrada:  $Q_j, Q_m, P_j, S_m, S_t$ 
3: saída:  $s$ 
4: para  $iter = 1, \dots, MaxIter$  faça
5:    $s \leftarrow \text{GeraSoluçãoRandômica}()$ 
6:    $Makespan \leftarrow 0$ 
7:   Calcule o tempo de conclusão ( $T_c$ ) por máquina
8:   se  $T_c > makespan$  então
9:      $Makespan \leftarrow T_c$ 
10:  fim se
11:  Retorne  $f(s)$ 
12:  enquanto  $iter \leq MaxIter$  faça
13:     $s' \leftarrow \text{RVND}()$ 
14:    Avalie a função objetivo  $f(s')$ 
15:    se  $f(s') < f(s)$  então
16:       $s \leftarrow s'$ 
17:  fim enquanto
18: fim para
19: Retorne  $s_{melhor}$ 
20: fim ConstruçãoGulosa
  
```

Observa-se que no código os dados de entrada, para que se obtenha o *makespan* advindo da heurística, são a quantidade de *jobs* (Q_j), a quantidade de máquinas (Q_m), o tempo de processamento de cada produto nas máquinas (P_j), o tempo de *setup* de material (s_m), e o tempo de *setup* de tela (s_t). Na sequência, é gerado uma lista aleatória com os pedidos a serem sequenciados, logo após alocam-se os pedidos dessa lista em uma máquina aleatória, de forma que, se o tempo de processamento atender o critério, o pedido é alocado, caso contrário, realiza-se uma nova geração aleatória de máquina, isso se repete n vezes até que a melhor solução encontrada é apresentada.

Após encontrar a melhor solução, realiza-se uma avaliação, considerando que o *makespan* é o tempo de término da última tarefa. Logo, o algoritmo analisa o tempo de conclusão do processamento em cada máquina, identificando qual delas possui o maior tempo, visto que esta máquina terá processado o último pedido, e, portanto, o seu tempo é considerado o *makespan* geral do problema.

4.4 RESULTADOS COMPUTACIONAIS

4.4.1 Instâncias de dados

Os dados utilizados no presente estudo foram extraídos de planilhas que registravam os pedidos de produção semanais, incluindo as quantidades correspondentes a serem fabricadas. Para que os métodos computacionais pudessem ser aplicados esses dados precisaram ser tratados. Esse processo envolveu a obtenção de informações específicas sobre a velocidade de processamento de cada pedido nas máquinas utilizadas. A obtenção dessas informações foi essencial para calcular o tempo de processamento de cada pedido, além disso foi coletado a informação de tempo de *setup*, importante para a determinação do *makespan*.

As instâncias de dados são do ano de 2023, dos meses de agosto, setembro, outubro e novembro. O Quadro 5 exibe mais informações acerca de cada instância.

Quadro 5 – Informações das instâncias.

Instância	Mês	Quant. pedidos de 4Kg	Quant. pedidos de 12Kg	Quant. pedidos total
1	Setembro	6	4	10
2	Agosto	8	1	9
3	Outubro	7	4	11
4	Novembro	7	5	12
5	Novembro	5	6	11

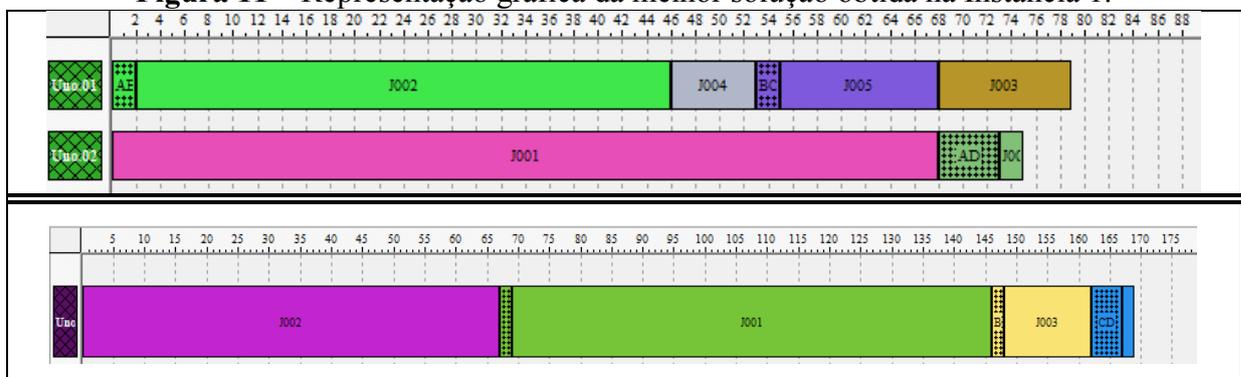
Fonte: Autoria própria (2023).

