

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO PROFISSIONAL EM INOVAÇÃO
TECNOLÓGICA

**MÉTODO PARA OTIMIZAÇÃO DE PRODUÇÃO
EM INDÚSTRIAS DE FERTILIZANTES
MINERAIS**

RENAN MARTINELLI

ORIENTADORA: PROF. DRA. FLÁVIA CRISTINA MARTINS QUEIROZ MARIANO

CO-ORIENTADORA: PROF. DRA. CAMILA BERTINI MARTINS

São José dos Campos - SP
Fevereiro/2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO PROFISSIONAL EM INOVAÇÃO
TECNOLÓGICA

**MÉTODO PARA OTIMIZAÇÃO DE PRODUÇÃO
EM INDÚSTRIAS DE FERTILIZANTES
MINERAIS**

RENAN MARTINELLI

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Profissional em Inovação Tecnológica da Universidade Federal de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Inovação Tecnológica, área de concentração: Inovação Tecnológica

Orientadora: Dra. Flávia Cristina Martins Queiroz Mariano.

Co-orientadora: Dra. Camila Bertini Martins

São José dos Campos - SP

Fevereiro/2022

Elaborado por sistema de geração automática com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Martinelli, Renan

Método para otimização de produção em indústria de fertilizantes
minerais / Renan Martinelli

Orientador(a) Flavia Cristina Martins Queiroz Mariano; Coorientador(a)
Camila Bertini Martins. - São José dos Campos, 2022.

79 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Mestrado
Profissional Interdisciplinar em Inovação Tecnológica) - Universidade
Federal de São Paulo - Instituto de Ciência e Tecnologia, 2022.

1. makespan. 2. modelagem. 3. sequenciamento. 4. setup. I. Cristina
Martins Queiroz Mariano, Flavia, orientador(a). II. Bertini Martins,
Camila, coorientador(a). III. , coorientador(a). III. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO PROFISSIONAL EM INOVAÇÃO
TECNOLÓGICA

MÉTODO PARA OTIMIZAÇÃO DE PRODUÇÃO EM INDÚSTRIAS DE FERTILIZANTES MINERAIS

RENAN MARTINELLI

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Profissional em Inovação Tecnológica da Universidade Federal de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Inovação Tecnológica, área de concentração: Inovação Tecnológica.

Aprovado em 21 de fevereiro de 2022.

Membros da Banca:

Profª. Drª. Flávia Cristina Martins Queiroz Mariano
(Presidente da banca – DCT-Unifesp)

Prof. Dr. Antonio Augusto Chaves
(Membro Titular - DCT-Unifesp)

Prof. Dr. Emerson Gomes dos Santos
(Membro Titular – EPPEN - Unifesp)

Prof. Andre Yoshizumi
(Membro Titular - Trustly)

São José dos Campos - SP
Fevereiro/2022

AGRADECIMENTO

Aos meu pais que me incentivaram e deram apoio ao longo de toda minha trajetória.

Às minhas orientadoras Prof. Dra. Flavia Cristina Martins Queiroz Mariano e Prof. Dra. Camila Bertini Martins por sua confiança, disposição e compreensão em me orientar neste trabalho.

Aos membros da banca pelos direcionamentos para melhor construção desse trabalho e ao Tiago Tibúrcio por disponibilizar seu conhecimento e tempo para auxiliar nos resultados.

RESUMO

A competitividade no âmbito do mercado global é o fator essencial para a sobrevivência de empresas. A tecnologia em inovação e soluções de problemas são cada vez mais utilizada, reduzindo a cada dia trabalhos manuais e intuitivos, pois a dependência desses faz com que as empresas se fragilizem e percam lucratividade. Nas indústrias um dos fatores ligados a eficiência dos setores produtivos é a programação de produção, sendo o sequenciamento da produção um fator chave para evitar perdas de disponibilidade e conseqüentemente aumentar a produtividade. O sequenciamento de produção visa a redução dos tempos de *setup* e redução do *makespan*. Esse tipo de solução é fundamental em empresas que possuem flexibilidade de *mix* de produtos e que dependem do comparecimento logístico para produção, classificadas como *make to order*. O objetivo deste trabalho foi propor um método heurístico para otimização do número de setups dos lotes de produção de uma indústria de fertilizantes minerais. O método heurístico foi comparado com o método proposto por Gupta (1988) adaptado, meta-heurística A-BRKGA, modelo matemático fluxo *multicommodity* e com o método praticado na empresa. Para efeitos de comparação dos ganhos de quantidade de setups entre os métodos, utilizou-se o teste de Kruskal-Wallis e *post-hoc* de comparações múltiplas de Dunn. Dentre os modelos selecionados, o método heurístico garantiu um ganho econômico para a indústria, devido à redução da quantidade de *setups* e redução da probabilidade de contaminações entre produtos. Com base nos resultados obtidos com o método heurístico, foi criada e avaliada uma ferramenta de sequenciamento de produção, permitindo que o setor de planejamento e controle de produção e o setor de produção obtenha uma rápida listagem dos lotes a serem produzidos no dia e que garanta uma redução nos custos da empresa.

Palavras-chave: *makespan*, modelagem, sequenciamento, *setup*.

ABSTRACT

Competitiveness within the global market is an essential factor for the survival of companies. Technology in innovation and problem solving are increasingly used, reducing manual and intuitive work every day, as their dependence makes companies fragile and lose profitability. In industries, one of the factors linked to the efficiency of the productive sectors is the production schedule, being the production sequencing a key factor in avoiding availability losses and consequently increasing productivity. Production sequencing aims to reduce setup times and reduce makespan. This type of solution is essential in companies with flexibility in their product mix and dependence on logistical attendance for production, classified as make to order. The objective of this work was to propose a heuristic model to optimize the number of setups of production lots in a mineral fertilizer industry. The heuristic method was compared with the method proposed by Gupta (1988) adapted, the A-BRKGA meta-heuristic, the multicommodity flow mathematical model and the method practiced in the company. The Kruskal-Wallis test and post-hoc Dunn's multiple comparisons were applied to compare the number of setups between the methods. Among the selected models, the heuristic method guaranteed an economic gain for the industry due to reducing the number of setups and reducing the probability of contamination between products. Based on the results obtained with the heuristic method, a production sequencing tool was created and evaluated, allowing the production planning and control sector and the production sector to quickly list of the batches to be produced on the day and to guarantee a reduction in the company's costs.

Keywords: *makespan, modeling, sequencing, setup.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma de produção de fertilizantes <i>make to order</i>	18
Figura 2 - Modelos de produção.....	21
Figura 3 - Etapas RSL.....	24
Figura 4 - Fluxo do processo de identificação e seleção.....	27
Figura 5 - Quantidade de publicações classificadas em proposta de solução e protótipo.	28
Figura 6 - Distribuição de publicações por anos.....	28
Figura 7 - Distribuição de publicações por país.....	29
Figura 8 - Distribuição dos tipos de indústrias reportadas nas publicações.	29
Figura 9 - Distribuição dos métodos utilizados nas publicações.	30
Figura 10 - Distribuição da linguagem de programação utilizada nas publicações. ...	31
Figura 11 - Distribuição do tipo de método utilizado por linguagem de programação.	31
Figura 12 - Ciclo de desenvolvimento de aplicação.	37
Figura 13 - Modelo de distribuição de moegas.....	38
Figura 14 - Grafo do modelo matemático.	46
Figura 15 - Gráfico de silhueta.	50
Figura 16 - Dendograma - método ward.	51
Figura 17 - <i>Boxplot</i> de ganhos de <i>setups</i> dos métodos	53
Figura 18 - Distribuição de ganhos de <i>setup</i> por mês e método.	54
Figura 19 - (A) Tela de acesso, (b) Tela de cadastro de ordem, (c) Tela de cadastro de moegas e (d) Tela de sequenciamento da ferramenta de sequenciamento de produção.	57
Figura 20 - Resultado de perguntas positivas questionários de usabilidade, utilidade e satisfação.	59

Figura 21 - Resultado de perguntas negativas questionários de usabilidade, utilidade e satisfação.	59
---	----

LISTA DE TABELAS

Quadro 1 - Dimensões da flexibilidade.....	20
Tabela 1 - Critérios de inclusão e exclusão.....	25
Tabela 2 - Detalhamento da extração de dados.....	26
Tabela 3 - Resultado avaliação de qualidade dos estudos.	27
Tabela 4 - Dados e especificações de produtos finais (ton).....	38
Tabela 5 - Exemplos de fórmulas transformadas em binário	42
Quadro 2 - Especificações máquinas para testes	48
Tabela 6 - Divisão de formulações em 4 clusters.....	51
Tabela 7 - Divisão de formulações em 7 clusters.....	51
Tabela 8 - Medidas resumo do ganho de <i>setup</i> por método em 12 meses.....	53
Tabela 9 - Comparação múltipla para diferentes métodos pelo teste de <i>post-hoc</i> de dunn	55
Tabela 10 - Ganhos de faturamento por método em 12 meses	56
Quadro 3 - Característica dos usuários	58
Tabela A: Ganhos de <i>setup</i> em relação ao sequenciamento manual e tempo de execução dos métodos	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IDE - *Integrated Development Environment*

BRKGA – *Biased Random-key Genetic Algorithm*

SKU - *Stock Keeping Unit*

HMLV - *High Mix, Low Volume*

MTSP – *Minimization of Tool Switching Problem*

NP - *Non-Deterministic Polynomial time*

RSL - *Revisão Sistemática da Literatura*

TCLE - *Termo de Consentimento Livre e Esclarecido*

TON - *Tonelada*

UNIFESP - *Universidade Federal de São Paulo*

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Contextualização.....	15
1.2 Questões de Pesquisa	18
1.3 Objetivos	19
1.3.1 Objetivos específicos.....	19
1.4 Organização do texto	19
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 Fundamentação teórica.....	20
2.1.1 Ambientes de produção e definições	20
2.1.2 Programação de sequenciamento de produção.....	22
2.1.2.1 Métodos heurísticos e meta-heurísticos.....	23
2.2 Revisão sistemática	24
2.2.1 Metodologia.....	24
2.2.2 Resultados	26
2.2.3 Discussão dos resultados.....	34
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
3.1 Metodologia.....	36
3.2 Conjunto de Dados.....	37
3.3 Métodos e Modelos para sequenciamento.....	39
3.3.1 Método Heurístico proposto	39
3.3.2 Método heurístico de Gupta (1988) adaptado	41
3.4 Soluções MTSP.....	43
3.4.1 Meta-heurística A-BRKGGA adaptado.....	43
3.4.2 Modelo matemático em fluxo <i>multicommodity</i>	46
3.4.3 Comparação entre Métodos.....	48
3.4.4 Desenvolvimento da ferramenta de sequenciamento	49
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
4.1 Determinação do número de clusters para o modelo de Gupta	50
4.2 Resultado Comparativo entre Métodos	52
4.3 Ferramenta e Testes	56
4.4 Lista de Publicações	60

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO	61
5.1 Contribuições	61
5.2 Perspectivas Futuras.....	61
REFERÊNCIAS	63
APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO 1	68
APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO 2	69
APÊNDICE C – QUESTIONÁRIO 3	70
APÊNDICE D – RESULTADOS COMPUTACIONAIS	72

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

As crescentes mudanças tecnológicas combinadas com a globalização dos mercados e a maior exigência das empresas em aspectos como custo e prazo, estimulam as indústrias a aumentarem sua eficiência produtiva e assim fazerem melhor uso de seus recursos para que se mantenham de forma competitiva no mercado, variando de acordo com os objetivos estratégicos e do ramo de atuação.

A competitividade faz com que as empresas priorizem volume à customização e flexibilidade. Por outro lado, os consumidores aumentam a necessidade de produtos únicos e diferenciados, fazendo com que a indústria de larga escala ou produção em massa apliquem inovações nos processos existentes.

Esses conceitos até então são estabelecidos com base no modelo popularizado por Henry Ford, onde são utilizadas grandes quantidades de máquinas e trabalhadores, simplificando e padronizando os produtos finais, visando o aumento do volume de produção e conseqüente a diluição dos custos operacionais a partir desse volume. Com a necessidade de grandes investimentos para tal operação esse tipo de modelo foi gradualmente substituído pelo modelo de produção enxuta ou sistema Toyota de produção, que visam a redução significativa da utilização de recursos, máquinas, despesas e conseqüente redução dos custos operacionais, tornando o mercado cada vez mais competitivo (MATIAS, 2021).

Uma variação dos modelos de Ford e Toyota, anteriormente citados, e que vem cada vez mais sendo a tendência de atendimento ao mercado global, são modelos de produção com um *mix* grande de produtos, esse tipo de indústria visa o aumento de SKU (*Stock Keeping Unit*), ou seja, aumenta-se a complexidade das linhas de produção para atendimento exclusivo aos consumidores. Para essas empresas a habilidade de flexibilizar sua produção para mudanças rápidas de produtos é fundamental. Essas são características de uma indústria no ambiente HMLV (*High*

Mix, Low Volume), onde pequenos lotes são fabricados diariamente de acordo com a demanda (SLACK *et al.*, 2009).

Grande número de trocas de *setup* e de variedade de produtos aumenta devido à flexibilidade das empresas e a competitividade entre elas (SLACK *et al.*, 2009). A capacidade de mudança rápida é amplamente reconhecida como um requisito essencial para a flexibilidade e agilidade na fabricação de pequenos lotes. Assim, para uma empresa se manter competitiva, o alinhamento para um efeito rápido de transição de uma linha de produção realizando alterações de produtos é imprescindível (MCINTOSH *et al.*, 2007).

A programação detalhada da produção é uma atividade complexa especialmente em empresas que operam com estratégia de produção contra pedido ou denominada *make to order* e em especial as que dependem do comparecimento logístico para tal (GIACON; MESQUITA, 2011). O modelo de produção *make to order* visa realizar a produção do produto final somente com o pedido de compra fechado ou com o comparecimento logístico para retirada do mesmo. Esse tipo de modelo é usado para indústrias que não possuem maneira de estocar seu produto acabado, assim a produção vai direto para o cliente.

De acordo com o aumento de SKUs e modelo do ambiente de atendimento de produção *make to order*, de modo a manter a competitividade, a empresa assume lidar com certos problemas decorrentes da complexidade, grande variedade de produtos e problemas com padronização.

No entanto, existem maneiras de se aumentar a eficiência produtiva da indústria como, substituição de equipamentos, mudanças de layouts de linha e a redução da quantidade/tempo de *setup* (mudanças de produtos) otimizando o sequenciamento. Ou seja, quanto menor for o tempo de preparação da máquina, menor poderá ser o tamanho do lote produzido, logo maior será a eficiência (CAKMAKCI, 2009).

Para empresas que possuem modelos de produção em que o tempo de *setup* é dependente da sequência de produção e que se agrava com modelos logísticos *make to order* é comum as reduções de suas disponibilidades e performances, devido a necessidade de absorver desvios de planejamento por falhas no comparecimento logístico. Contudo, para a mitigação das perdas é necessário a implementação de métodos de sequenciamento que se adéquem a cada realidade, visando maior

redução dos custos e aumento da capacidade de competitividade da empresa no mercado.

Para redução *makespan*, que é o tempo total de transformação da matéria-prima para o produto final, e conseqüente diminuição dos tempos de *setup*, o sequenciamento de produção deve ser otimizado. Neste cenário, o sequenciamento de produção otimizado e automatizado pode ser empregado em indústrias de mistura de fertilizantes, pois o mesmo é essencial para ganhos de disponibilidade e performance, sabendo da grande gama de produtos finais e matérias-primas iniciais com grande variação de quantidades de insumos distintos.

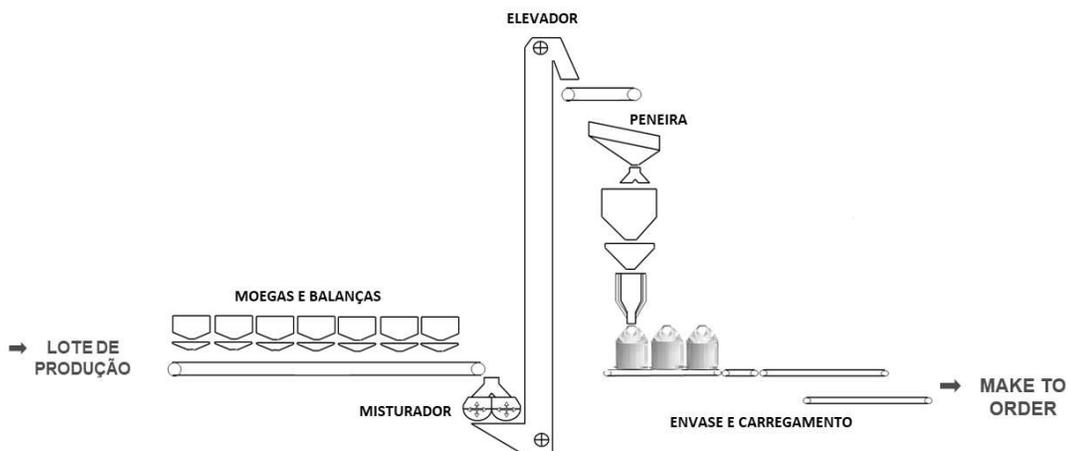
Estudos que sugerem métodos a serem aplicados para otimização de sequenciamento de produção, os principais exemplos encontrados foram indústrias de fabricação de água (WU; HSU; LAI, 2011), indústria de produção de eletrônicos (YAZDANI; RASARATNAM, 2013) e indústria de alimentos (KARRAY; BORNE; BENREJEB, 2015), assim nenhum estudo com foco em indústria de fertilizantes com ambientes *make to order* foi encontrado, que possuem restrições específicas a serem consideradas, como grande número de formulações, grande número de matérias-primas e uma máquina única a ser produzido.

O papel dos fertilizantes no agronegócio é aumentar a produtividade e garantir produtos saudáveis e esse desafio se torna cada vez maior devido ao exponencial aumento populacional. Além da relação com aumento de produtividade, os fertilizantes contribuem para reduzir o desmatamento, a erosão, a poluição da água, emissão de gases do efeito estufa, pois para uma mesma área plantada se aumenta a produtividade de forma que diminui a necessidade de novas áreas para produção (REETZ, 2017).