Conforme é visualizado no Quadro 4, ao longo dos meses, nota-se um aumento significativo na demanda dos pedidos de 12 quilos. Esse aumento tem um impacto considerável, especialmente porque as máquinas responsáveis pelo processamento desse tipo específico de produto estão em menor quantidade.

4.4.2 Resultados experimentais

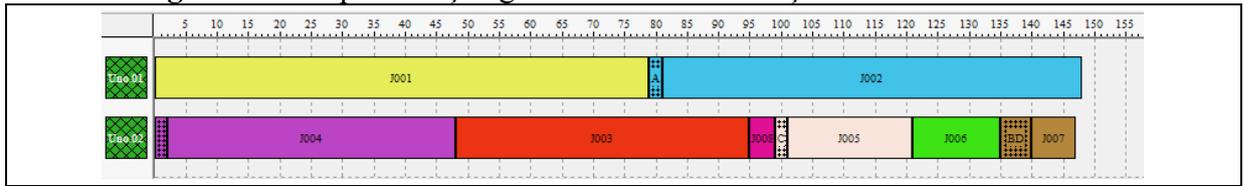
4.4.2.1 Resultados obtidos usando o LEKIN®

Os resultados alcançados por meio da utilização do LEKIN® são apresentados para cada instância, permitindo uma visualização clara das soluções dos dois subproblemas. O *makespan* do problema é definido como o tempo de processamento da máquina que estiver lidando com o último pedido. As Figuras 11, 12, 13, 14 e 15 ilustram todos os resultados.

Figura 11 – Representação gráfica da melhor solução obtida na Instância 1.

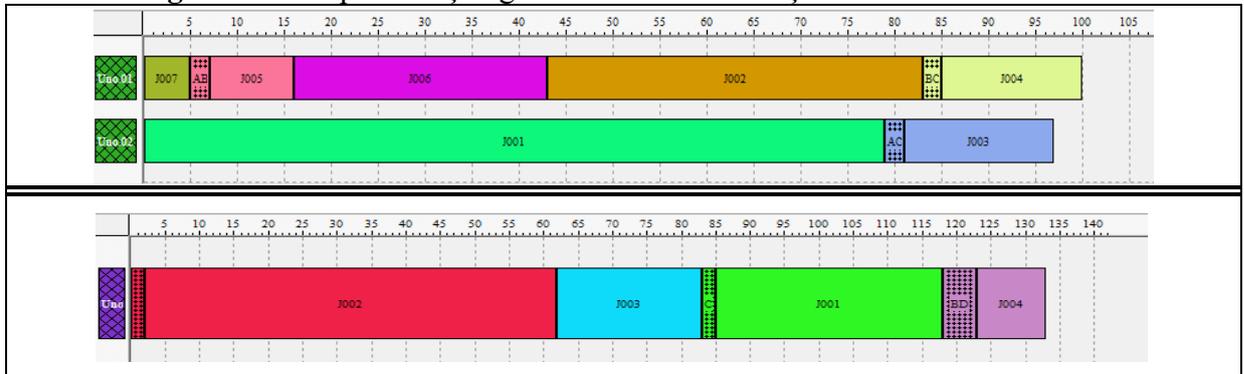
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 12 – Representação gráfica da melhor solução obtida na Instância 2



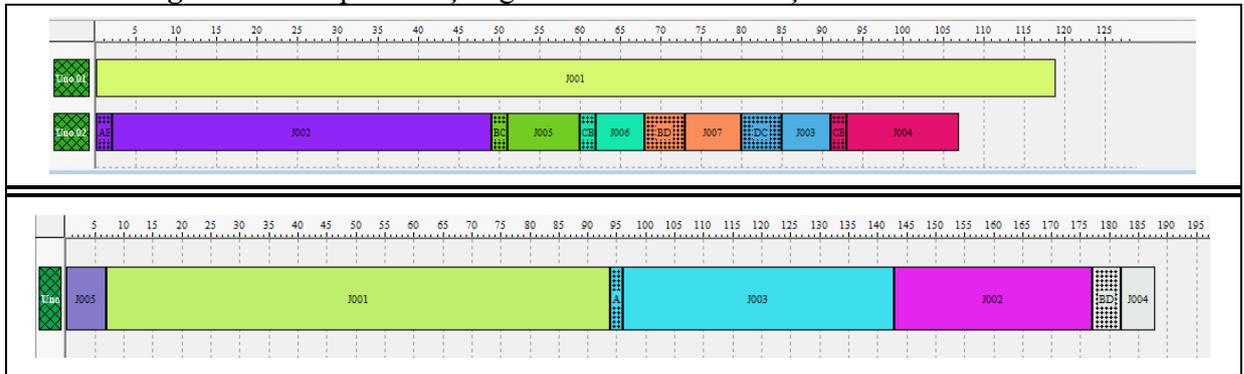
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 13 – Representação gráfica da melhor solução obtida na Instância 3



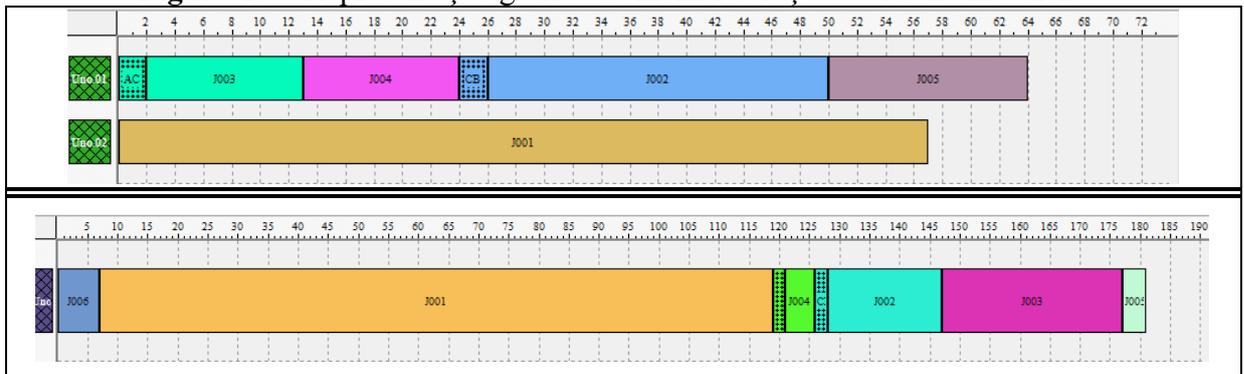
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 14 – Representação gráfica da melhor solução obtida na Instância 4



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 15 – Representação gráfica da melhor solução obtida na Instância 5



Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 11 mostra o resultado obtido ao aplicar o método do LEKIN® na instância 1, onde o tempo de conclusão da última máquina é de 79h na parte 1, enquanto na parte 2 é de 169h. Logo, o *makespan* da solução é de 169 horas. Considerando essa mesma lógica para as demais, apenas a instância 2 não teve uma parte 2 a ser processada no LEKIN®, pois havia apenas um pedido de 12 kg a ser processado, levando 23h. Assim, como pode ser visualizado na Figura 12, o *makespan* da solução 2 é de 148 horas, o qual processa o último pedido da demanda nesta semana.

Ao analisar os resultados obtidos com a aplicação do LEKIN® em todas as instâncias, percebe-se que, na maioria dos casos, o último pedido a ser processado é um do tipo 12 kg. Isso se deve à menor quantidade de máquinas disponíveis para lidar com esse tipo de problema e ao fato de que, ao processar o problema no *software*, devido às suas limitações, não foi considerado que m_{21} estaria disponível.

4.4.2.2 Resultados obtidos usando a Heurística Gulosa

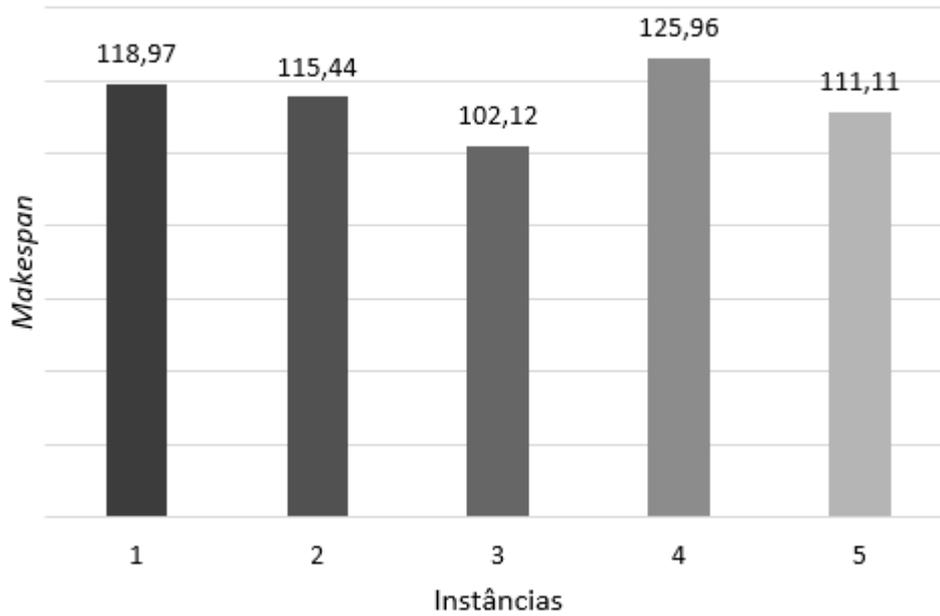
Os resultados obtidos ao aplicar a Heurística proposta, diferente da aplicação do *software*, considerou o problema com todas as suas especificidades. A partir dos testes realizados e considerando a dimensão do problema, foi definido que a heurística deve realizar uma quantidade de dez mil iterações para que resulte numa solução viável. É possível observar, na Tabela 1, o *makespan* de cada instância obtido com a Heurística Gulosa.

Tabela 1 – Resultado do *makespan* obtido com a heurística.

Instância	<i>Makespan</i> (h)
1	118,97
2	115,44
3	102,12
4	125,96
5	111,11

Fonte: Autoria própria (2023).

Para cada instância, a heurística foi executada 10 vezes, e em todas as ocasiões, obteve-se o mesmo resultado que na primeira execução, o que implica que foi alcançado um resultado bastante próximo da solução ótima ou a própria solução ótima, dado que as instâncias testadas possuem uma dimensão reduzida. Por esse motivo, o resultado foi apresentado apenas uma vez. No Gráfico 1, é possível visualizar o *makespan* de cada instância.

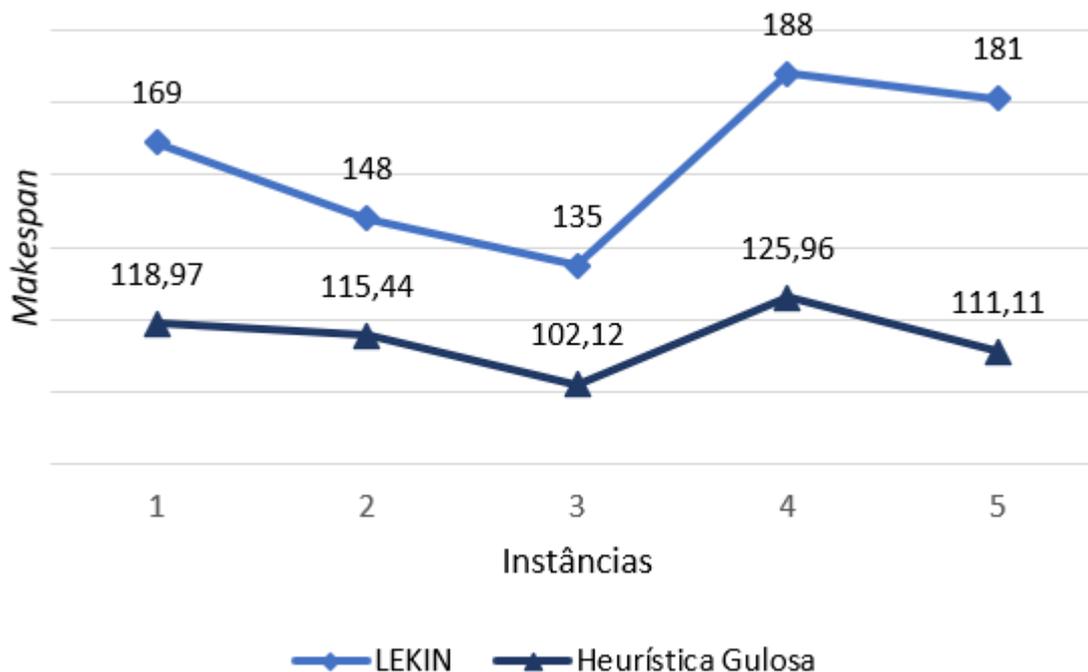
Gráfico 1 – Resultado do *makespan* por instância.