O tema foi motivado pela necessidade de uma empresa brasileira produtora de fertilizantes minerais obter um sequenciamento de produção padronizado, automático e não intuitivo. Atualmente, na empresa em estudo existe um sistema de planejamento e controle de produção, porém não possui um módulo de sequenciamento, fazendo com que ocorra perdas de eficiência, produtividade e conseqüentemente financeira.

A Figura 1 é um exemplo de fluxograma de produção de fertilizantes em minerais em que o início se dá pela alimentação das moegas com matérias-primas distintas e essas serão dosadas em balanças com as quantidades necessárias para cada formulação, após dosagem, mistura, peneiramento e envase, o produto é carregado e entregue ao cliente.

Figura 1 - Fluxograma de produção de fertilizantes *make to order*.



Fonte: O autor (2021).

O lote de produção é gerado a partir dos caminhões disponíveis para carregamento e nele pode existir qualquer uma das mais de 200 formulações possíveis, dado que o ambiente de produção é *make to order*. Como resultado, espera-se o sequenciamento de produção de maneira a reduzir o número de *setups* do início ao fim do lote.

1.2 Questões de Pesquisa

A fim de delimitar a pesquisa e seguindo o contexto de uma indústria de fertilizantes com modelo de produção *make to order* exposto anteriormente, o estudo buscará responder as questões:

1. Qual método de sequenciamento é indicado para problemas em ambiente *make to order*?
2. Como os usuários da área poderão se beneficiar do uso do modelo adequado de sequenciamento?

1.3 Objetivos

Este estudo tem como objetivo geral o desenvolvimento de um método de sequenciamento de produção com tempo de *setup* dependente da sequência de produção, que propicie a otimização do sistema de produção em uma empresa de fertilizantes minerais que utiliza modelo de produção *make to order*.

1.3.1 Objetivos específicos

A fim de chegar ao objetivo geral é necessário que sejam atingidos os objetivos específicos a seguir:

- Propor um algoritmo a partir de um método de sequenciamento heurístico que considere características inerentes ao problema em questão;
- Comparar o método proposto com métodos existente na literatura;
- Criar uma ferramenta para execução do algoritmo desenvolvido.

1.4 Organização do texto

Este trabalho está dividido em 5 capítulos. No capítulo 2 são apresentados o conceito de sequenciamento de produção e sua importância na competitividade nas indústrias e revisão sistemática. Em seguida, o capítulo 3 descreve os materiais e metodologia de condução do projeto. O capítulo 4 expressa os resultados e discussões encontrados e, por fim, no capítulo 5 são expostas considerações finais do estudo.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fundamentação teórica

2.1.1 Ambientes de produção e definições

Para classificação de ambientes de produção, existem diversas classificações praticadas por diversos autores, a diferença entre empresas na dimensão flexibilidade e a habilidade de cada uma é resumida de acordo com o Quadro 2 conforme (SLACK, 1991).

Quadro 1 - Dimensões da flexibilidade.

Tipo de flexibilidade	Definição
Flexibilidade de volume	Habilidade de mudar o nível de produção
Flexibilidade de entregas	Habilidade de mudar as datas programadas para entrega
Flexibilidade de <i>mix</i>	Habilidade de mudar a variedade de produtos
Flexibilidade de novos produtos	Habilidade de introduzir novos produtos no mercado (incluindo modificação dos produtos existentes)

Fonte: SLACK (1991).

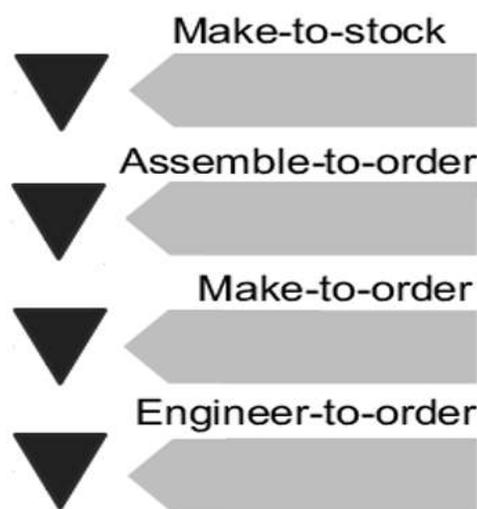
Empresas que possuem dimensões de flexibilidade de volume possuem a vantagem de alterar sua capacidade produtiva rapidamente e passar a produzir altos volumes em pouco tempo. Empresas que possuem flexibilidade de entregas têm a capacidade de aumentar os estoques e alterar datas de entrega conforme as demandas dos consumidores. Indústrias que possuem a flexibilidade de *mix* de produtos tem a habilidade de aumentar a variedade de produtos finais e manter-se competitivas. Por fim, as empresas que possuem a flexibilidade de novos produtos

têm a vantagem de modificar ou introduzir novos produtos de maneira rápida no mercado (RODERO *et al.*, 2010).

A indústria de fertilizantes minerais flutua na classificação de flexibilidade de *mix* de produtos e de volume, devido a se tratar de uma commodities de baixa margem, a necessidade de altos volumes visa a diluição de custos e o aumento dos lucros. Porém, como o mercado brasileiro (CEPEA, 2021), é preponderantemente agrícola e com alta variedade de tipos de culturas de alimentos a necessidade de tipos de fertilizantes diferentes para atendimento ao mercado é grande, por isso esse tipo de indústria também pode ser classificado como flexibilidade de *mix* de produtos.

Além da flexibilidade nos ambientes conforme descrito no Quadro 22, há também uma classificação entre os ambientes de produção quanto ao modelo produção e entrega dos produtos. Os ambientes se classificam em 4 diferentes tipos conforme Figura 2.

Figura 2 - Modelos de produção.



Nota: *Make to stock* (Produção para atendimento de estoque).

Make to order (Produção contra pedido de venda).

Assemble to order (Montagem contra pedido de venda).

Engineer to order (Engenharia do produto contra pedido de venda).

Fonte: Adaptado de: Willner (2014).

Ambientes *make to stock* possuem previsibilidade da demanda e alta capacidade de armazenagem (estoque), um exemplo são indústrias de bebidas que possuem grandes centros de distribuição espalhados pelo país. Já, ambientes *make to order* não possuem previsibilidade de entregas e nenhuma capacidade de armazenagem, por isso dependem do pedido de compra e comparecimento logístico

para realizar a produção, um exemplo são industriais de mistura de fertilizantes minerais, onde a sequência de produção irá variar com a sequência de produção e extremamente dependente do comparecimento logístico.

Ambientes *assemble to order* são referências de empresas que possuem alta customização e alto valor agregado em seus produtos, por isso dependem do pedido de compras para realizar a montagem do produto final, por exemplo, fábricas de lanchas de luxo. Por último os ambientes *engineer to order* a personalização vai desde a matéria-prima até o produto final, por isso o pedido de compras é específico para cada caso e sua “engenharia” é feita a partir desse, os produtos são altamente customizados e o nível de interação com o cliente é muito grande, por exemplo, fabricação de vestidos de noiva.

2.1.2 Programação de sequenciamento de produção

Tempo de *setup* é o tempo necessário para preparar um processo ou uma máquina na transição de uma tarefa, ou produto para outro, incluindo nesse tempo materiais, limpeza, recolocação de ferramental, posicionamento de acessórios, ajuste de ferramentas e inspeção de materiais. Para casos em que o tempo de *setup* é tratado separado dos tempos de processamento das tarefas, existem dois tipos de problemas: tempos de *setup* dependentes da sequência de execução das tarefas; tempos de *setup* independentes da sequência de execução das tarefas. Para Baker (1974) *setups* dependentes da sequência são comumente encontrados onde uma só instalação produz muitos tipos diferentes de itens, ou onde máquinas de múltiplos propósitos realizam uma variedade de tarefas.

Para um melhor entendimento, o tempo para execução de um *setup* irá variar com a compatibilidade e similaridade das tarefas ou produtos a serem produzidos em uma mesma máquina. Portanto, quanto mais similares são os produtos menores serão os tempos de *setups* e conseqüentemente quanto mais diferentes, maior será esse tempo.

Pinedo (2012) genericamente classifica os problemas de programação de produção em grandes classes, são elas: Máquina Única, Máquinas em paralelo, *Flow Shop*, *Flexible Flow Shop*, *Job Shop* e *Open Shop*.

Conforme Pinedo (2012) o modelo de máquina única possui maior simplicidade e se caracteriza por um modelo que uma única máquina processa necessariamente

toda a produção seguindo a sequência inserida na mesma. O segundo modelo com maior complexidade que a primeira, na classe de máquinas idênticas em paralelo, mais de uma tarefa pode ser processada utilizando máquinas em paralelo.

A partir dos modelos mais básicos como máquina única e máquinas em paralelo, outros modelos de produção com maior complexidade podem ser utilizados como, por exemplo *Flow Shop*, são categorizados em ambientes que possuem n máquinas em série e cada trabalho deve ser processado em cada uma das máquinas, onde todos os trabalhos precisam seguir a mesma rota e respeitar FIFO (*First in First Out*). Contudo, essa aplicação pode ser utilizada em máquinas em paralelo no *Flexible flow shop* seguindo as mesmas restrições anteriores.

Por fim, a classe *Open Shop* se caracteriza por existirem mais de uma máquina e cada trabalho deve ser processado novamente em cada uma das máquinas.

2.1.2.1 Métodos heurísticos e meta-heurísticos

Problemas de sequenciamento em uma máquina com minimização de setups total são NP difíceis. Um problema de otimização NP-difícil sugere a utilização de modelos matemáticos para encontrar a solução ótima, porém não de maneira rápida. Entretanto, ainda é possível o uso de algoritmos aproximados (heurísticos) para encontrar a solução, que provavelmente, são próximas da ótima, com maior rapidez em relação aos modelos matemáticos (DU e LEUNG, 1990).

Sendo assim, algoritmos heurísticos são utilizados para obter uma solução, porém, esses não apresentam garantia de determinação da solução ótima, sem um limite formal de qualidade, tipicamente avaliado empiricamente em complexidade e qualidade das soluções para o problema estudado (BUENO, 2009).

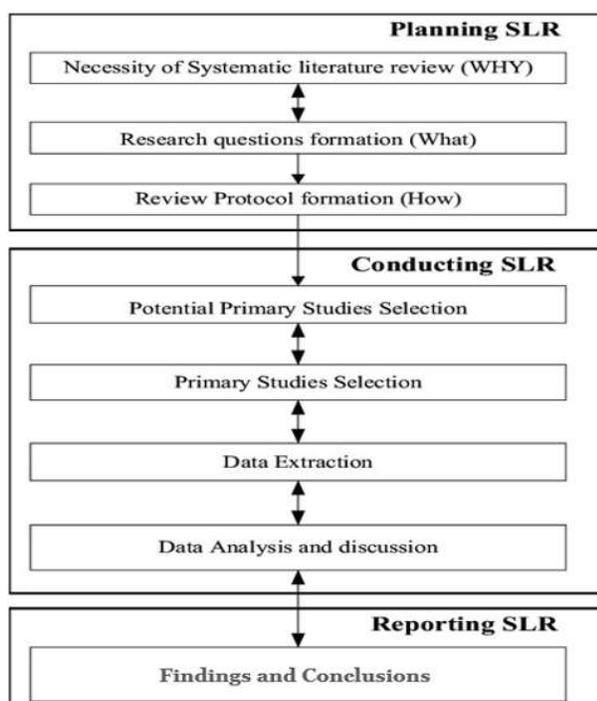
Por outro lado, os métodos e algoritmos meta-heurísticos são técnicas independentes de problemas e aplicação geral, sendo assim não se restringem a soluções ótimas locais e buscam um ótimo global, explorando o espaço de busca de forma inteligente e tempo computacional razoável (DETRO, 2013).

2.2 Revisão sistemática

2.2.1 Metodologia

Uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) foi realizada com base nas diretrizes propostas por Kitchenham e Charters (2007). A Figura 3 apresenta a sequência de etapas realizadas durante a revisão, divididas entre planejamento, condução e resultados.

Figura 3 - Etapas RSL.



Fonte: Kitchenham e Charters (2007).

De modo a auxiliar na filtragem e investigar trabalhos correlacionados com o tema deste projeto, foram determinadas 3 perguntas a serem respondidas.

Q1. Quais diferentes métodos de programação/sequenciamento são aplicados em diferentes ambientes/contextos/indústrias?

Q2. Quais as principais ferramentas e métodos de otimização usados para o sequenciamento (*setup*)?

Q3. As limitações das ferramentas, ou algoritmos são suficientes e/ou demonstradas e validados para atender o sequenciamento do processo?

A estratégia de busca foi utilizada para identificar os trabalhos no contexto de sequenciamento de produção de máquina única em ambientes *make to order*. As palavras-chave de busca nas quais foram definidas para responder às questões de pesquisa e foram utilizadas as seguintes palavras-chave.

"sequencing" AND "setup" AND "makespan" AND "modeling" AND "single machine" AND "make to order"

Três bases de dados foram escolhidas para realizar a primeira etapa e essa foram: *Scopus, SpringerLink e ScienceDirect*.

A pesquisa foi limitada a artigos primários publicados em: revistas, jornais e conferências entre o período de janeiro de 2010 a maio de 2021, e escritos em inglês. Após o levantamento, foram removidos todos os artigos duplicados e com acesso restrito. Em seguida, aplicado os critérios de inclusão e exclusão a partir da leitura dos títulos e resumos dos trabalhos e os critérios de inclusão e exclusão foram utilizados conforme descrito na Tabela 1 e a extração de dados foi realizada conforme Tabela 2.

Tabela 1 - Critérios de inclusão e exclusão.

#	Critérios de Inclusão
1	Estudos primários
2	Estudos publicados entre 2010 e 2021
3	Estudos que descrevem ou propõe um modelo, ou algoritmo de sequenciamento de produção com sequência dependente do tempo de <i>setup</i> em máquina única.
4	Estudos que propõe um modelo ou algoritmo de sequenciamento de produção em ambientes <i>make to order</i> .
#	Critérios de Exclusão
1	Estudos secundários
2	Revisões sistemáticas
3	Estudos com bloqueio de acesso ou que necessitam de pagamento
4	Estudos que não descrevem ou propõe um modelo ou algoritmo de sequenciamento de produção com sequência dependente do tempo de <i>setup</i> em máquina única.
5	Estudos que não propõe um modelo ou algoritmo de sequenciamento de produção em ambientes <i>make to order</i> .

Fonte: O autor (2021).

Tabela 2 - Detalhamento da extração de dados

Descrição	Questão de Pesquisa
ID para gerenciamento	Visão geral dos estudos
Autor, Instituição, Ano, Título e País	Visão geral dos estudos
Fonte	Visão geral dos estudos
Método da pesquisa	RQ1
Descrição do método	RQ1
Linguagem de programação	RQ2
Validação	RQ3
Ganhos	Visão geral dos estudos
Contexto/Industria	RQ1
Combinações de métodos	RQ2
Limitações	RQ3

Fonte: O autor (2021).

2.2.2 Resultados

Conforme busca realizada através das palavras-chave nas bases citadas foram encontrados 594 artigos publicados, dos quais 53 artigos eram duplicados ou tinham acesso restrito. Após a leitura dos títulos e resumos foram excluídos 397 artigos que não se encaixavam nos critérios de inclusão e exclusão e, por fim, 72 artigos foram selecionados para seguirem na condução da revisão sistemática da literatura.

Com os 72 artigos selecionados e extraídos os dados, foi realizada uma avaliação de qualidade dos estudos de acordo com questões relacionadas a quão bem os estudos foram conduzidos e assim foram selecionados os artigos melhores avaliados conforme os critérios definidos. Os resultados finais da avaliação de

qualidade dos estudos, conforme Tabela 3, foi determinada avaliando cada pergunta e atribuída pontuação 1 para 'Sim', 0,5 para 'Parcialmente' e 0 para 'Não'.

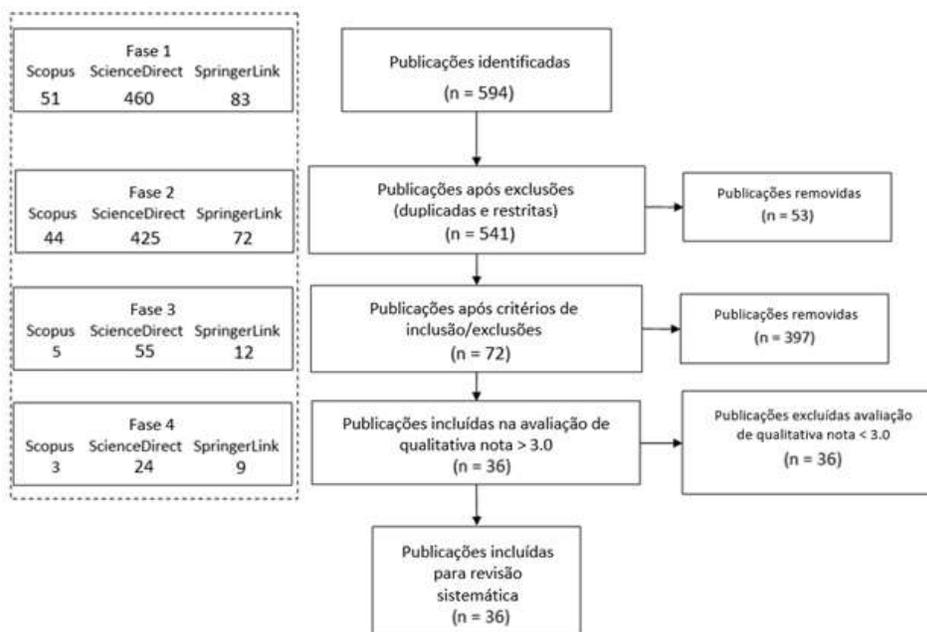
Para as próximas etapas, apenas estudos com soma >3 foram selecionados, restando 36 estudos. A Figura 4 mostra o fluxo do processo de identificação e seleção dos estudos.

Tabela 3 - Resultado avaliação de qualidade dos estudos.

ID	Questões (QA)	Sim	Parcial	Não
QA1	O método de validação do estudo é claramente realizado?	10 (15.63%)	15 (23.44%)	39 (60.94%)
QA2	O estudo compara os resultados obtidos com os resultados de outros estudos?	6 (9.38%)	30 (46.88%)	28 (43.75%)
QA3	O estudo explica o contexto em que a pesquisa foi conduzida?	7 (10.94%)	17 (26.56%)	40 (62.50%)
QA4	O estudo discute os resultados obtidos?	12 (18.75%)	42 (65.63%)	10 (15.63%)
QA5	O estudo define claramente a metodologia de pesquisa empregada?	28 (43.75%)	31 (48.44%)	5 (7.81%)
QA6	O estudo apresenta claramente os objetivos da pesquisa?	44 (68.75%)	16 (25%)	4 (6.25%)

Fonte: O autor (2021).