Fonte: Autoria própria (2023).

Ao analisar o Gráfico 1, é perceptível que a instância 4 apresentou um *makespan* mais elevado, enquanto a instância 3 registrou o menor *makespan*. Dessa forma, pode-se explicar a diferença na demanda entre as instâncias 4 e 3, já que a demanda substancialmente superior na instância 4, resulta em um tempo de processamento mais prolongado das máquinas, acarretando um aumento do tempo de conclusão do último pedido.

4.4.2.3 Análise e discussão dos resultados experimentais

Dada a relevância dessa aplicação para a empresa, foi realizada uma análise comparativa entre os dois métodos empregados, de forma que, fosse possível comparar os resultados obtidos tanto pelo LEKIN® quanto pela Heurística Gulosa a fim de se obter o melhor sequenciamento de pedidos possível que minimize ao máximo o *makespan*. Com isso, o Gráfico 2 permite visualizar os resultados das duas aplicações.

Gráfico 2 - Comparação dos resultados obtidos pelo LEKIN® e pela Heurística Gulosa.

Fonte: Autoria própria (2023).

Conforme demonstrado no Gráfico 2, os dois métodos apresentam as mesmas tendências de crescimento e decréscimo, ao compará-los, percebe-se que as soluções obtidas pelo LEKIN® possuem valores de *makespan* mais elevados quando comparados ao *makespan* resultante das soluções obtidas pela Heurística Gulosa, que apresenta valores consideravelmente menores. A maior diferença refere-se a instância 5, com 69,89 horas de um método para o outro, que corresponde a 2,9 dias, enquanto a menor diferença é observada na instância 2, com 32,56 horas, equivalente a 1,3 dias. A Tabela 2, expõe em termos percentuais, a discrepância entre os resultados obtidos pela heurística em relação aos resultados que a aplicação do LEKIN® apresentou, evidenciando o melhor desempenho da heurística.

Tabela 2 – Desempenho da Heurística em Relação ao LEKIN®

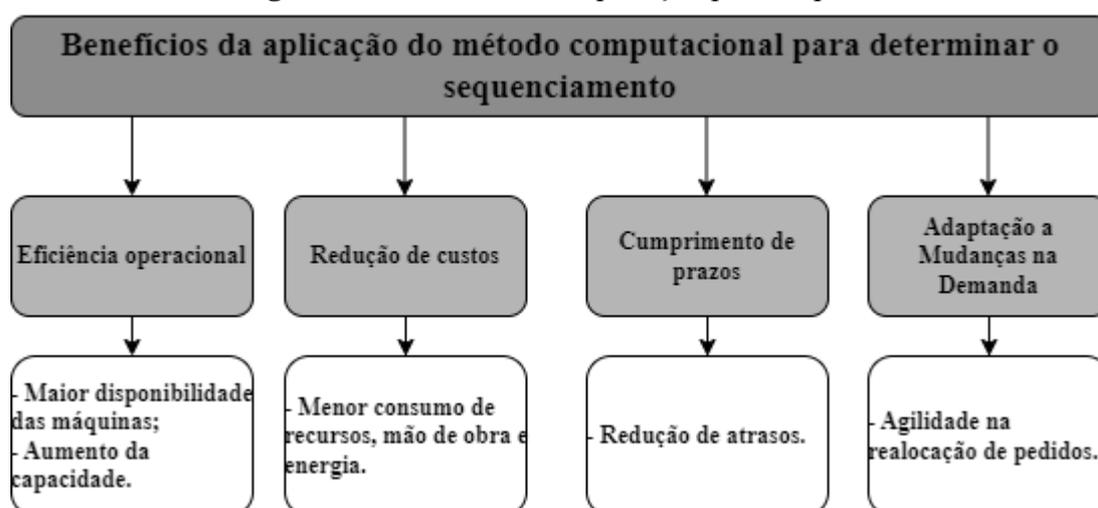
Instância	Porcentagem
1	29,60%
2	22,00%
3	24,35%
4	33,00%
5	33,08%

Fonte: Autoria própria (2023).

Tendo em vista o fato de que a empresa em questão não possui nenhum método computacional de sequenciamento, a adoção da aplicação via *software* já seria muito proveitosa e traria diversos benefícios inexistentes para a empresa, entre esses benefícios, pode-se citar a praticidade e agilidade de definição da programação. No entanto, o método da Heurística Gulosa possibilita uma maior eficiência a esse processo, uma vez que apresenta resultados ainda melhores, e demonstra resultados mais sólidos como pode ser observado no Gráfico 2.

A aplicação desse tipo de método proporciona diversos benefícios a uma organização, sendo assim, a Figura 16 demonstra alguns aspectos que são impactados a partir desta ação.

Figura 16 - Benefícios da aplicação para empresa.



Fonte: Autoria própria (2023).

Dentre os benefícios expostos na Figura 16, pode-se destacar a eficiência operacional, responsável por proporcionar uma maior disponibilidade e um aumento da capacidade das máquinas, já que é possível reduzir os tempos de inatividade dos recursos, aumentando a utilização das máquinas. Em decorrência disso, tem-se à redução de custos, de forma que, com a redução do tempo de operação das máquinas, existe um menor consumo de recursos, como o gasto energético do tempo que as máquinas passam ligadas, além da redução da mão de obra necessária.

Além disso, tal aplicação influencia em determinados aspectos, entre eles o cumprimento de prazos, já que ocasiona a redução dos atrasos de pedido, aumentando a confiabilidade do cliente e diminuindo os custos advindos da ação de não entregar no dia planejado. Adicionalmente, otimiza tanto o processo de programação quanto o de reprogramação, tornando-os mais ágeis e rápidos. A capacidade de resposta a mudanças nas demandas do mercado ou ajustes necessários nos cronogramas é aprimorada, permitindo a

empresa uma adaptação mais eficaz a cenários dinâmicos. Essa agilidade não apenas melhora a eficiência operacional, mas também posiciona a empresa de maneira mais competitiva, pronta para enfrentar desafios e explorar oportunidades no ambiente de negócios em constante evolução.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A otimização do sequenciamento, com o objetivo de minimizar o *makespan*, é de grande importância em diversos contextos, especialmente em ambientes de produção e operações. O *makespan* refere-se ao tempo de conclusão da última tarefa, e minimizá-lo significa proporcionar uma maior eficiência ao processo, melhorando a utilização de recursos e reduzindo os tempos de espera. Assim, utilizar métodos de otimização nas empresas se faz necessário, uma vez que trará benefícios como eficiência operacional, redução de custos, capacidade de se adaptar a mudanças na demanda, bem como a manutenção da competitividade no mercado.

Nesse contexto, a realização desse estudo possibilitou um melhor entendimento acerca do funcionamento do processo produtivo para obtenção e formação da areia utilizada no mercado pet, onde a partir de coleta dos dados foi possível aplicar métodos como a Heurística Gulosa e o LEKIN®, possibilitando o encontro de soluções que minimizam o *makespan* do problema, obtendo como *output*, o melhor sequenciamento produtivo considerando todos os aspectos necessários.

Dessa forma, foram obtidos os resultados para as cinco instâncias de dados aplicadas, com restrições no LEKIN® e de maneira integral ao utilizar a Heurística Gulosa. Observou-se que o *makespan* encontrado para todas as instâncias, ao empregar a heurística, demonstrou maior eficiência em comparação com os resultados obtidos pelo LEKIN®. Isso se deve tanto ao fato da eficiência e do maior espaço de busca realizado pelo procedimento heurístico, como também pela consideração de todas as especificidades do problema na implementação da heurística, algo que no LEKIN® precisou ser adaptado por limitações matemáticas e computacionais do sistema.