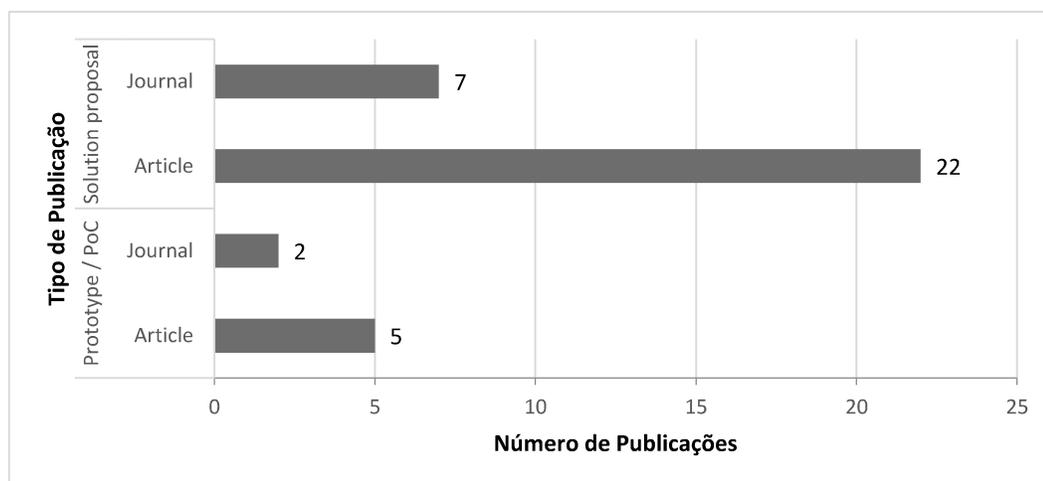
Figura 4 - Fluxo do processo de identificação e seleção.



Fonte: O autor (2021).

Os artigos selecionados, após avaliação da qualidade, foram classificados por seu tipo, divididos entre Propostas de solução (sem a criação) e Protótipos (modelo criado para testar um produto, serviço ou sistema), resultando sua maioria em propostas de solução conforme Figura 5.

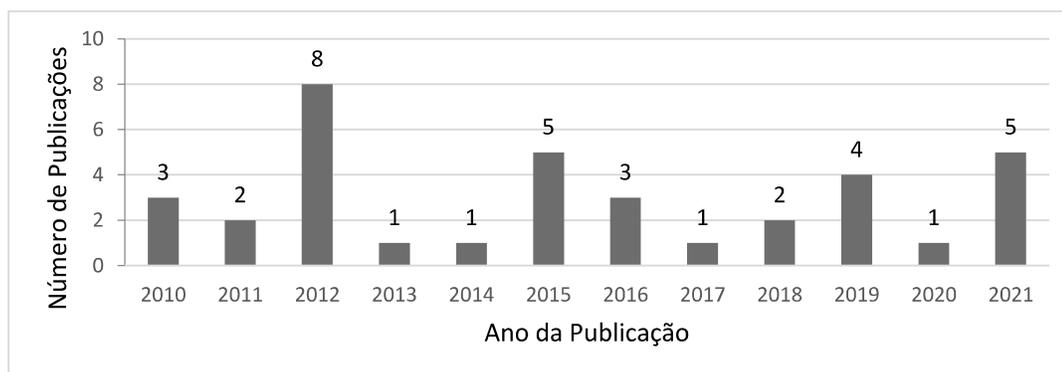
Figura 5 - Quantidade de publicações classificadas em proposta de solução e protótipo.



Fonte: O autor (2021).

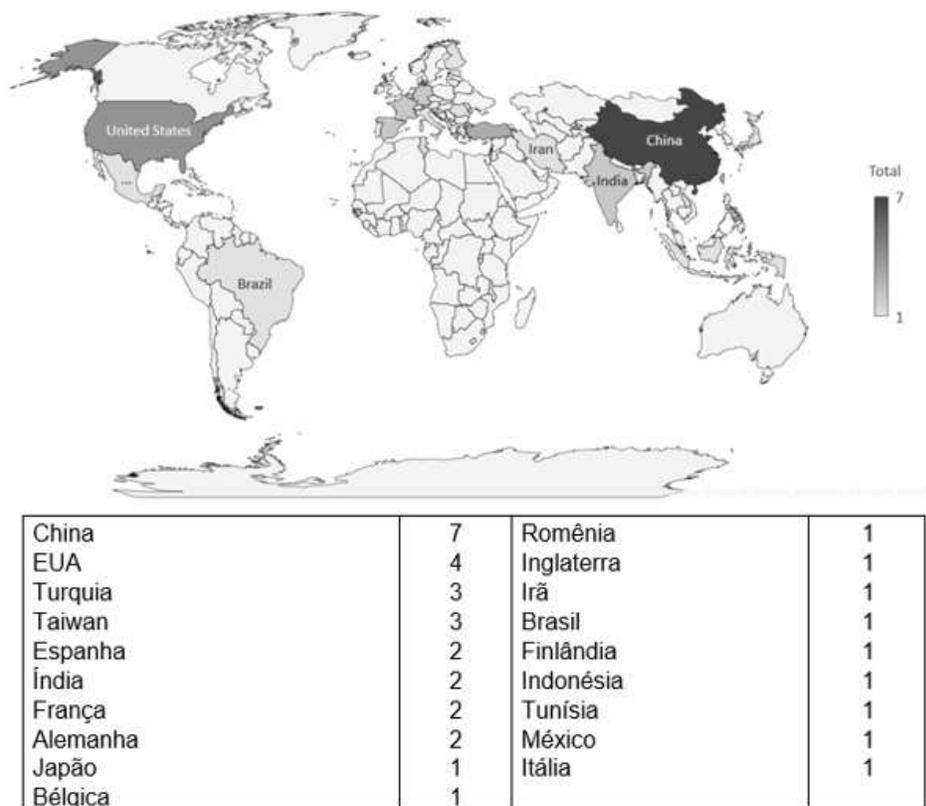
A distribuição dos artigos de acordo com seu período de publicação ao longo dos anos ocorreu conforme Figura 6, sendo que a maior concentração (8; 22%) ocorreu em 2012. As pesquisas ocorreram em sua maioria nos continentes, asiático, europeu e norte-americano conforme distribuição da Figura 7. Conforme Figura 8, 77,14% dos artigos não especificaram o tipo de indústria analisado no estudo.

Figura 6 - Distribuição de publicações por anos.



Fonte: O autor (2021).

Figura 7 - Distribuição de publicações por país.



Fonte: O autor (2021).

Figura 8 - Distribuição dos tipos de indústrias reportadas nas publicações.



Fonte: O autor (2021).

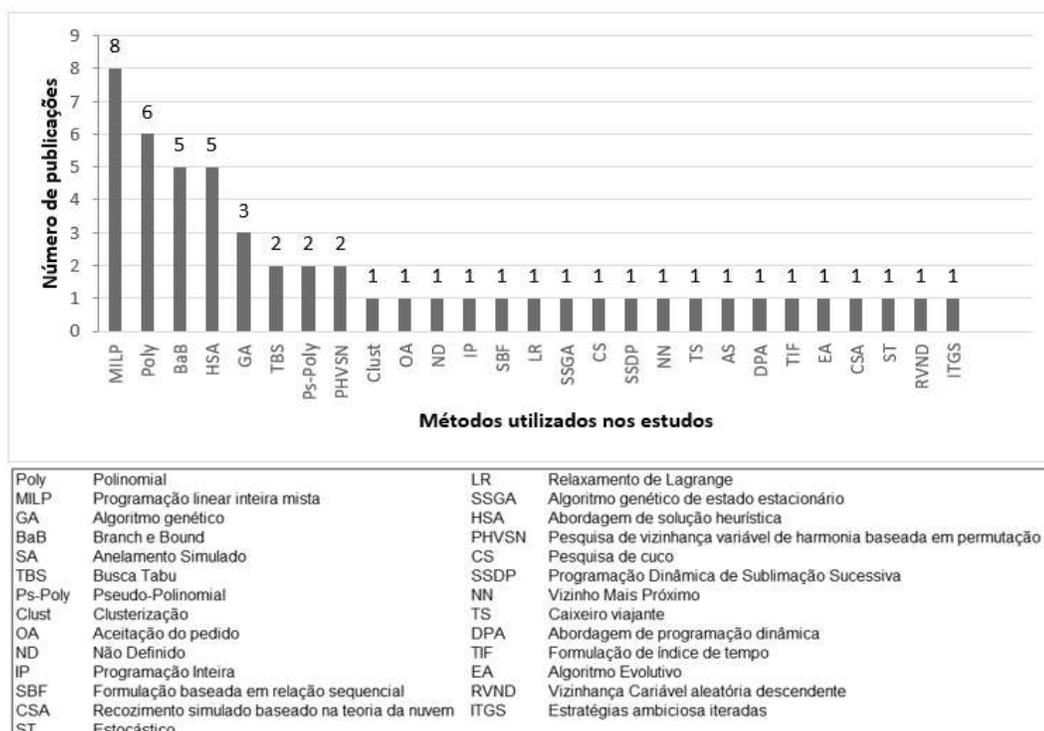
Uma característica importante que foi extraída dos estudos é quanto ao método de resolução de problemas que foram aplicados, e esse se divide entre exatos e heurísticos. A distribuição dessa classificação resultou em 17 estudos que apresentaram métodos exatos (47,22%) e 13 que apresentaram métodos heurísticos

(36,11%). No entanto, alguns estudos usaram a combinação das características dos dois métodos e representaram seis estudos (16,67%) do total.

Durante a verificação das publicações constatou-se uma característica importante nos estudos, que é a utilização de combinação de métodos, onde 20 estudos utilizaram esse tipo de combinação, dentre eles: seis (Exato-Exato), sete (Heurístico-Heurístico) e sete (Exato-Heurístico).

A Figura 9 demonstra a frequência dos métodos utilizados nos estudos, sejam eles exatos e heurísticos, os estudos apresentaram 26 métodos diferentes aplicados. Os mais utilizados foram: MILP - Programação linear inteira mista (15,38%), Poly - Polinomial (11,54%), BaB - Branch and Bound e HSA - Abordagem de solução heurística (9,62%), GA - Algoritmo genético (5,77%), TBS - Busca Tabu, Ps-Poly - Pseudo-Polinomial e PHVSN - Pesquisa de vizinhança variável de harmonia baseada em permutação (3,85%).

Figura 9 - Distribuição dos métodos utilizados nas publicações.

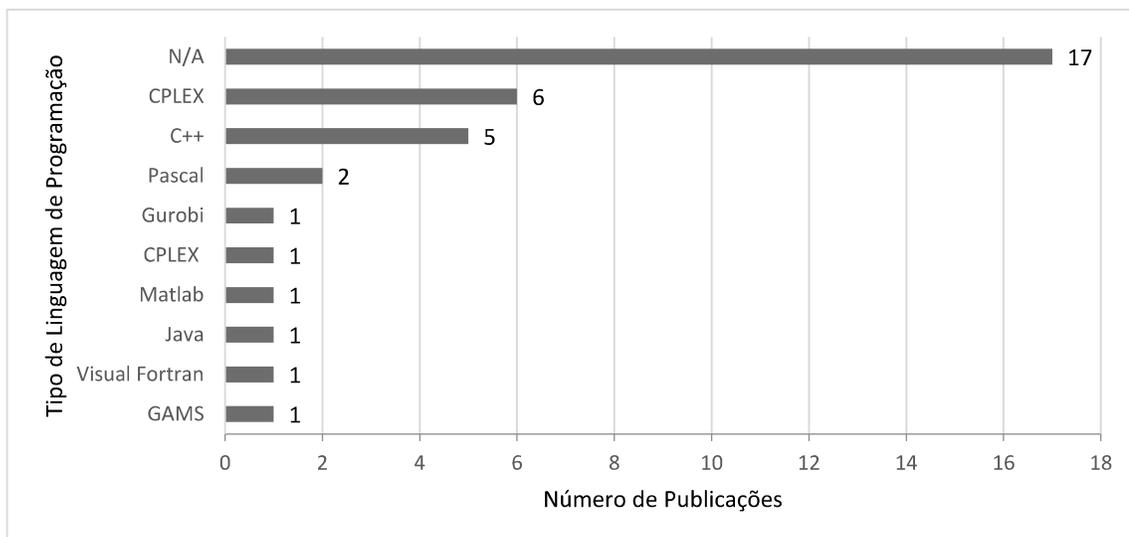


Fonte: O autor (2021).

Verificou-se que a maioria das publicações, num total de 17 (17; 47%), não utilizou software ou programação de computador para realizar a solução e testes,

conforme Figura 10. A linguagem ou software mais utilizado foi a: CPLEX (6; 16,66%), seguida de C ++ (5; 13,88%) e Pascal (2; 3,33%) (Figura 10).

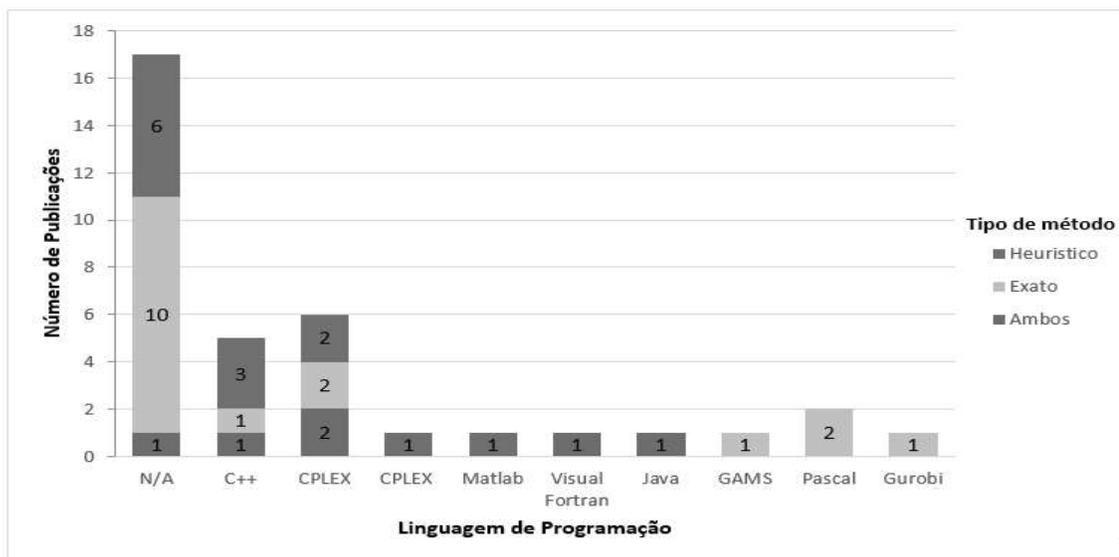
Figura 10 - Distribuição da linguagem de programação utilizada nas publicações.



Fonte: O autor (2021).

A Figura 11 mostra a distribuição do tipo de método (heurístico, exato ou ambos) por linguagem de programação dos 36 artigos analisados. Aparentemente, não há indícios de relação entre método utilizado e linguagem de programação.

Figura 11 - Distribuição do tipo de método utilizado por linguagem de programação.



Fonte: O autor (2021).

De modo a identificar quais estudos abordaram as limitações da pesquisa e se o tempo de processamento dos algoritmos foi levado em consideração durante o estudo, foram considerados 3 itens a serem extraídos dos artigos: operações específicas, escala e tempo de processamento. Dos estudos selecionados, 58,33% não tiveram limitações descritas em sua condução e resultados. Os demais estudos tiveram limitações: operações específicas (13,89%), escala (19,44%) e tempo de processamento (8,33%).

A limitação relacionada as operações específicas, foi caracterizada por métodos que são restritos a indústrias ou contextos do mesmo setor, enquanto a caracterização de escala refere-se as limitações no número de itens a serem sequenciados. Finalmente, as limitações relacionadas ao tempo de processamento mostram que o tempo de processamento dos métodos são altos para aplicações reais, tornando o método inviável em escala de fábrica.

As limitações de operações específicas representaram 14% dos estudos (AHMADOV; HELO, 2018; GHELASE *et al.*, 2013; GONZÁLEZ *et al.*, 2012; PACHECO *et al.*, 2018; ZHOU *et al.*, 2014). Todos os estudos relataram que para a aplicação dos métodos, é necessário que os ambientes de aplicação se limitassem aos tipos neles apresentados. Sistemas de manufatura específicos (AHMADOV; HELO, 2018; GHELASE *et al.*, 2013; GONZÁLEZ *et al.*, 2012) e produtos idênticos (PACHECO *et al.*, 2018; ZHOU *et al.*, 2014).

Um exemplo de limitação de escala foi representado por Weerdt, Baart e He (2021) em que o algoritmo só era competitivo para um tamanho menor (11 ou menos). Herr e Asvin (2016) encontram soluções ótimas para as instâncias menores com 8 ou 10 *jobs* com 90,79% possuindo soluções ideais. Xie e Wang (2016) relataram em seu problema que as soluções com MILP podem ser resolvidas otimamente apenas para alguns casos de 20 e 30 *jobs* enquanto a comparação com o algoritmo ABC poderia encontrar a solução ótima para o mesmo número de *jobs* com mais de 12% de desvio em relação à solução ótima.

Roohnavazfar *et al.* (2021) observaram que o tempo de CPU aumenta conforme a quantidade de trabalhos e obtiveram soluções para quantidade de 40 trabalhos e 5 configurações, levando 42700 segundos, o que é muito alto para operações reais, limitando o trabalho. Angel-Bello, Val-likavungal e Alvarez (2021) usaram um tempo computacional alto para encontrar a sequência de tarefas e executar um processo de reotimização, sugerido pelo trabalho, e depende das

características do ambiente de manufatura onde é usado. Para melhor tempo de processamento, algoritmos baseados em heurísticas e meta-heurísticas foram usados para o processo de reotimização. Çetinkaya *et al.* (2019) obtiveram excelentes resultados no uso do MILP em seus estudos. Porém, o tempo de processamento utilizado foi de 3 horas que, na prática dependendo da aplicação, não é usual. Nesello *et al.* (2018), em seu estudo, precisou de um tempo de processamento de 2 horas para obter os resultados de sua pesquisa. Tanaka e Araki (2013) precisaram da resolução 24h para conseguir a solução utilizando o software CPLEX, o que impossibilita seu uso em instalações reais no dia da indústria.