Desse modo, conforme as análises dos resultados, observa-se que a heurística obteve um desempenho significativamente superior, especialmente na instância 5, onde alcançou uma diferença de 2,9 dias em relação ao resultado obtido pelo LEKIN®. Tais resultados demonstram o ganho de eficiência que pode ser obtido entre um método genérico e um outro método desenvolvido em sua totalidade especificamente para o problema a ser tratado. Quando elaborada com exclusividade, a abordagem tende a demonstrar uma eficiência superior, proporcionando resultados mais satisfatórios e permitindo, viabilizando a otimização do sequenciamento da produção e, assim, promovendo uma minimização do *makespan* mais acentuada. Tal vantagem não apenas torna a empresa mais competitiva, mas também a ajuda a

alcançar seus objetivos da melhor maneira possível, com mais eficiência e um menor custo operacional.

Por fim, como possíveis trabalhos futuros, sugere-se o desenvolvimento de um método exato de programação linear inteira mista, com foco na obtenção das soluções inteiras para o problema tratado, a fim de comprovar se as soluções ótimas foram obtidas para todas as instâncias do problema ou, em caso negativo, qual foi a diferença percentual entre as soluções heurísticas alcançadas e relatadas no presente trabalho e as soluções exatas a serem obtidas.

REFERÊNCIAS

- ARROYO, José Elias Claudio. Heurísticas e metaheurísticas para otimização combinatória multiobjetivo. **Doutorado em Engenharia Elétrica (Tese de doutorado) -Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.**
- BUZZO, Walther Rogério; MOCCELLIN, João Vitor. **Programação da produção em sistemas flow shop utilizando um método heurístico híbrido algoritmo genético-simulated annealing.** *Gestão & produção*, v. 7, p. 364-377, 2000.
- CHIAVENATO, Idalberto. **Gestão da produção: uma abordagem introdutória.** Barueri, São Paulo, v. 11, 2014.
- COELHO, Sofia Araujo. **Aplicação de técnicas de planejamento e controle de produção em uma indústria salineira.** 2023. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- CORRÊA, Henrique L. CORRÊA, Carlos A. **Administração de Produção E Operações: Manufatura E Serviços: Uma Abordagem Estratégica.** 2. ed. São Paulo. Atlas, 2007.
- CORREIA, Evanielly Guimaraes; DO NASCIMENTO, Felipe Rodrigues. **A aplicação de técnicas de sequenciamento da produção para a minimização do makespan; estudo de caso de uma empresa do setor de confecções com o ambiente flexible flow shop.** In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 36. Anais. João Pessoa, 2016.
- DE OLIVEIRA, Roberta Emile Lopes; DE SOUZA, Edmar Egidio Purcino; DOS SANTOS, Camila Amorim Moura. **Minimização do tempo total de produção em sistemas produtivos flow shop permutacional utilizando otimização bio-inspirada.** In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 39. Anais. Santos, 2019.
- DOS SANTOS, Tiago Silva; FERREIRA, Luis Henrique de Moura; ROCHA Nathalia de Souza; DA COSTA Danielle Rodrigues Monteiro. **Os diferentes pontos de origem e destino podem influenciar no sequenciamento da produção: um estudo de caso em uma olaria no Sudeste.** *Revista Latino-Americana de Inovação e Engenharia de Produção*, v. 5, n. 8, p. 203-220, 2017.
- ESTENDER, Antonio Carlos; SEQUEIRA, Gisela Romariz; SIQUEIRA, Nilza Aparecida Dos Santos; CANDIDO, Guilherme Junqueira. **A importância do planejamento e controle de produção.** VI Singep–Simpósio Internacional de Gestão de Projetos, Inovação e Sustentabilidade, 2017.
- FLIZICOSKI, Andre Luiz Valentim. **Aplicação da minimização do atraso total em ambiente de máquina única com tempos de setup dependentes da sequência.** 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- FUCHIGAMI, Hélio Yochihiro; RANGEL, Socorro. **Uma análise de estudos de casos em sequenciamento da produção.** XLVI SBPO, Salvador-BA, p. 159-170, 2014.

GALVÃO, Frederico Martins. **APLICAÇÃO DE UM MODELO DE SEQÜENCIAMENTO DA PRODUÇÃO PARA UM SETOR DE MOLDAGEM DE ARTEFATOS PLÁSTICOS. Universidade Federal de Juiz de Fora, 2007.**

GERHARDT, Tatiana Engel; SILVEIRA, Denise Tolfo. **Métodos de pesquisa.** Plageder, 2009.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social.** 6. ed. Editora Atlas SA, 2008.