Com relação ao uso de métodos de validação das técnicas apresentadas, observou-se que 41,67% dos estudos não apresentaram nenhum método de validação, enquanto 58,33% apresentaram algum método de validação. Dentre os estudos que reportaram alguma métrica de validação, 61,90% apresentaram métodos de comparação, 19,05% utilizaram métodos experimentais e 19,05% aplicaram métodos estatísticos.

Outros resultados notáveis referem-se aos ganhos identificados nos resultados dos estudos, sendo que se verificou que apenas 61,11% dos estudos obtiveram benefícios significativos e 38,89% dos estudos não demonstraram que os ganhos. Foi possível segregar os ganhos em quatro tipos: redução do tempo computacional, redução do tempo de *setup*, aumento da qualidade do sequenciamento e agendamento robusto (capacidade de sequenciar uma grande quantidade de itens).

Çetinkaya, Çatmakas e Gorur (2019) obtiveram uma redução de 37% no tempo computacional por meio de seus estudos de uso do MILP. Por outro lado, os demais estudos não expressaram sua redução percentual nos ganhos de tempo computacional em porcentagem.

Outro tipo de ganho encontrado nos estudos está relacionado à redução do tempo de *setup* ou *makespan* (AHMADOV; HELO, 2018; GHELASE *et al.*, 2013; NESELLO *et al.*, 2018; TANAKA; ARAKI, 2013; KARRAY; BORNE; BENREJEB, 2015).

Karay *et al.* (2015) realizaram seu estudo a partir da comparação entre a combinação de dois métodos e seus resultados separadamente, o algoritmo híbrido SA / GA obteve um resultado com redução de *setup* em 21% em relação ao método comparado. Ahmadov e Helo (2018), Ghelase *et al.* (2013) e Tanaka e Araki (2013) realizaram a contabilização dos ganhos de economia de tempo de *setups* que

alcançaram em comparação aos demais métodos, em que o melhor resultado obtido foi uma redução de 10,4%. Dos estudos que obtiveram aumento de qualidade no sequenciamento Kir e Yazgan (2016), Wu, Hsu e Lai (2011) e Yusriski *et al.* (2015) foram obtidos comparando os resultados com outros métodos medindo a qualidade através de verificação com usuários.

2.2.3 Discussão dos resultados

As pesquisas em sequenciamento de produção em ambientes *make to order*, direcionadas a resolução de problemas industriais, se concentraram no continente asiático, norte-americano e europeu, com destaque para a China (19,44%) e EUA (11,11%). Enquanto avaliando os métodos utilizados nas publicações obteve-se um total de 26 métodos encontrados em 36 estudos que ilustram essa grande variedade de soluções.

Após a utilização dos filtros no protocolo da revisão sistemática, obteve-se a taxa de aplicação da solução de 47,22% nos métodos exatos e 36,11% nos métodos heurísticos. No entanto, após a análise dos artigos, notou-se que em alguns casos foram utilizados mais de um método, e combinações desses tipos foram utilizadas em 20 publicações, seis (exato-heurístico), sete (exato-exato), e sete (heurístico-heurístico), mostrando tendência ao uso de métodos combinados.

Dos artigos selecionados, 75% não expõem o contexto em que a pesquisa foi aplicada, e os 25% restantes envolvem diferentes tipos de indústrias, portanto, não há evidências que sugiram uma relação entre a análise de sequenciamento nos ambientes *make to order* e os demais tipos de indústrias.

Embora 47,22% dos estudos não tenham abordado o uso de ferramentas de computação na sua direção, os estudos propõem apenas modelos matemáticos para aplicação na indústria geral. Portanto, verifica-se que existe uma lacuna no uso de inteligência computacional, linguagem de programação e ferramentas que auxiliem na resolução no sequenciamento da produção.

Verificou-se que 56,7% das publicações foram feitas sobre problemas específicos, com características e especificidades à aplicação. Para a solução dessas situações, 47,05% utilizaram o método polinomial exato, 47,05% utilizaram métodos heurísticos e 5,9% utilizaram a combinação das duas classes de métodos. Após a leitura dos artigos, nenhuma relação significativa foi identificada neste contexto.

A validação dos métodos utilizados nos estudos foi aplicada apenas em 58,33% dos estudos, mostrando baixa adesão dos estudos para realizar a validação. As limitações que os estudos abordaram também quanto à validação ainda são pequenas, com 58,33% dos estudos não abordaram limitações, pois o objetivo dos estudos é comprovar um modelo ou modificações de modelos matemáticos existentes, e não focar em aplicações em ambientes reais onde existem limitações importantes para o andamento da pesquisa.

Após análise das publicações, constatou-se que 61,11% dessas tiveram benefícios em seus estudos, que foram reduções do tempo de setup, reduções do tempo computacional e otimização do processo de sequenciamento. Porém, o que predomina é a redução do tempo computacional, que representa 37% destes.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Metodologia

Esse presente trabalho tem por característica uma abordagem quantitativa, que a partir de uma coleta de dados uma formulação de uma modelagem matemática adequada, será possível a elaboração de uma ferramenta que auxilie o sequenciamento de produção em acordo com as variáveis existentes no conjunto de dados desse estudo.

Foi utilizado o ciclo de desenvolvimento para design de interação proposto por Preece, Sharp e Rogers (2002) adaptado com o modelo de pesquisa operacional exemplificado por Arenales *et al.* (2007) conforme Figura 12. A RSL foi realizada com o intuito de fazer o levantamento de metodologias e aplicações que possam ser utilizadas como base no desenvolvimento deste trabalho. Na etapa de formulação (modelagem) definem-se das variáveis e as relações matemáticas para descrever o comportamento relevante do sistema ou problema real. Na dedução (análise) aplicam-se técnicas matemáticas e aplicações para resolver o modelo matemático e visualizar quais conclusões ele sugere. A avaliação (julgamento) das conclusões, verifica-se a interpretação dos resultados se são adequadas ou não para o problema real e se necessário realizar novamente o ciclo com novas entradas. Encerrando-se o ciclo, a solução do modelo apoia o processo de tomada de decisão, mas em geral outros fatores pouco tangíveis, não qualificáveis, devem ser considerados para a decisão final. Em seguida, aplica-se uma avaliação em campo buscando informações e por fim comparam-se os resultados de outros métodos (ARENALES *et al.*, 2007).

Figura 12 - Ciclo de desenvolvimento de aplicação.

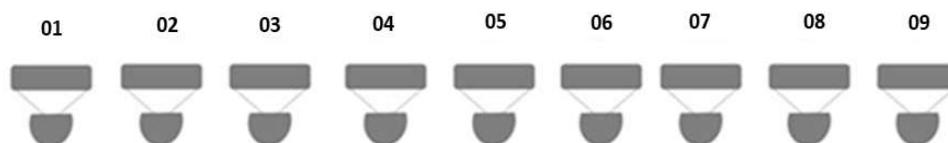


Fonte: adaptado de: Preece *et al.* (2002) e Arenales *et al.* (2007).

Este trabalho foi aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade Federal de São Paulo sob o número 41807420.0.0000.5505.

3.2 Conjunto de Dados

O estudo de caso possui 9 moegas individuais, conforme Figura 13, para realizar a dosagem de produtos se inicia o processo de produção, portanto, o lote de produção deve ser sequenciado de forma a obter o menor número de *setups* partindo do início da produção. Os *setups* são considerados a partir da substituição de uma matéria-prima existente na moega, cada substituição refere-se a um *setup* da linha de produção.

Figura 13 - Modelo de distribuição de moegas.

Fonte: O autor (2021).

A gama existente é de 200 formulações onde essas variam entre combinações de 1 a 6 matérias-primas para gerar a formulação final, sendo que existem 20 matérias-primas distintas. Na Tabela 4 há três exemplos de produtos finais (códigos 1, 2 e 3) e suas composições, nesse exemplo os códigos 1 e 3 são produtos com uma única matéria-prima e código 2 um produto com duas matérias-primas em sua composição com proporção de 0,44 ton (D) e 0,56 ton (C).

Tabela 4 - Dados e especificações de produtos finais (ton)

Produto Final	Código Matéria Prima	Quantidade
1	C	1,00
2	D	0,44
2	C	0,56
3	D	1,00

Fonte: O autor (2021).

O trabalho consistiu em fornecer um sequenciamento de produção de misturas de fertilizantes minerais, em que os lotes devem ser sequenciados antes do início da produção. Com base nos dados disponíveis nos sistemas da empresa, foi determinado um sistema gerenciador de banco de dados relacional e o sistema escolhido o SQL Server 2019 Express devido a ser uma edição gratuita do SQL Server dedicada para desenvolvedores. Com isso, os dados foram trabalhados em tabelas dinâmicas e linguagem de programação MySQL (MYSQL, 2020).

As informações referentes às receitas das formulações existentes serão importadas e tratadas no gerenciador de banco de dados, juntamente com os *inputs* necessários para elaboração do sequenciamento. Como definição dos *inputs* de entrada para o cadastro na ferramenta foram definidos em:

- Base de fórmulas existentes.
- Produtos existentes nas 9 moegas.

Ordem de produção:

- Número da Ordem
- Código do produto
- Nome motorista
- Placa
- Quantidade

3.3 Métodos e Modelos para sequenciamento

Nesse tópico será apresentado o detalhamento do método heurístico proposto e das técnicas encontradas na literatura bem como o desenvolvimento da ferramenta proposta para o sequenciamento de produção de uma empresa no setor de fertilizantes.

3.3.1 Método Heurístico proposto

A fim de verificar as interações necessárias para realizar o sequenciamento, foi verificado em campo os detalhes entre produtos (quantidade e tipos de matérias-primas) e o lote a ser produzido. Com isso, verificou-se que os produtos existentes nas 9 moegas são de fundamental importância para realizar o início do sequenciamento do lote, pois elas determinam como deve-se iniciar o lote, e assim minimizar trocas de produtos desnecessários.

Outro fator relevante é iniciar os lotes de produção com produtos que não necessitam de mais de uma matéria-prima (produtos puros), devido à minimização de riscos de contaminação cruzada de produtos, reduzindo a hipótese de obter produtos fora de especificação.

Como o *setup* é considerado quando é necessária uma troca de produtos nas moegas, e aumenta em média 3 minutos a cada troca. Assim produtos com matérias-primas similares reduzem as trocas de moegas e conseqüentemente a quantidade de *setup* dentro do lote de produção. Portanto, a transição da produção de produtos puros para os produtos com mais de uma matéria-prima é de fundamental importância para

a redução dos *setups*, priorizando os produtos que não serão utilizados posteriormente para o início do lote de produção, reduzindo trocas de produtos desnecessárias nas moegas no meio do lote de produção.

Dadas as informações mencionadas foram estabelecidos três passos para o algoritmo heurístico de forma a otimizar o sequenciamento do lote, com o objetivo de reduzir a quantidade de *setups*. O pseudocódigo do método proposto pode ser visto no Algoritmo 1.

Algoritmo 1 – Heurística Proposta

Procedimento Heurístico

Entrada Receita, Produtos e Moegas.

Saída Sequenciamento

Para sequência de puros **faça**

Selecionar Produtos puros do lote

Verificar Produtos puros que possuem moegas iguais

Verificar Produtos puros que serão utilizados em misturas

Sequenciar Produtos puros que não serão utilizados em misturas e possuem moegas iguais

Sequenciar Produtos puros priorizando que não serão utilizados em misturas

Sequenciar Produtos puros que serão utilizados em misturas

Fim Para

Para transição de puros para misturas **faça**

Agrupar misturas de acordo com a semelhança de produtos

Verificar Misturas com semelhança ao último Produto puro

Verificar Misturas com semelhança as Moegas

Sequenciar primeira Mistura priorizando as semelhanças anteriores

Fim Para

Enquanto misturas a sequenciar **faça**

Sequenciar Misturas de acordo com a semelhança do último produto sequenciado

Fim Enquanto

Retorna Sequenciamento

Passo 1 – Sequenciamento de puros

Verificar os produtos a serem sequenciados e segregar entre produtos puros (uma matéria-prima) e misturas (produtos com mais de uma matéria prima).

Segregar os produtos puros em três diferentes grupos: (i) produtos puros com moegas iguais (sem estarem contidos em misturas), (ii) produtos puros sem moegas iguais (sem estarem contidas em misturas), (iii) produtos puros com moegas iguais (contidos em misturas).

Primeiramente sequenciar (i) produtos puros que não serão utilizados em misturas posteriormente e possuem moegas com matérias-primas iguais a ele. Em seguida sequenciar (ii) produtos puros que não serão utilizados em misturas e não possuem moegas com matérias-primas iguais a ele. Por fim, deve-se sequenciar (iii) produtos puros com moegas iguais e serão utilizados em misturas.

Em caso de empate, priorizar o sequenciamento pelos puros que serão utilizados posteriormente em misturas em menor quantidade, mantendo os puros com maior quantidade em misturas no fim do sequenciamento de puros.

Passo 2 – Transição puro / Misturas

Verificar as misturas a serem sequenciadas e organiza conforme sua semelhança de matérias-primas, através da quantidade de produtos iguais.

A transição de puros para misturas se dará priorizando as misturas que possuem o último produto puro e a maior quantidade de matérias-primas disponíveis nas demais moegas.

Em caso de empate os produtos iguais em maior quantidade serão priorizados no sequenciamento e sua posição na lista de sequenciamento.

Passo 3 – Sequenciamento Misturas

O sequenciamento das misturas se dará iniciando com o produto resultado do passo 2, através deste são localizados em toda a listagem os produtos similares e as demais misturas são sequenciadas seguindo o mesmo padrão, observando o último produto e sequenciando os produtos similares a este. Para finalizar o sequenciamento esse padrão é repetido em toda a listagem (lote) disponível.

3.3.2 Método heurístico de Gupta (1988) adaptado

Gupta (1988) realizou um estudo para otimização (redução) do *makespan* em contextos em que os produtos pudessem ser divididos em famílias, com semelhanças entre os produtos, e através de uma matriz de *setup* e tempo de produção realizar a redução dos tempos do total de produção de um lote de produtos conhecido.

Neste trabalho, foi realizada uma adaptação no método heurístico de Gupta (1988) retirando o tempo de produção individual dos produtos como variável, já que

esse é considerado constante nesse estudo, e agrupando as famílias através de *clusters*. O passo a passo e as adaptações são apresentados a seguir.

Passo 1 – Separar os produtos em grupos/famílias e arranjar de forma crescente os tempos de produção.

Para adaptação do primeiro passo foi eliminado a variável de tempo de produção, uma vez que é constante em todos os produtos a serem sequenciados. E para a separação dos produtos em grupos/famílias foi utilizado um método de agrupamento (WARD, 1963). A medida de similaridade utilizada foi o coeficiente de Jaccard (Jaccard, 1901) e método Silhueta, em inglês proposto por Rousseeuw (1987), foi utilizado para determinação do número ótimo de *cluster*.

Para determinação dos *clusters* dados foram transformados em um conjunto binário, onde 1 corresponde que à matéria-prima utilizada na formulação e 0 à matéria-prima não utilizada, conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Exemplos de fórmulas transformadas em binário

Fórmula	Matérias-primas													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
A	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
C	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
D	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: O autor (2021).

Como exemplo, a fórmula A é composta pelas matérias-primas 1, 4 e 5, fórmula B é composta pelas matérias-primas 10 e 14, fórmula C é composta pelas matérias-primas 7 e 13 e a fórmula D é composta pela matéria-prima 6.

Passo 2 – Iniciar o sequenciamento estágio “zero”

A partir da separação os produtos em famílias verifica-se o tempo de *setup* do estágio “zero” (início do processo) para cada produto de cada família e o menor tempo encontrado dará o início do sequenciamento.

Passo 3 – Sequenciar demais produtos

A partir da saída do passo 2 calcula-se o tempo de setup do produto resultante do passo 2 para todos os primeiros produtos de cada família e o menor número encontrado será o próximo do sequenciamento. Assim repete-se o passo 2 considerando o produto resultante do passo 3 como estágio zero para todos os demais produtos do lote.

3.4 Soluções MTSP

A partir da avaliação do tipo de problema encontrado durante o sequenciamento de lotes foi possível uma aproximação da caracterização conforme os problemas de Minimização de Trocas de Ferramentas (MTSP – *Minimization of Tool Switching Problem*), que consiste em determinar um sequenciamento de tarefas, em que cada tarefa necessita de um conjunto de ferramentas, de tal modo que a quantidade total de trocas de ferramentas, entre tarefas, seja minimizada. Para esse tipo de problema métodos meta-heurísticos e exatos são aplicados para encontrar soluções ótimas, minimizando a quantidade trocas de ferramentas em uma sequência (Da Silva, 2020).

Os métodos selecionados para adaptação ao problema foram A-BRKGA e fluxo *multicommodity*, o primeiro sendo uma meta-heurística e o segundo um modelo matemático que indicará qual a solução ótima para o sequenciamento. Para o problema desse estudo foi adaptado o conceito de trocas de ferramentas por troca de produtos das moegas, caracterizado como *setup*, sendo que a função objetiva a minimização de trocas de produtos. Para ambos os casos a função principal é a minimização das trocas de produtos, sendo a população o lote a ser sequenciado e as demais variáveis de acordo com cada formulação matemática.

3.4.1 Meta-heurística A-BRKGA adaptado

O Biased Random-Keys Genetic Algorithm (BRKGA), proposto por Gonçalves e Resende (2011), é uma meta-heurística composta de componentes independentes e dependentes do problema que forma um híbrido entre um procedimento de busca

local com um algoritmo genético baseado em chaves aleatórias. O BRKGA é usado para evoluir a ordem em que os padrões são inseridos em uma solução parcial.

Chaves *et al.* (2018) desenvolveram uma meta-heurística com controle de parâmetro on-line que requer menos esforço de configuração para ajustar o método, chamado Adaptive Biased Random-Key Genetic Algorithm (A-BRKGA). O método foi testado em experimentos computacionais que consideraram 25 instâncias disponíveis na literatura e 43 instâncias adaptadas e em comparação com BRKGA e foram capazes de encontrar soluções mais conhecidas em 15 e 12 instâncias respectivamente. E também como vantagem de possuir uma abordagem simples de implementar, uma vez que o processo evolutivo é reutilizado e os usuários não necessitam ajustar os parâmetros.

Chaves *et al.* (2018) utiliza parâmetros do BRKGA (ρ , ρ_e , ρ_m e max_{gen}) e foram introduzidos dois novos parâmetros adaptativos (α e β). Os parâmetros ρ_e e β são auto adaptativos e os demais parâmetros são atualizados com regras determinísticas.

Algoritmo 2 - A-BRKGA (Chaves *et al.*, 2018)

procedimento A-BRKGAn, γ

```

Inicializar os valores dos parâmetros p e maxgen
Gerar população Pop com p vetores de n + 2 chaves aleatórias
Enquanto maxgen não está satisfeito faça
  Avalie a adequação de cada nova solução no Pop
  Parâmetros de atualização (p,  $\rho_e$ ,  $\rho_m$ ,  $\alpha$ )
  Particionar Pop em dois conjuntos RCL e não RCL
  Inicializar a população da próxima geração Pop+ = RCL
  Perturbar Soluções semelhantes em Pop+ com intensidade  $\beta$ 
  Gerar mutantes Popm para a próxima geração

```

Pop+ = Pop+ U Popm

Para i = 1 para p - |RCL| - |Popm| **Faça**

```

  Selecione um pai a aleatoriamente em RCL
  Selecione um pai b aleatoriamente de não RCL
  Defina  $\rho_e$  com chave aleatória b [n + 1]

```

para j = 1 a n + 2 **faça**

Jogue uma moeda tendenciosa com probabilidade ρ_e de cara

se caras **então**

c [j] = a [j]

Senão

c [j] = b [j]

Pop+ = Pop+ U {c}

Atualizar População $Pop = Pop +$

Retornar $\text{argmin} \{f(x) \mid x \in Pop\}$

Chaves *et al.* (2018) definiram apenas três valores para o parâmetro $\gamma \in \{0,999, 0,998, 0,997\}$ e respectivamente $\text{max}_{gen} \in \{271, 740, 2017\}$ que são escolhidos pelos usuários de acordo com o tempo de execução disponível, aumentando o tempo de acordo com o aumento de máximo número de gerações.

$$f_e = f_{min} + \alpha(f_{max} - f_{min}) \quad (3.1)$$

Os parâmetros são descritos abaixo:

p : tamanho da população, onde $p \approx [100, 1000]$.

RCL: lista restrita de cromossomos, onde os melhores indivíduos são mantidos.

g_k : geração atual (numérico valor).

max_{gen} : máximo número de gerações, onde $\text{max}_{gen} \in \{271, 740, 2017\}$.

p_e : tamanho da partição de elite da população $p_e = \max \{3, k_e * p\}$, onde $k_e \in [0.10, 0.25]$.

$$k_e = 0.10 + \frac{g_k}{\text{max}_{gen}} * (0.25 - 0.10) \quad (3.2)$$

p_m : tamanho da partição mutante da população $p_m = \max \{1, k_m * p\}$, onde $k_m \in [0.05, 0.20]$.

$$k_m = 0.05 + (1 - \frac{g_k}{\text{max}_{gen}}) * (0.20 - 0.05) \quad (3.3)$$

p_e : probabilidade de herdar a chave de um parente de elite, onde $0.65 \leq p_e \leq 0.80$.

α : define o número de indivíduos da elite induzindo o tamanho RCL.

$$\alpha = 0.10 + (1 - \frac{g_k}{\text{max}_{gen}}) * (0.30 - 0.10) \quad (3.4)$$

β : define a força de perturbação (probabilidade de troca de dois valores de chaves aleatórias).

$$\beta = 0.01 + x_{n+2} * (0.10 - 0.001) \quad (3.5)$$

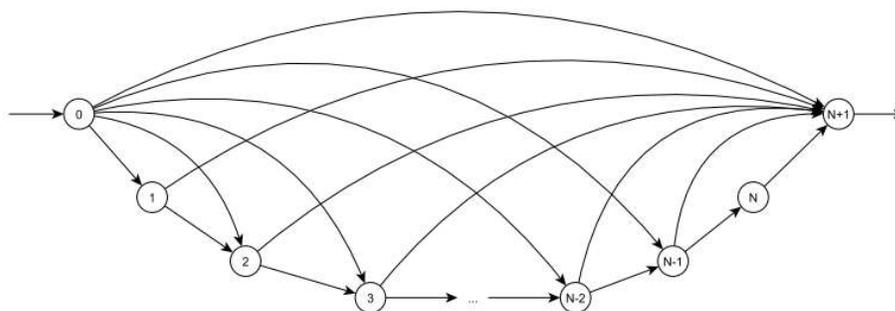
Neste trabalho, uma adaptação para a entrada dos dados do A-BRKGA foi realizada considerando as moegas como entrada fixa do primeiro produto a ser sequenciado e seguido dos todos os produtos a serem sequenciados, organizados semelhantes ao realizado no final do passo 2 do sequenciamento heurístico na secção 3.2.1.

3.4.2 Modelo matemático em fluxo *multicommodity*

Da Silva (2020) propôs uma nova formulação de programação linear inteira mista (MILP) para o Problema de Minimização de Trocas de Ferramentas (PMTF ou MTSP) um modelo de fluxo *multicommodity* e pode ser utilizada para efeito comparativo por se tratar de um modelo matemático exato, sendo assim base para validação da aplicação heurística proposta por esse estudo.

Para isto, Da Silva (2020) considera que “há N cópias de cada uma das ferramentas no nó 0 e que as ferramentas que deixam a máquina correspondem ao fluxo das commodities nos arcos $(i, N + 1)$, $i \in J \setminus \{N\}$, sem especificar se voltam ou não à máquina. Toda vez que uma ferramenta sai da máquina, mas é necessária para produzir alguma tarefa posteriormente, uma cópia desta ferramenta entra novamente na máquina para processar esta tarefa. As trocas são contabilizadas pelo fluxo nos arcos $(i, N + 1)$, $i \in J \setminus \{N\}$, uma vez que se houver fluxo de uma ferramenta t_1 em um arco $(i, N + 1)$, então haverá fluxo de uma ferramenta t_2 no arco $(0, i)$.” O grafo resultante é apresentado na Figura 14 e sua formulação é dada pelas expressões (3.6)-(3.21).

Figura 14 - Grafo do Modelo Matemático.



Fonte: Da Silva (2020).

$$\text{Min } Z = \sum_{t=1}^M \sum_{i=1}^{N-1} y_i(N+1)t \quad (3.6)$$

$$\sum_{k=1}^N x_{ik} = 1, \quad i \in J, \quad (3.7)$$

$$\sum_{i=1}^N x_{ik} = 1, \quad k \in J, \quad (3.8)$$

$$\sum_{i=1}^{N-1} y_{0it} + y_{0(N+1)t} = N, \quad t \in T, \quad (3.9)$$

$$y_{01t} - y_{1(N+1)t} - y_{12t} = 0, \quad t \in T, \quad (3.10)$$

$$y_{(i-1)it} + y_{01t} - y_{i(i+1)t} - y_{i(N+1)t} = 0, \quad t \in T, i = 2, \dots, N-1, \quad (3.11)$$

$$y_{(N-1)Nt} - y_{N(N+1)t} = 0, \quad t \in T, \quad (3.12)$$

$$\sum_{i=0}^N y_{i(N+1)t} = N, \quad t \in T, \quad (3.13)$$

$$x_{ik} \leq y_{(k-1)kt}, \quad i \in J, k \in J, t \in T_i, \quad (3.14)$$

$$\sum_{t=1}^M y_{(k-1)kt} = C, \quad k = 2, \dots, N, \quad (3.15)$$

$$\sum_{t=1}^M y_{01t} \leq 2C, \quad (3.16)$$

$$x_{ik} \in \{0,1\}, \quad i = 1, k = 1, \dots, N, \quad (3.17)$$

$$x_{(i-1)it} \in \{0,1\}, \quad i = 1, \dots, N+1, t \in T, \quad (3.18)$$

$$y_{i(N+1)t} \in \{0,1\}, \quad i \in J \setminus \{N\}, t \in T, \quad (3.19)$$

$$y_{0it} \in \{0,1\}, \quad i \in J \setminus \{N\}, \quad (3.20)$$

$$y_{0(N+1)t} \in \{1, \dots, N-1\}, \quad t \in T, \quad (3.21)$$

O modelo utilizado foi implementado na sintaxe do AMPL (linguagem de modelagem algébrica) e a mesma adaptação descrita na secção 3.2.4 foi necessária para execução dos testes.

3.4.3 Comparação entre Métodos

Para efeito de comparação, entre os métodos descritos neste estudo, foram realizadas 192 simulações (1 ano) de lotes produzidos, contabilizando a quantidade de trocas de matérias-primas de moegas (*setups*), para cada método. A partir dos resultados obtidos foi calculada a variável o ganho de *setup* em cada lote conforme equação 3.22, sendo a quantidade de *setups* obtidos no sequenciamento manual (executado no dia em o lote foi produzido) subtraído da quantidade de *setups* obtidos aplicando cada método.

$$\text{Ganho} = \text{Qtd. Setup Seq. Manual} - \text{Qtd. Setup Método} \quad (3.22)$$

Especificamente para a meta-heurística foram realizadas 10 simulações variando a semente do computador e contabilizado a média desses resultados para serem comparados com o sequenciamento manual. O Quadro 32 indica a especificações das máquinas, linguagem e software em que foram realizados os testes para cada método. Especificamente para o modelo matemático foi predefinido o tempo limite para encontrar a solução ótima em no máximo 3600 segundos.

Quadro 2 - Especificações máquinas para testes

Método	Linguagem	Software	Especificação Máquina
Heurístico/ Gupta	MySQL	SSMS	AMD Ryzen 2400 3.6 GHz e 16 GB de RAM
A-BRKGA	C	-	Intel Core i7 3.4 GHz e 16 GB de RAM
M. Matemático	AMPL	CPLEX	Intel Core i7 3.6 GHz e 16 GB de RAM

Fonte: O autor (2021).

Para verificar se há diferença do ganho de setups entre os diferentes métodos foi utilizado o teste de Kruskal-Wallis e *post-hoc* de Dunn (DUNN, 1964). Devido ao número de comparações foi utilizada a correção de Bonferroni. Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o software estatístico R, versão 3.4.1 (INDEX;

DEVELOPMENT; TEAM, 2008). O nível de significância utilizado em todas as análises foi de 5%.

3.4.4 Desenvolvimento da ferramenta de sequenciamento

Considerando o método heurístico proposto nesse trabalho (seção 3.2.1) foi desenvolvido a primeira versão da ferramenta de sequenciamento. A linguagem de programação utilizada para o desenvolvimento da ferramenta foi MySQL (MYSQL, 2020) e Java (JAVA, 2021) como *front-end* da ferramenta.

Com a necessidade de melhor interação entre o usuário e os dados, foi definido um ambiente para interação e da mesma maneira que anteriormente optou-se por uma plataforma gratuita para realização, assim o NetBeans IDE foi escolhido por ser um ambiente de desenvolvimento integrado gratuito e de código aberto para desenvolvedores de software nas linguagens Java (JAVA, 2021), e plataforma Apache NetBeans para configurações das telas de sequenciamento (APACHE NETBEANS, 2021), com isso o usuário possuirá acesso à inserção e consulta de informações que o mesmo alimentará para realização do sequenciamento.

A ferramenta proposta foi avaliada por meio do feedback dos profissionais do setor de planejamento e controle de produção (assistentes, analistas e supervisores) que realizaram alguns testes. Foram escolhidos seis colaboradores da empresa de fertilizantes minerais cujos cargos eram: supervisor de PCP/Expedição, supervisor de produção, assistente de planejamento, líder de operações e analista de planejamento. O feedback foi realizado por meio de 3 questionários, elaborados de acordo com a escala de Likert (1932): de avaliação da usabilidade (Apêndice A), da satisfação (Apêndice B) e de utilidade (Apêndice C) da ferramenta desenvolvida. Os questionários foram enviados junto ao termo de consentimento livre e esclarecido (TCLE), via e-mail aos usuários escolhidos.

Todos os usuários utilizaram a ferramenta para cadastro de moegas, ordens de produção e testaram igualmente em duas situações com 15 e 30 produtos nos lotes, com tempo máximo de 20 minutos. Após a realização do sequenciamento, os questionários foram respondidos e posteriormente os resultados compilados de acordo com a característica de cada pergunta (positiva ou negativa), avaliando assim a somatória das respostas, conforme escala de Likert (1932).

CAPÍTULO 4

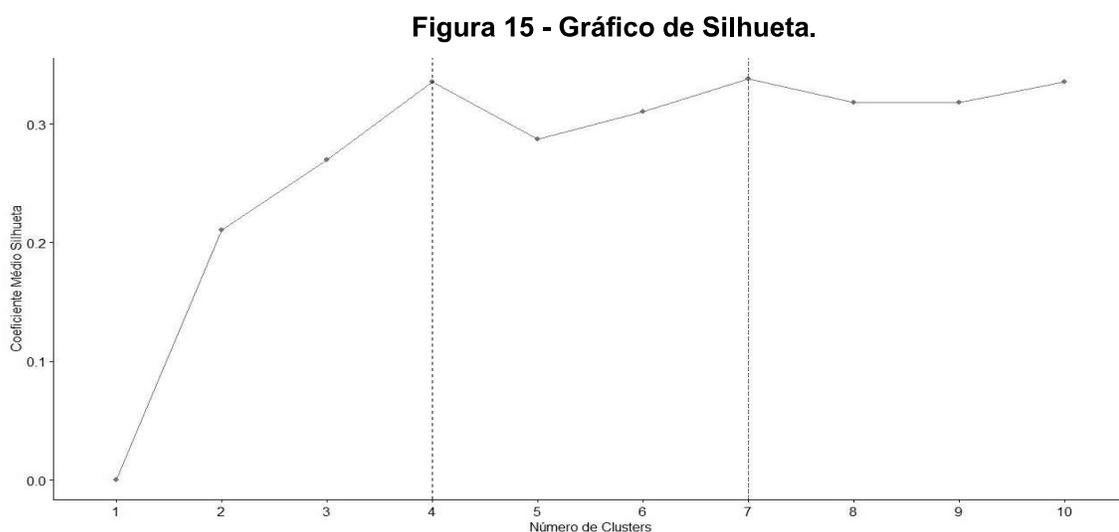
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa seção são apresentados os resultados obtidos na implementação dos modelos adaptado de Gupta, heurístico proposto, A-BRKGA e fluxo *multicommodity*, a comparação entre os modelos e os resultados da avaliação da ferramenta.

4.1 Determinação do número de clusters para o modelo de Gupta

A partir das medidas obtidas na matriz de similaridade dos dados de produtos, foi realizado o cálculo ideal de divisão de *clusters* utilizando o método de Silhueta. Em que o coeficiente de silhueta é a distância média entre os clusters formados, portanto, quanto maior a média dessa distância entre os *clusters* mais homogêneos esses serão.

Pela Figura 15 foi possível verificar que, a partir do número de *clusters* 4 e 7, não há aumento considerável da média do coeficiente, portanto, os dois valores podem ser considerados como número ideal de divisão de *clusters*.

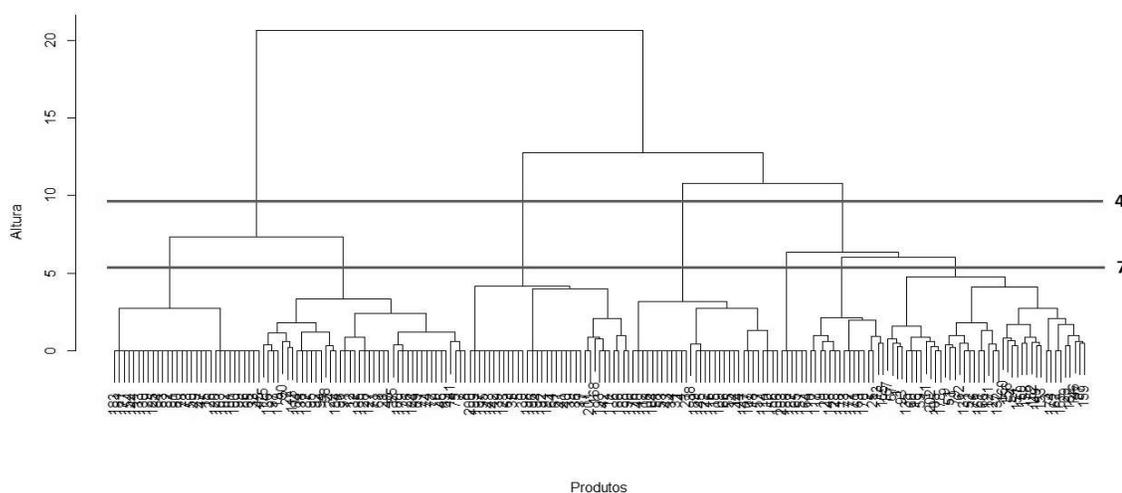


Fonte: O autor (2021).

Definido o número ideal de *clusters*, para o próximo passo foi utilizado o método Ward onde é realizado a medida de distância entre dois *clusters* considerando a soma das distâncias ao quadrado entre os dois *clusters* (Altura).

É possível realizar uma visualização hierárquica no dendrograma na Figura 16 e seu corte exemplificado com as linhas horizontais vermelhas (4 *clusters* e 7 *clusters*). A divisão de *clusters* resultante na Tabela 6 e Tabela 7 que apresenta a frequência de formulações em cada *cluster*.

Figura 16 - Dendrograma - Método Ward.



Fonte: O autor (2021).

Tabela 6 - Divisão de formulações em 4 Clusters

Clusters	Quantidade fórmulas
1	64
2	31
3	34
4	74

Fonte: O autor (2021).

Tabela 7 - Divisão de formulações em 7 Clusters

Clusters	Quantidade fórmulas
1	42
2	16
3	31
4	34
5	43
6	31
7	6

Fonte: O autor (2021).

Para divisão em 4 *clusters* na Tabela 6 é possível verificar a divisão com maior incidência no *cluster* 1 de produtos com matérias-primas 1, 3, 4, 5, 7, 10, 11, 12 e 14 e incluem todos as matérias-primas puras, no *cluster* 2 produtos somente com matérias-primas 1, 2, 6 e 8, no *cluster* 3 produtos com somente com matérias-primas 1, 8 e 9 e no *cluster* 4 produtos com matérias-primas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 e 13.