GUIMARAES, Irce Fernandes Gomes; DE SOUZA, Mauricio Cardoso; YALAOUI, Farouk. **O problema de sequenciamento da produção em um ambiente *flowshop* com linhas semi-paralelas e operação de sincronização final.** In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 35. Anais. Fortaleza, 2015.

HERMANN. **Design principles for industrie 4.0 scenarios: aliterature review.** In: Annual Hawaii International Conference on System Sciences 49., 2016, Estados Unidos. Proceedings... Washington, DC:IEEE Computer Society, 2016. p. 3928–3937.

MARICHELVAM, MK; PRABAHARAN, Thirumoorthy; YANG, Xin-Ela. Algoritmo de busca de cuco aprimorado para problemas de agendamento de flow shop híbrido para minimizar o makepan. **Computação Suave Aplicada**, v. 93-101, 2014.

MENEZES, Guilherme; SCHMIDT, Alex Karl Oscar; CHAN, Alberto Ming Tsung; LEONARDI, Fabrizio. **Gestão de estoque de um restaurante à la carte.** In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 39. Anais. Bento Gonçalves, 2019.

MORAES, Marcia de Fatima; BOARETTO, Marco Antonio Reichert; COELHO, Leandro dos Santos; DA ROCHA, Rony Peterson; DA MOTA, Juliano Fabiano. **Evolução diferencial autoadaptativa para solução de problemas de programação da produção em flow shop permutacional.** In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 37. Anais. Joinville, 2017.

NASCIMENTO, Francisco Paulo do; SOUSA, F. L. Classificação da Pesquisa. Natureza, método ou abordagem metodológica, objetivos e procedimentos. **Metodologia da Pesquisa Científica: teoria e prática—como elaborar TCC. Brasília: Thesaurus, 2016.**

PINEDO, Michael L. **Scheduling.** New York: Springer, 2016.

RAHMANI, Donya; RAMEZANIAN, Reza. **A stable reactive approach in dynamic flexible flow shop scheduling with unexpected disruptions: A case study.** **Computers & Industrial Engineering**, v. 98, p. 360-372, 2016.

RUIZ, Rubén; VÁZQUEZ-RODRÍGUEZ, José Antonio. The hybrid flow shop scheduling problem. **European journal of operational research**, v. 205, n. 1, p. 1-18, 2010.

SILVA, Marcel Matsuzaki da; BOSCHETTO, Jessica Werner; ZATTAR, Izabel Cristina. **Softwares de sequenciamento da produção: análise e considerações.** 2015.

SLACK, Nigel; CHAMBERS, Stuart; HARLAND, Christine; HARRISON, Alan; JOHNSTON, Robert. **Administração da produção.** 1. ed. São Paulo: Atlas, 2006.

SLACK, Nigel; JONES, Alistair Brandon; JOHNSTON, Robert. **Administração da produção**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2020.

SOUZA, Marcone Jamilson Freitas. Inteligência computacional para otimização. **Notas de aula, Departamento de Computação, Universidade Federal de Ouro Preto, disponível em <http://www.decom.ufop.br/prof/marcone/InteligenciaComputacional/InteligenciaComputacional.pdf>**, v. 6, 2008.
TUBINO, Dalvio Ferrari. **Planejamento e controle da produção: teoria e prática**. 2. ed. São Paulo. Atlas SA, 2009.

VEGGIAN, Viviane Amaro; SILVA, TF da. **Planejamento e controle da produção**. FAEF–Revistas Eletrônicas, 2011.

WANG, Chia-Nan; HSU, Hsien-Pin; FU, Hsin-Pin; PHAN, Nguyen Ky Phuc; NGUYEN; Van Thanh. Scheduling Flexible Flow Shop in Labeling Companies to Minimize the Makespan. **Comput. Syst. Sci. Eng.**, v. 40, n. 1, p. 17-36, 2022.

WANG, Sheng-yao; WANG, Ling; LIU, Min; XU, Ye. An enhanced estimation of distribution algorithm for solving hybrid flow-shop scheduling problem with identical parallel machines. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 68, p. 2043-2056, 2013.

ZOBOLAS, GI; TARANTILIS, Christos D.; IOANNOU, George. Minimizando o Makespan em problemas de escalonamento de flow shop de permutação usando um algoritmo metaheurístico híbrido. **Computadores e Pesquisa Operacional**, v. 4, pág. 1249-1267, 2009.