Para divisão em 7 *clusters* na Tabela 7 é possível verificar a divisão com maior incidência no *cluster* 1 produtos com matérias-primas 1, 3, 4, 5, 6 e 12, no *cluster* 2 produtos somente com matérias-primas 1, 6 e 14, no *cluster* 3 produtos com somente com matérias-primas 1, 2, 6 e 8, no *cluster* 4 produtos com somente com matérias-primas 1, 6 e 9, no *cluster* 5 produtos com matérias-primas 1, 3, 4, 6 e 13, o *cluster* 6 produtos com matérias-primas 1, 3, 5, 6 e 13 e por fim no *cluster* 7 produtos somente com a matérias-primas 11. Uma particularidade encontrada é que no caso da divisão de 7 *clusters* as matérias-primas puras não estão concentradas em único *cluster*.

4.2 Resultado Comparativo entre Métodos

Foram realizadas simulações de sequenciamento de 192 lotes de produção, correspondentes a 1 ano, e contabilizado o número de *setup* realizado em cada método. Assim foi possível realizar a comparação entre o sequenciamento real, o método heurístico, Gupta adaptado com 4 e 7 *clusters*, meta-heurístico (A-BRKGGA) e modelo matemático (fluxo *multicommodity*). Os resultados são detalhados no Apêndice D Tabela A, sendo N a quantidade de produtos sequenciados no lote, *Manual* a quantidade de setups do sequenciamento manual, e as demais colunas correspondentes ao ganho/perda de *setups* em relação ao sequenciamento manual e T (modelo/método) o tempo de execução do algoritmo. Os resultados observados encontram-se na Tabela 8.

Todos os lotes foram executados pelos algoritmos e encontraram soluções, com exceção do modelo matemático no lote 83, este não encontrou solução ótima em até 3600 segundos de execução do algoritmo, limite este predefinido como tempo máximo.

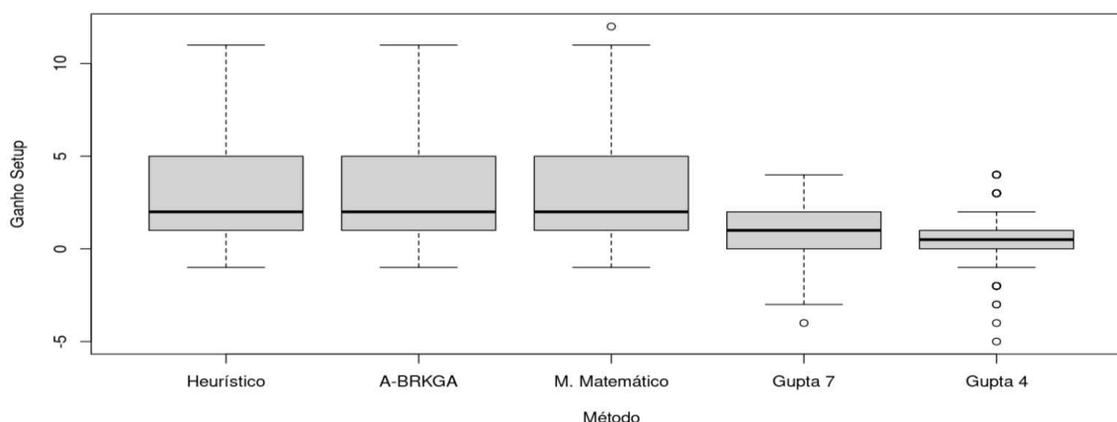
Na Tabela 8 é possível observar que os resultados obtidos pelo método heurístico proposto, meta-heurístico e matemático são semelhantes. Os resultados

obtidos pelos métodos adaptados de Gupta foram inferiores aos ganhos obtidos pelo modelo heurístico proposto por esse estudo e os demais métodos comparativos.

Os tempos de processamento dos algoritmos em média obtiveram T-Heurístico – 5 segundos, T-ABRKGA – 1,36 segundos e T-M. matemático - 17,37 segundos, sendo valores considerados aceitáveis para a execução prática de sequenciamento de produção, mesmo sendo executados em softwares e computadores com especificações diferentes.

A Figura 17 apresenta a distribuição dos ganhos de *setups* dos métodos, em que é possível observar a mesma mediana para os métodos heurístico, A-BRKGA e M. Matemático. Nota-se que o método heurístico, A-BRKGA e M. Matemático parecem apresentar ganhos similares entre si, porém, diferentes dos de Gupta. Contudo, Gupta 7 e Gupta 4 parecem ser semelhantes entre si.

Figura 17 - Boxplot de ganhos de *setups* dos métodos.



Fonte: O autor (2021).

Tabela 8 - Medidas resumo do Ganho de *setup* por método em 12 meses

Método	Ganho Total Setup	Média	Mediana	IIQ (q1 ; q3)
Heurístico	612	3,18	2,00	(1 ; 5)
A-BRKGA	616	3,21	2,00	(1 ; 5)
Modelo Matemático	618	3,09	2,00	(1 ; 5)
Gupta 7 Clusters	132	0,69	1,00	(0 ; 2)
Gupta 4 Clusters	111	0,58	0,50	(0 ; 1)

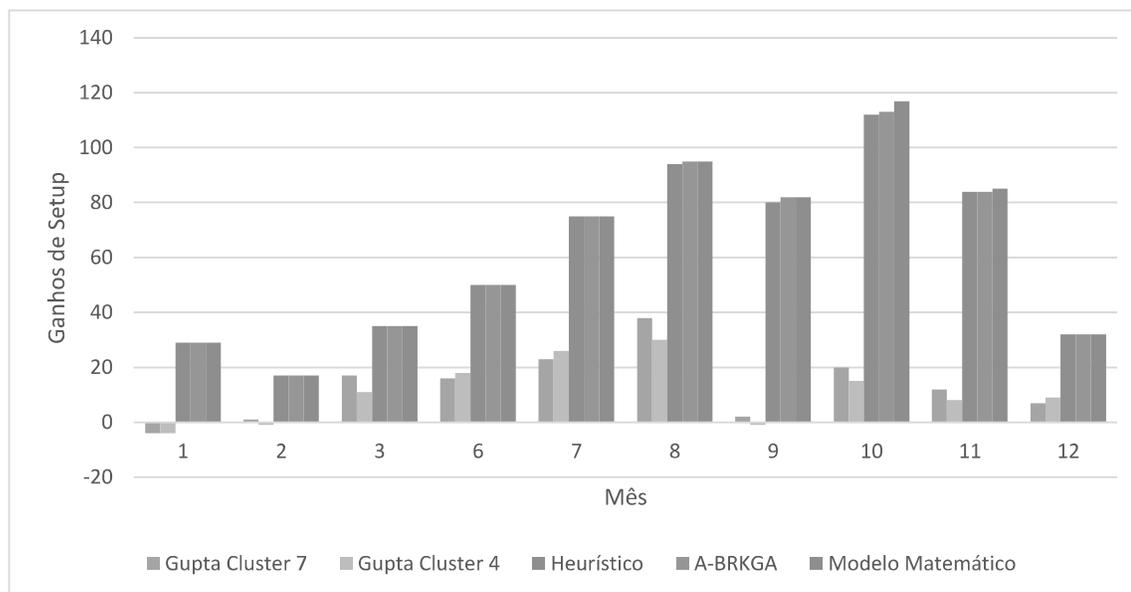
Nota: IIQ – Intervalo interquartil

q1 – Primeiro quartil e q3 – Terceiro quartil

Fonte: O autor (2021).

Na Figura 18 é possível verificar a distribuição dos ganhos por mês e por método, sendo o ganho a diferença entre a quantidade de *setup* do sequenciamento manual e dos métodos aqui utilizados. Não foi possível computar os ganhos dos meses 4 e 5 devido à baixa demanda.

Figura 18 - Distribuição de ganhos de *setup* por mês e método.



Fonte: O autor (2021).

Analisando a Figura 18 observamos que o método heurístico, modelo matemático e A-BRKGA apresentam resultados melhores em todos os meses em relação divisão de cluster do método adaptado de Gupta.

Através da aplicação do teste de Kruskal-Wallis verificou-se que existe diferença entre os métodos (p -valor $< 0,001$). Na Tabela 9 apresentam-se os resultados das comparações múltiplas entre os métodos, pelo teste de post-hoc de Dunn.

Tabela 9 - Comparação múltipla para diferentes métodos pelo teste de *post-hoc* de Dunn

Métodos comparados	P-valor
Heurístico vs. 7 Cluster	< 0,001
Heurístico vs. 4 Cluster	< 0,001
Heurístico vs. Modelo Matemático	0,967
Heurístico vs. A-BRKGA	0,907
Modelo Matemático vs. A-BRKGA	0,875
7 Cluster vs. 4 Cluster	0,630
7 Cluster vs. A-BRKGA	< 0,001
7 Cluster vs. Modelo Matemático	< 0,001
4 Cluster vs. Modelo Matemático	< 0,001
4 Cluster vs. A-BRKGA	< 0,001

Nota: Utilizado correção de Bonferroni

Fonte: O autor (2021).

A partir dos resultados da Tabela 9 não foi observada diferença estatisticamente significativa entre os ganhos obtidos pelos métodos heurístico, A-BRKGA e modelo matemático (p -valor > 0,05) e o mesmo acontece para os métodos com 4 e 7 clusters entre si, porém esses são estatisticamente diferentes dos demais (p -valor < 0,05).

Na Tabela 10 é mostrada a análise de ganhos financeiros, utilizando os dados de capacidade média de produção de 120 ton/h e valores referentes a margem média da tonelada calculado de R\$962,28/ton por TANAKA (2019) e, assim calculado o ganho em faturamento para cada método considerando a economia de 3 minutos a cada ganho de setup.

Tabela 10 - Ganhos de faturamento por método em 12 meses

Margem Média	Método	Redução de Setup	Ganho em Faturamento
R\$ 5773,68/Setup	Heurístico	612	R\$3.533.492,16
	A-BRKGA	616	R\$3.556.586,88
	Modelo Matemático	618	R\$3.568.134,24
	Gupta 7 Clusters	132	R\$ 762.125,76
	Gupta 4 Clusters	111	R\$ 640.878,48

Fonte: O autor (2021).

Realizando uma análise qualitativa dos sequenciamentos gerados, de modo a checar a distribuição dos produtos dentro de cada lote, é possível verificar que a meta-heurística e o modelo matemático visam otimizar o número de *setup* e não uma organização entre produtos similares. Apesar de os resultados serem considerados iguais estatisticamente, ao nível de significância de 5%, ressalta-se que o método heurístico proposto leva em consideração o fator de não contaminação, pois a etapa de priorização de produtos puros e a maneira como as misturas são sequenciadas faz com que se reduza essa possibilidade, conforme descrito na seção 3.2.1.

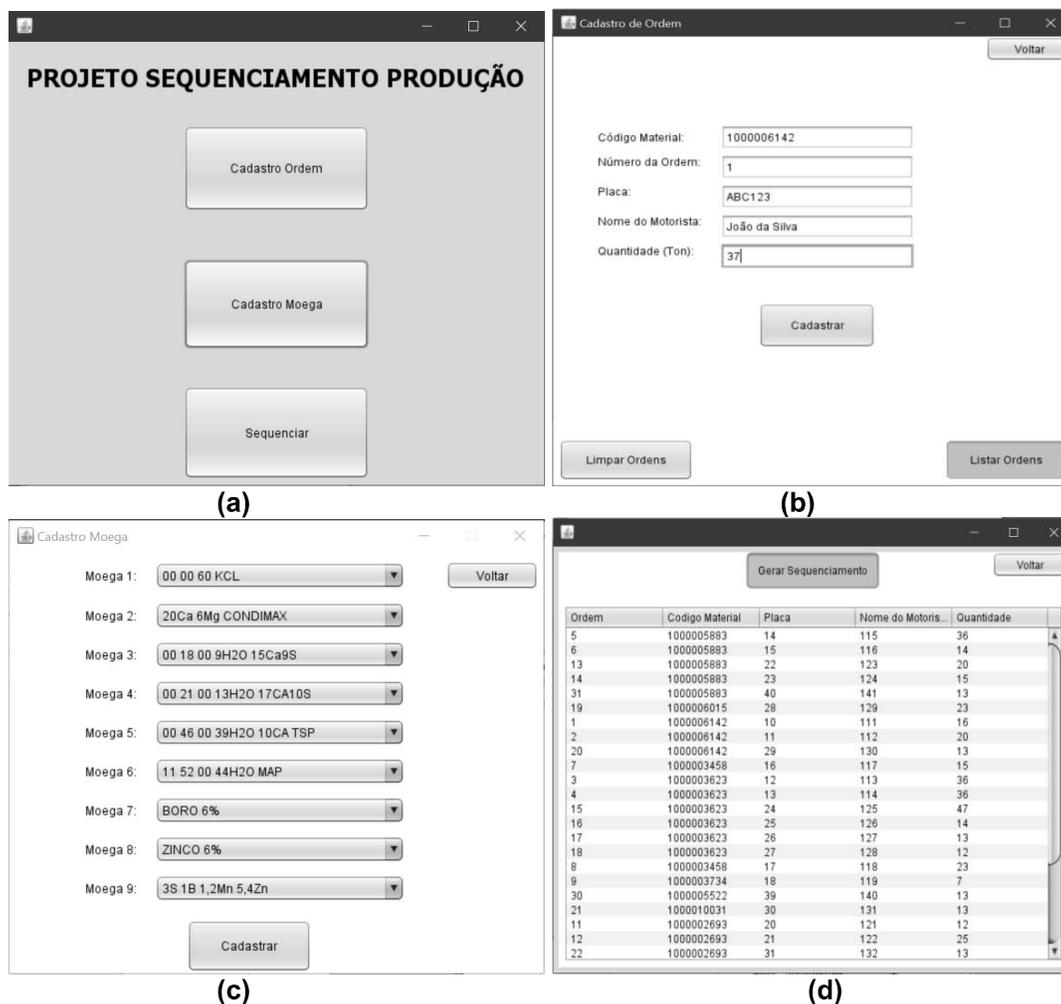
Contaminações podem acarretar processos judiciais e multas contra a empresa, sendo essas penalidades de acordo com o Ministério da Agricultura e Pecuária com a instrução normativa nº 39, de 8 de agosto de 2018 (BRASIL, 2018).

Outro fator importante são os agricultores que podem ser afetados por produtos com especificações diferentes de suas necessidades devido à falta (deficiência) ou excesso (toxidez) de nutrientes, podendo afetar o crescimento e o desenvolvimento das plantas e conseqüentemente reduzindo a produtividade de suas lavouras (LIMA, 2014).

4.3 Ferramenta e Testes

Para melhor interação com os usuários e realização dos testes foi construída uma ferramenta, para o modelo heurístico proposto, que consiste em realizar o cadastro das ordens, cadastro das moegas no início da produção e sequenciar as ordens, conforme Figura 19.

Figura 19 - (a) Tela de acesso, (b) Tela de cadastro de ordem, (c) Tela de cadastro de moegas e (d) Tela de sequenciamento da ferramenta de sequenciamento de produção.



Fonte: O autor (2021).

A tela inicial (a) possui a função de acesso às demais telas, tela (b) de cadastro de ordem tem a funcionalidade de cadastro das ordens de produção conforme seção 3.2.1 Coleta de dados. O código do produto inserido no primeiro campo é o responsável pela busca da receita no banco de dados que é atualizado a cada alteração ou inserção de novos códigos no sistema atual da empresa e os demais campos são para melhor identificação do lote a ser produzido (Número da Ordem, Placa, Nome do Motorista e Quantidade).

A tela (c) de cadastro de moega que possui a funcionalidade de cadastrar as moegas no início da produção de cada lote deve ser alterada no início de cada lote, devido à importância para realização do passo 1 e 2 do método heurístico e tela (d)

de sequenciamento tem a funcionalidade de gerar e exibir o sequenciamento de produção após aplicação do método.

Os usuários foram escolhidos para a realização dos testes. O perfil dos usuários selecionados são apresentados no Quadro 3, sendo os profissionais 1, 3, 5 e 6 membros da área de planejamento e controle de produção que realizam o sequenciamento manual, enquanto que os colaboradores 2 e 4 são profissionais da área de produção responsável por executar o sequenciamento gerado pelos usuários anteriores. Com essa escolha foi possível uma avaliação da ferramenta considerando o envolvimento de profissionais envolvidos de toda a cadeia de planejamento, sequenciamento e produção.

Quadro 3 - Característica dos usuários

Usuário	1	2	3	4	5	6
Cargo	Supervisor de PCP/Expedição	Sup.de Produção	Assistente de Planejamento	Líder Operações	Assistente de Planejamento	Analista de Planejamento
Formação	Administração	Eng. Produção	2 Grau C.	Superior Incompleto	Logística	Eng. Produção
Tempo	11 anos	7 anos	5 anos	7 anos	7 anos	2 anos
Idade	33 anos	38 anos	30 anos	28 anos	38 anos	27 anos

Fonte: O autor (2021).

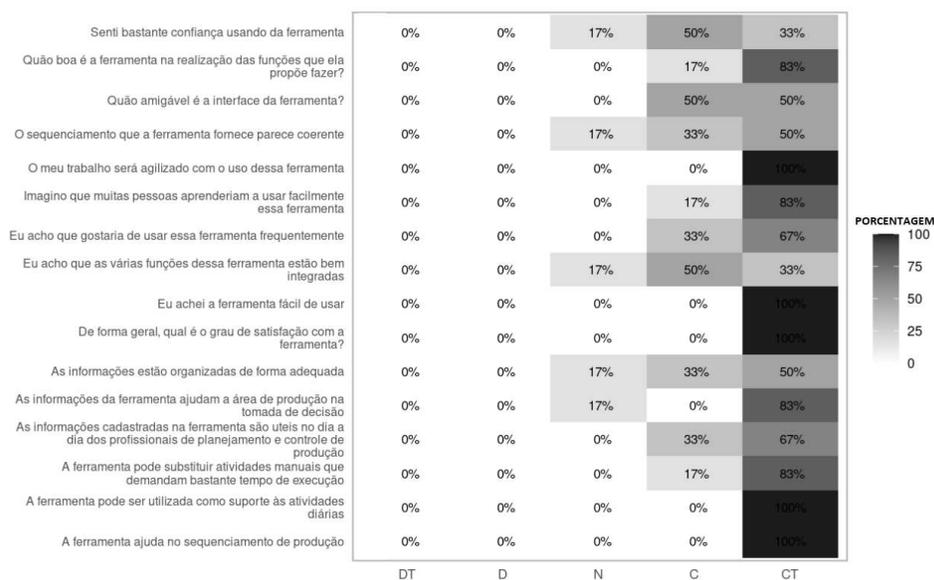
Durante a realização dos testes todos os usuários utilizaram a ferramenta para cadastro de moegas, ordens de produção e testaram igualmente em 2 exemplos com 15 e 30 produtos nos lotes e ao final responderam os 3 questionários. As respostas às perguntas podiam ser dadas conforme classificação (DT – Discordo Totalmente, D - Discordo, N - Neutro, C - Concordo, CT – Concordo Totalmente).

As perguntas foram classificadas em aspectos positivos e negativos, em que perguntas com aspecto positivo respostas mais próximas ao “concordo totalmente” são melhores, exemplo “Eu acho que gostaria de usar essa ferramenta frequentemente” e perguntas com aspecto negativo respostas mais próximas ao “discordo totalmente” são melhores, exemplo “A ferramenta apresenta informações inconsistentes e não confiáveis”. Os resultados dos questionários foram divididos entre perguntas positivas (Figura 20) e negativas (Figura 21).

A média calculada para os questionários de usabilidade (93%), utilidade (96%) e satisfação (95%). Analisando as perguntas com aspectos negativos uma se

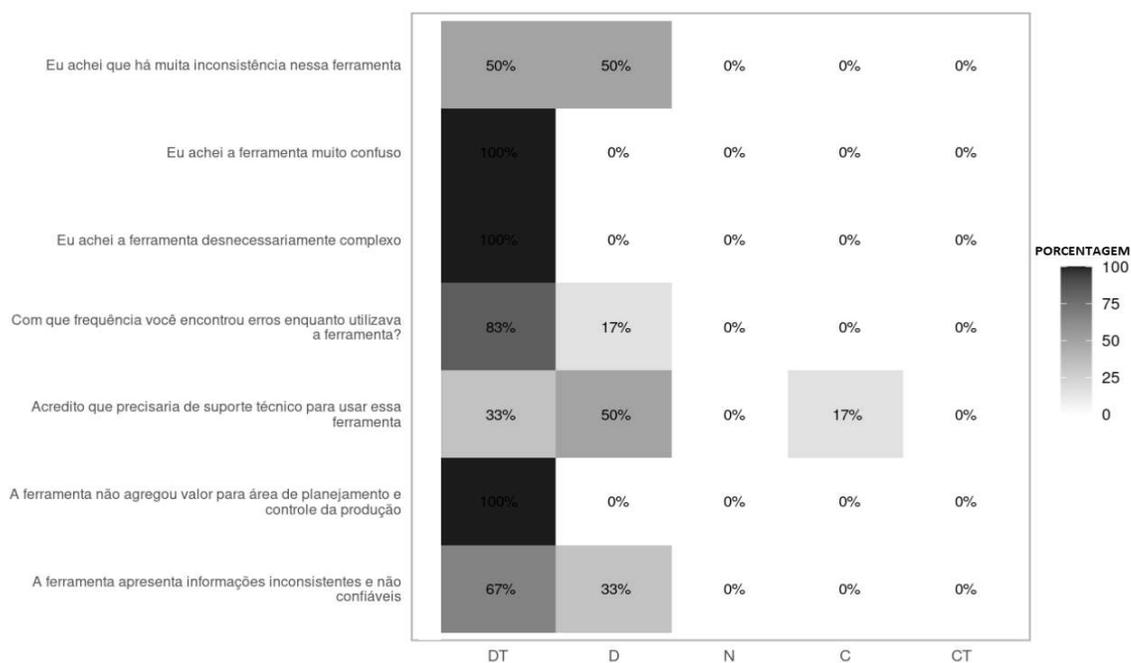
destacou, “Acredito que precisaria de suporte técnico para usar essa ferramenta” no questionário de usabilidade, sendo maior pontuada entre os participantes.

Figura 20 - Resultado de perguntas positivas questionários de usabilidade, utilidade e satisfação.



Fonte: O autor (2021).

Figura 21 - Resultado de perguntas negativas questionários de usabilidade, utilidade e satisfação.



Fonte: O autor (2021).

Durante as simulações possíveis, limitações da ferramenta não foram constatadas, principalmente quanto ao tempo de processamento, visto que os testes obtiveram média de 5 segundos para gerar o sequenciamento.

4.4 Lista de Publicações

A fim de responder a primeira e segunda questão de pesquisa, foi realizado uma revisão sistemática da literatura, com *status* em revisão para a revista *Computer & Industrial Engineering* (classificação qualis interdisciplinar A2). Além disso, outro artigo completo, contendo alguns resultados parciais desta pesquisa, foi submetido para o *IV Simpósio de Engenharia, Gestão e Inovação*, na área temática de processos industriais em planejamento, programação e controle de produção (ISSN 2674-5526 e DOI inicial 10.29327/sengi2021).

O código fonte do software utilizado no estudo está disponível separadamente e gratuitamente no link <https://github.com/RenanMarti/Heuristico-Make-To-order.git>.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

Neste trabalho, um método heurístico para sequenciamento de produção em ambiente *make to order* foi proposto e uma ferramenta para auxílio na inserção e execução do algoritmo de dados foi desenvolvida.

5.1 Contribuições

A partir de uma revisão sistemática foi identificado que dois dos principais métodos utilizados foram a programação linear inteira mista (MILP) e abordagem de solução heurística, sendo esses utilizados de forma comparativa nos resultados.

Comparativos realizados com heurísticas, meta-heurística e modelo matemático demonstraram que os resultados foram satisfatórios, podendo o método ser aplicado em indústrias com ambientes *make to order* com suas devidas características e com o diferencial de atender à compatibilidade e qualidade, de modo a evitar multas, processos judiciais e perda de produtividade dos agricultores.

Com base nos testes com usuários, a ferramenta desenvolvida proporciona benefícios aos usuários, obtendo uma forma mais simples e automatizada para a realização do sequenciamento das ordens de produção e com a redução de trabalho manual, otimizando as atividades realizadas pelos profissionais da área de planejamento e controle da produção conforme resultados dos questionários de usabilidade, utilidade e satisfação.

5.2 Perspectivas Futuras

Durante os testes de sequenciamento ocorreram dificuldades em identificar as proporções de matérias-primas que foram utilizadas no dia em que o sequenciamento

real foi executado, pois as proporções ou as próprias matérias primas podem ser revisadas, ou substituídas devido a restrições da cadeia de suprimentos, portanto torna-se necessário uma base que deve ser atualizada com frequência. Com isso o próximo passo de melhoria da ferramenta é atualizar a base de formulações semanalmente de forma automática para evitar erros durante o sequenciamento.

Outro item a ser implementado na ferramenta é a comunicação automática com a linha de produção, dispensando a necessidade de inserir as matérias-primas existentes nas moegas no início do sequenciamento do lote, reduzindo a quantidade de telas da ferramenta, para isso há a necessidade de autorizações específicas da área de TI da empresa em questão.

REFERÊNCIAS

ANGEL-BELLO, F.; VALLIKAVUNGAL, J.; ALVAREZ, A. Two approaches to handle the dynamism in a scheduling problem with sequence-dependent setup times. **Expert Systems with Applications**, v. 167, 2021.

AHMADOV Y.; HELO P. A Cloud Based Job Sequencing with Sequence Dependent Setup for Sheet Metal Manufacturing. **Annals of Operations Research**, v. 270, p. 5–24, 2018.

APACHE NETBEANS: Development Environment, Tooling Platform and Application Framework, Version 12.3 [S.l.]: Apache Software Foundation, 2021. Disponível em: <<https://netbeans.apache.org/>>. Acesso em: 01 de Julho de 2021

ARENALES, M. *et al.* H. **Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro: Campus/Elsevier, 2007.

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

BRASIL. Instrução Normativa nº 39, de 8 de janeiro de 2018. Institui o Código Civil. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ed. 154, p. 19.

BRENNAN, T. **Rootstock**: In Manufacturing, the Customer is Always Right, 2021. Página inicial. Disponível em: <https://www.rootstock.com/cloud-erp-blog/in-manufacturing-the-customer-is-always-right/>. Acesso em: 5 de Junho de 2021.

BUENO, F. **Métodos Heurísticos: Teoria e Implementações**, 2009. Disponível em: <<https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=ZGVmYXVsdGRvbWFpbnx0ZWNwcm9qYWxnb3JpdG1vc3xneDoxZjQ5Y2ZhNmE0ZmRkZGYw&pli=1>>. Acesso em: 01 out. 2021.

CAKMAKCI, M. Process improvement: performance analysis of the setup time reduction-SMED in the automobile industry, **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 41, n. 1-2, p. 168-179, 2009.

CEPEA. **Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada - CEPEA-Esalq/USP**. Disponível em:<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>. Acesso em 07 de agosto de 2021.

ÇETINKAYA, F. C.; ÇATMAKAS, H. A.; GORUR, A. K. Single-machine scheduling of the indivisible multi-operation jobs. **South African Journal of Industrial Engineering**, v. 30, 2019.

CHAURASIA, S. N.; SINGH, A. Hybrid Evolutionary Approaches for the Single Machine Order Acceptance and Scheduling Problem. **Applied Soft Computing**, v. 52, p. 725–47, 2017.

CHAVES, A. A.; GONÇALVES, J. F.; LORENA, L. A. N. Adaptive biased random-key genetic algorithm with local search for the capacitated centered clustering problem. **Computers & Industrial Engineering**, 124, p. 331 – 346, 2018.

DA SILVA, T. T. **Novas formulações de fluxo para problemas de otimização combinatória**, 2020, Tese (doutorado) - Curso de Pesquisa Operacional. Universidade Federal de São Paulo. São José dos Campos, 2020.

DETRO, Silvana Pereira. **Otimização na localização e na capacidade de armazenamento de soja e milho para o estado do Paraná**. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas. Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2013.

DU, J.; LEUNG, J. Y. T. Minimizing total tardiness on one machine is NP-hard. **Mathematics of Operations Research**, v. 15, p. 483-495, 1990.

DUNN, O. J. Multiple Comparisons Using Rank Sums. **Technometrics**, v. 6, 241–252, 1964.

GHELASE, D. *et al.* Method for Control of the Make to Order Manufacturing System on the Base of Earning Power Assessment. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 65, p. 1439–58, 2013.

GIACON, E.; MESQUITA, M. A. Levantamento das práticas de programação detalhada da produção: um survey na indústria paulista. **Gestão de Produção**, 18(3), p. 487– 498, 2011.

GONCALVES, J. F.; RESENDE, M. G. C. Biased random-key genetic algorithms for combinatorial optimization. **Journal of Heuristics**, 17(5), p. 487–525, 2011.

GONZÁLEZ, M. A. *et al.* An Efficient Hybrid Evolutionary Algorithm for Scheduling with Setup Times and Weighted Tardiness Minimization. **Soft Computing**, 16, 2097–113, 2012.

GUPTA, J. N. D. Single facility scheduling with multiple job classes. **European Journal of Operational Research**, v. 33, p. 42-45, 1988,

HERR, O.; ASVIN, G. Minimising Total Tardiness for a Single Machine Scheduling Problem with Family Setups and Resource Constraints. **European Journal of Operational Research**, v. 248, p. 123–35, 2016.

INDEX, R.; DEVELOPMENT, T. R.; TEAM, C. R. A Language and Environment for Statistical Computing, [S,l,: s,n,], v. 2, ISBN 3900051070, 2008.

JACCARD, P. Étude comparative de la distribution florale dans une portion des Alpes et des Jura. **Bull Soc Vandoise Sci Nat** 37, p. 547-579, 1901.

JAVA: Runtime Environment, Version 8.0 [S,l,: Oracle Corporation, 2021. Disponível em: <http://www.java.com/>. Acesso em: 01 de Julho de 2021.

KARRAY, A.; BORNE, P.; BENREJEB M. A hybrid algorithm to solve the single-machine scheduling problem. **International Journal of Innovation and Applied Studies**, v.11, p. 623-632, 2015.

KIR, S.; YAZGAN, H. R. A Sequence Dependent Single Machine Scheduling Problem with Fuzzy Axiomatic Design for the Penalty Costs, **Computers & Industrial Engineering**, 92, p. 95–104, 2016.

KITCHENHAM, B.; CHARTERS, S. **Guidelines for Performing Systematic, 13 Literature Reviews in Software Engineering**, Technical Report EBSE2007-01, Software Eng, Group, Keele Uni., and Dept. of Computer Science, Univ. of Durham, UK, 2007.

LIKERT, R. Technique for the Measurement of Attitudes. **Archives of Psychology**, 140, 1-55, 1932.

LIMA, O. F. **Guia de Diagnose Visual de Deficiências Nutricionais em Sorgo-Sacarino**. Embrapa. Dourados, MS, 2014, ISSN 1679-0464.

MATIAS, A. "Fordismo". Brasil Escola, Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/fordismo.html>. Acesso em 07 de agosto de 2021.

MCINTOSH, R. *et al.* Changeover improvement: Reinterpreting Shingo's "SMED" methodology. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v.54, n.1, p.98-111, 2007.

MOLAEI, E.; SADEGHIAN, R.; FATTAHI, P. Minimizing maximum tardiness on a single machine with family setup times and machine disruption. **Computers & Operations Research**, v.129, 2021.

MYSQL: Database Service, Version 8.0.21 [S,I,]: Oracle Corporation, 2020. Disponível em: <http://www.mysql.com/>. Acesso em: 01 de Julho de 2021.

NESELLO, V. *et al.* Exact Solution of the Single-Machine Scheduling Problem with Periodic Maintenances and Sequence-Dependent Setup Times. **European Journal of Operational Research**, v.266, p. 498–507, 2018.

PACHECO, J. *et al.* Variable Neighborhood Search with Memory for a Single-Machine Scheduling Problem with Periodic Maintenance and Sequence-Dependent Set-up Times. **Knowledge-Based Systems**, v.145, p. 236–49, 2018.

PINEDO, M. L. **Scheduling: theory, algorithms, and systems**. Berlin: Springer Science & Business Media, 2012.

PREECE, J.; SHARP, H.; ROGERS, Y. **Interaction Design - Beyond Human-Computer Interaction**. New Jersey: John Wiley & Sons, p. 519, 2002, ISBN 0-471-49278-7.

REETZ, H. F. **Fertilizantes e o seu uso eficiente**. São Paulo: ANDA, v.178, 2017.

RODERO, G. *et al.* **Flexibilidade e rapidez voltadas ao aumento da competitividade de uma micro empresa do setor metalúrgico**. Enegep, São Carlos - SP, 2010.

ROOHNAVAZFAR, M. *et al.* Stochastic single machine scheduling problem as a multi-stage dynamic random decision process. **Computational Management Science**, v.18, n. 3, p. 267–297, 2021.

SLACK, N. **The manufacturing advantage: achieving competitive manufacturing operations**. [S,l,]: Mercury Books, 1991.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**, São Paulo, SP: Atlas, 2009.

TANAKA, S.; ARAKI, M. An Exact Algorithm for the Single-Machine Total Weighted Tardiness Problem with Sequence-Dependent Setup Times. **Computers & Operations Research**, v. 40, p. 344–52, 2013.

TANAKA, T. F. **Estudo da viabilidade econômica da implantação e ampliação de um processo de produção de fertilizantes**, Universidade federal de Uberlândia, 2019, Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/24575/1/EstudoViabilidadeEcon%C3%B4mica.pdf>.

TÁVORA, R. C. M. Grupos de visitação na AMAN: um estudo de caso do problema do caixeiro viajante. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

WARD, J. H. Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. **Journal of the American Statistical Association**, v. 58, 236–244, 1963.

WEERDT, M. D.; BAART, R.; HE, L. Single-machine scheduling with release times, deadlines, setup times, and rejection. **European Journal of Operational Research**, 291(2), 629-639, 2021.

WU, C. C.; HSU, P. H.; LAI, K. Simulated-Annealing Heuristics for the Single-Machine Scheduling Problem with Learning and Unequal Job Release Times. **Journal of Manufacturing Systems**, v.30, p. 54–62, 2011.

WU, C. *et al.* Cloud theory-based simulated annealing for a single-machine past sequence setup scheduling with scenario-dependent processing times. **Complex Intell, Syst**, v.7, 345–357, 2021.

XIE, X.; WANG, X. An Enhanced ABC Algorithm for Single Machine Order Acceptance and Scheduling with Class Setups, **Applied Soft Computing**, v.44, 255–66, 2016.

YAZDANI, S. M. T.; RASARATNAM, L. A Single Machine Carryover Sequence-Dependent Group Scheduling in PCB Manufacturing. **Computers & Operations Research**, v.40, p. 236–47, 2013.

YIN, Y. *et al.* Single-Machine Serial-Batch Delivery Scheduling with Two Competing Agents and Due Date Assignment. **Annals of Operations Research**, v. 298, n. 1-2, p. 497–523, 2018.

YIN, Y. *et al.* Two-Agent Single-Machine Scheduling to Minimize the Batch Delivery Cost. **Computers & Industrial Engineering**, v.92, 16–30, 2016.

YUSRISKI, R. *et al.* Integer Batch Scheduling Problems for a Single-Machine to Minimize Total Actual Flow Time. **Procedia Manufacturing**, v.2, p. 118–23, 2015.

ZHOU, F. *et al.* Optimal Single Machine Scheduling of Products with Components and Changeover Cost. **European Journal of Operational Research**, v.233, 75–83, 2014.

WILLNER, O. *et al.* Globally Distributed Engineering Processes: Making the Distinction between Engineer-to-Order and Make-to-Order. **Procedia CIRP**, v.17, p. 663–68, 2014.

APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO 1

Questionário 1: Avaliação de usabilidade do Software (SUS – Traduzido)

TCLE

Você está de acordo com o TCLE?

() Sim

() Não

Dados pessoais

Qual o seu nome? _____

Qual a sua idade? _____

Qual a sua formação? _____

Qual o seu cargo? _____

Qual empresa você trabalha? _____

Qual o seu tempo de experiência? _____

Responda as questões abaixo utilizando a pontuação da escala:

(1) Discordo Totalmente / (2) Discordo / (3) Neutro / (4) Concordo / (5) Concordo Totalmente

Eu acho que gostaria de usar essa ferramenta frequentemente ()

Eu achei a ferramenta desnecessariamente complexo ()

Eu achei a ferramenta fácil de usar ()

Acredito que precisaria de suporte técnico para usar essa ferramenta ()

Eu acho que as várias funções dessa ferramenta estão bem integradas ()

Eu achei que há muita inconsistência nessa ferramenta ()

Imagino que muitas pessoas aprenderiam a usar facilmente essa ferramenta ()

Eu achei a ferramenta muito confuso ()

Senti bastante confiança usando da ferramenta ()

APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO 2

Questionário 2: Satisfação com a ferramenta

1) Responda as questões abaixo:

a. Quão amigável é a interface da ferramenta?

() Pouco amigável

() Moderado

() Neutro

() Amigável

() Muito amigável

b. Quão boa é a ferramenta na realização das funções que ela propõe fazer?

() Ruim

() Moderado

() Neutro

() Boa

() Muito boa

c. Com que frequência você encontrou erros enquanto utilizava a ferramenta?

() Pouco frequente

() Moderado

() Neutro

() Frequente

() Muito frequente

d. De forma geral, qual é o grau de satisfação com a ferramenta?

() Pouco satisfeito

() Moderado

() Neutro

() Satisfeito

() Muito satisfeito

2)Comentários?

Sugestões? _____

APÊNDICE C – QUESTIONÁRIO 3

Questionário 3: Utilidade da ferramenta

1) Responda as questões abaixo utilizando a pontuação da escala:

(1) Discordo Totalmente / (2) Discordo / (3) Neutro / (4) Concordo / (5) Concordo Totalmente

As informações estão organizadas de forma adequada ()

A ferramenta ajuda no sequenciamento de produção ()

A ferramenta pode ser utilizada como suporte às atividades diárias ()

A ferramenta pode substituir atividades manuais que demandam bastante tempo de execução ()

As informações cadastradas na ferramenta são úteis no dia a dia dos profissionais de planejamento e controle de produção ()

As informações da ferramenta ajudam a área de produção na tomada de decisão ()

O sequenciamento que a ferramenta fornece parece coerente ()

A ferramenta apresenta informações inconsistentes e não confiáveis ()

O meu trabalho será agilizado com o uso dessa ferramenta ()

A ferramenta não agregou valor para área de planejamento e controle da produção ()

2) Você tem conhecimento de algum tipo de software desenvolvido como instrumento de sequenciamento de produção?

() Não

() Sim, qual?

3) Após a utilização do software desenvolvido, você recomendaria a utilização do sistema?

() Sim

() Não

4) Quais são as vantagens?

- Facilidade de utilização
- Tempo para coleta / análise de dados
- Organização
- Geração de relatórios/ visibilidades
- Previsão utilizando métodos estatísticos
- Outros: _____

5) Quais são as desvantagens?

- Facilidade de utilização
- Tempo para coleta / análise de dados
- Organização
- Geração de relatórios/ visibilidades
- Previsão utilizando métodos estatísticos
- Outros: _____

6) Comentários? Sugestões?



APÊNDICE D – RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Tabela A: Ganhos de Setup em relação ao sequenciamento manual e tempo de execução dos métodos

Lotes	N	Manual	Heurístico	T Heurístico	Gupta Cluster 7	T Cluster 7	Gupta Cluster 4	T Cluster 4	Modelo Matemático	T Modelo	A- BRKGA	T A- BRKGA
1	13	1	0	4	0	4	0	3	0	1,735	0	0,194
2	44	4	1	8	1	11	1	9	1	10,672	1	0,762
3	59	8	5	5	2	15	1	12	5	5,672	5	0,995
4	45	7	3	8	2	11	2	9	3	22,656	3	0,775
5	26	1	0	8	0	9	0	7	0	0,25	0	0,415
6	32	5	2	6	0	11	0	6	2	12,859	2	0,547
7	38	12	8	4	1	13	1	8	8	5,89	7,3	0,657
8	49	4	0	6	-2	12	-2	10	0	6,016	0	0,82
9	27	5	2	4	0	9	1	7	2	0,547	2	0,436
10	26	4	1	3	0	9	0	7	1	1,204	1	0,424
11	30	3	2	4	1	10	1	6	2	0,219	2	0,486
12	41	6	2	8	3	10	3	8	2	13,156	2	0,721
13	43	4	1	3	0	11	0	9	1	2,016	1	0,717
14	37	7	3	7	1	12	1	7	3	1,422	3	0,625
15	51	10	6	6	2	13	3	10	6	30,25	5,5	0,919
16	32	5	2	8	-1	11	-1	6	2	2,766	2	0,534
17	32	4	1	7	0	11	1	6	1	7,781	1	0,546
18	34	7	4	8	2	11	2	7	4	3,703	4	0,58
19	53	11	7	8	4	13	4	11	7	20,343	7	0,948
20	53	5	2	4	1	13	1	11	2	3,437	2	0,949
21	49	6	2	3	0	12	0	10	2	22,141	2	0,866

Lotes	N	Manual	Heurístico	T Heurístico	Gupta Cluster 7	T Cluster 7	Gupta Cluster 4	T Cluster 4	Modelo Matemático	T Modelo	A- BRKGA	T A- BRKGA
22	19	5	2	4	0	6	0	5	2	0,594	2	0,322
23	39	4	1	4	0	13	0	8	1	13,75	1	0,696
24	61	5	1	7	-1	15	-1	12	1	22,25	1	1,126
25	29	3	1	8	1	10	1	7	1	0,562	1	0,501
26	32	6	4	4	3	11	3	6	4	0,578	4	0,548
27	87	9	6	8	0	22	1	17	6	16,922	6	1,699
28	20	2	0	7	-1	7	-1	5	0	1,61	0	0,32
29	62	10	6	4	2	16	2	12	6	11,672	6	1,161
30	68	12	8	4	4	17	3	14	8	12,61	7,7	1,317
31	43	7	4	5	-2	11	-1	9	4	2,032	4	0,768
32	24	4	2	5	1	8	1	6	2	0,515	2	0,386
33	20	4	2	5	0	7	0	5	2	0,828	2	0,317
34	51	8	4	6	3	13	4	10	4	16,844	3,6	0,865
35	46	11	7	7	4	12	4	9	7	23,594	7	0,795
36	41	9	5	3	2	10	2	8	5	4,469	5	0,676
37	28	3	0	7	0	9	0	7	0	5,562	0	0,434
38	84	10	6	2	3	21	3	17	6	127,844	5,2	1,736
39	78	12	7	6	2	20	4	16	7	17,172	6,2	1,533
40	54	10	5	6	1	14	0	11	5	75,484	3,6	0,993
41	29	6	3	3	2	10	2	7	3	5,578	3	0,489
42	67	8	4	6	3	17	3	13	4	36,594	2,2	1,289
43	79	14	10	5	0	20	0	16	10	57,578	8,2	1,546
44	54	7	4	6	2	14	1	11	4	3,312	3,9	0,925
45	60	10	5	8	0	15	-1	12	5	135,5	5	1,091
46	42	10	6	4	1	11	0	8	6	17,719	6	0,722
47	48	13	9	6	4	12	2	10	12	6,125	8,8	0,834
48	48	9	5	5	2	12	2	10	5	25,594	5	0,823

Lotes	N	Manual	Heurístico	T Heurístico	Gupta Cluster 7	T Cluster 7	Gupta Cluster 4	T Cluster 4	Modelo Matemático	T Modelo	A- BRKGA	T A- BRKGA
49	41	10	6	8	0	10	0	8	6	2	6	0,707
50	67	13	10	6	1	17	0	13	10	3,985	10	1,239
51	87	14	11	4	4	22	2	17	11	18,969	11	1,680
52	57	7	4	4	1	14	1	11	4	5,625	4	1,051
53	45	5	1	3	0	11	0	9	1	1,531	1	0,779
54	58	13	8	5	-1	15	1	12	8	5,469	8	1,075
55	59	10	4	7	1	15	1	12	5	7,625	5	1,05
56	60	11	7	5	0	15	0	12	7	336,672	7	1,104
57	48	6	3	3	1	12	1	10	3	9,281	3	0,815
58	30	4	0	4	0	10	0	6	0	2,016	0	0,506
59	33	3	0	7	0	11	0	7	0	7,359	0	0,563
60	53	7	3	8	-1	13	-1	11	3	18,047	3	0,932
61	72	12	9	5	1	18	1	14	9	47,469	8,7	1,368
62	48	4	1	7	-1	12	0	10	1	22,828	1	0,814
63	18	2	0	8	-1	6	-1	5	0	0,313	0	0,294
64	43	6	3	3	1	11	1	9	3	1,313	3	0,751
65	94	12	8	4	2	24	0	19	8	74,75	6,6	1,975
66	26	3	0	7	-1	9	-1	7	0	0,766	0	0,401
67	24	4	2	4	0	8	0	6	2	0,781	2	0,376
68	57	8	4	5	2	14	1	11	4	8,89	4	1,04
69	75	7	3	3	2	19	1	15	3	2,421	3	1,568
70	92	12	8	5	2	23	2	18	9	87,203	9	2,112
71	71	9	6	4	1	18	0	14	6	25,875	6	1,352
72	39	8	4	5	1	13	0	8	4	2,61	4	0,659
73	60	9	5	7	1	15	0	12	5	33,265	5	1,058
74	65	12	8	6	0	16	0	13	8	29,703	8	1,235
75	84	14	9	5	-1	21	1	17	9	52,984	9	1,678

Lotes	N	Manual	Heurístico	T Heurístico	Gupta Cluster 7	T Cluster 7	Gupta Cluster 4	T Cluster 4	Modelo Matemático	T Modelo	A- BRKGA	T A- BRKGA
76	45	8	4	3	2	11	2	9	4	41,641	4	0,746
77	66	8	4	4	2	17	2	13	4	33,406	4	1,210
78	60	10	6	5	1	15	0	12	6	30,61	6	1,113
79	100	14	10	3	-2	25	0	20	10	92,515	10	2,171
80	18	3	0	6	0	6	0	5	0	2,39	0	0,31
81	23	3	0	8	0	8	0	6	0	0,39	0	0,376
82	46	4	1	8	2	12	2	9	1	4,218	1	0,803
83*	43	8	4	6	0	11	1	9	0	3600	2,6	0,774
84	38	3	1	6	1	13	2	8	1	0,766	1	0,61
85	49	12	9	7	1	12	1	10	9	7,719	8,4	0,832
86	37	5	3	6	0	12	1	7	3	2,125	3	0,635
87	42	3	0	4	0	11	0	8	0	10,641	0	0,725
88	26	6	2	4	3	9	1	7	2	2,25	2	0,432
89	19	1	0	8	0	6	0	5	0	0,094	0	0,264
90	16	3	2	3	1	5	1	4	2	0,14	2	0,267
91	45	4	2	7	-1	11	0	9	2	1,484	2	0,778
92	33	4	2	3	-1	11	-1	7	2	0,578	2	0,558
93	36	3	1	5	1	12	1	7	1	0,906	1	0,622
94	25	3	1	5	-1	8	-1	6	1	0,921	1	0,4
95	36	6	2	3	0	12	0	7	2	1,109	2	0,616
96	22	4	2	5	1	7	1	6	2	0,36	2	0,334
97	18	1	0	5	0	6	0	5	1	0,109	1	0,28
98	39	5	1	7	-2	13	-3	8	1	1,656	1	0,647
99	33	5	1	7	0	11	0	7	1	5,11	1	0,567
100	27	5	3	3	0	9	0	7	3	0,5	3	0,454
101	37	3	0	4	0	12	0	7	0	1	0	0,605
102	25	5	1	4	0	8	0	6	1	6,125	1	0,431

Lotes	N	Manual	Heurístico	T Heurístico	Gupta Cluster 7	T Cluster 7	Gupta Cluster 4	T Cluster 4	Modelo Matemático	T Modelo	A- BRKGA	T A- BRKGA
103	45	3	0	8	0	11	-1	9	0	3,359	0	0,793
104	46	5	2	7	2	12	2	9	2	2,75	2	0,823
105	26	4	2	5	1	9	0	7	2	0,688	2	0,437
106	19	1	0	6	0	6	0	5	0	4,641	0	0,353
107	34	12	7	8	3	11	3	7	7	7,64	7	0,603
108	42	9	6	5	3	11	3	8	6	1,937	6	0,698
109	31	6	3	4	3	10	2	6	3	5,469	3	0,506
110	25	3	1	6	1	8	1	6	1	0,672	1	0,416
111	40	6	3	6	1	10	1	8	3	3,156	3	0,671
112	21	5	1	6	1	7	1	5	1	1,39	1	0,366
113	17	5	2	6	2	6	2	4	2	0,406	2	0,3
114	24	8	4	8	3	8	2	6	4	3,266	4	0,411
115	16	2	0	7	-1	5	-2	4	0	0,453	0	0,273
116	32	7	4	6	2	11	2	6	4	3,141	4	0,524
117	9	2	0	6	0	3	0	2	0	0,094	0	0,166
118	29	4	1	3	1	10	0	7	1	4,922	1	0,478
119	32	8	4	4	0	11	-1	6	4	2,047	4	0,535
120	18	5	1	8	0	6	0	5	1	0,296	1	0,306
121	7	0	0	8	0	2	0	2	0	0,094	0	0,129
122	17	3	1	6	-1	6	-1	4	1	0,297	1	0,266
123	39	0	0	6	0	13	0	8	0	0,156	0	0,625
124	50	3	1	4	1	13	1	10	1	3,969	1	0,879
125	34	6	2	8	-1	11	-1	7	2	0,625	2	0,571
126	21	6	2	4	-1	7	-1	5	2	1,062	2	0,361
127	45	3	0	3	0	11	0	9	0	20,032	0	0,755
128	34	3	1	6	0	11	0	7	1	1,344	1	0,556
129	40	6	3	4	0	10	1	8	3	3,156	3	0,677

Lotes	N	Manual	Heurístico	T Heurístico	Gupta Cluster 7	T Cluster 7	Gupta Cluster 4	T Cluster 4	Modelo Matemático	T Modelo	A- BRKGA	T A- BRKGA
130	21	5	1	5	1	7	1	5	1	1,047	1	0,365
131	17	5	2	8	1	6	1	4	2	0,609	2	0,301
132	24	8	4	7	1	8	1	6	4	3,375	4	0,412
133	16	2	0	7	-2	5	-2	4	0	0,407	0	0,276
134	19	4	3	5	1	6	1	5	3	0,172	3	0,293
135	28	5	3	8	0	9	-1	7	3	0,578	3	0,453
136	17	4	3	4	-1	6	-1	4	3	0,187	3	0,221
137	39	6	3	5	2	13	2	8	3	1	3	0,668
138	26	2	1	7	-2	9	-2	7	1	0,188	1	0,41
139	26	3	1	5	-2	9	-2	7	1	0,829	1	0,427
140	17	2	0	5	0	6	0	4	0	0,265	0	0,268
141	36	4	1	7	0	12	0	7	1	0,843	1	0,582
142	44	4	2	3	0	11	0	9	2	0,891	2	0,745
143	16	1	0	7	-1	5	-1	4	0	0,11	0	0,223
144	27	1	0	4	-1	9	-1	7	0	0,203	0	0,378
145	20	2	0	5	0	7	0	5	0	0,578	0	0,31
146	38	5	2	5	1	13	1	8	2	5,172	2	0,648
147	35	1	0	6	-2	12	-3	7	0	0,312	0	0,557
148	22	3	1	8	0	7	0	6	1	0,953	1	0,354
149	17	5	2	3	1	6	1	4	2	0,375	2	0,3
150	24	8	4	3	1	8	1	6	4	3,438	4	0,415
151	16	2	0	3	-2	5	-2	4	0	0,407	0	0,276
152	20	3	1	3	-1	7	-1	5	1	0,219	1	0,328
153	66	9	5	8	-1	17	-2	13	5	8,578	4,6	1,226
154	94	13	9	8	-3	24	-5	19	9	85,266	7,2	1,958
155	20	4	1	7	0	7	-1	5	1	0,515	1	0,349
156	57	11	7	3	0	14	1	11	7	2,937	7	1,029

Lotes	N	Manual	Heurístico	T Heurístico	Gupta Cluster 7	T Cluster 7	Gupta Cluster 4	T Cluster 4	Modelo Matemático	T Modelo	A- BRKGA	T A- BRKGA
157	37	3	2	8	1	12	1	7	2	0,781	2	0,625
158	48	4	1	5	1	12	1	10	1	6,125	0,8	0,84
159	85	11	7	4	2	21	4	17	7	18,078	6,1	1,794
160	49	9	6	3	2	12	2	10	6	10,578	6	0,851
161	53	6	4	3	2	13	0	11	4	0,812	4	0,97
162	61	6	3	8	0	15	0	12	3	5,953	3	1,071
163	57	7	4	6	1	14	1	11	4	3,547	4	1,03
164	20	3	1	6	0	7	0	5	1	0,875	1	0,35
165	53	8	4	7	2	13	1	11	4	1,656	4	0,933
166	32	8	4	4	1	11	0	6	4	4,406	4	0,552
167	43	9	6	4	0	11	-1	9	6	3,484	6	0,744
168	35	10	6	7	1	12	1	7	6	2,438	6	0,601
169	30	4	0	8	0	10	0	6	0	0,547	0	0,51
170	33	3	0	3	0	11	0	7	0	10,109	0	0,568
171	53	4	0	7	-4	13	-4	11	0	5	0	0,936
172	60	9	5	6	0	15	1	12	5	4,5	3,2	1,207
173	48	4	1	6	-2	12	0	10	1	17,797	1	0,816
174	15	2	0	3	0	5	0	4	0	0,188	0	0,252
175	64	9	5	4	4	16	3	13	5	31,079	5	1,19
176	76	13	9	6	3	19	3	15	9	34,234	7,2	1,516
177	53	10	6	3	4	13	2	11	6	3,906	5,4	0,961
178	38	8	6	3	4	13	2	8	6	0,703	6	0,644
179	37	10	6	8	1	12	1	7	6	1,891	6	0,64
180	21	3	1	6	0	7	0	5	1	0,531	1	0,342
181	63	8	5	7	2	16	3	13	5	13,813	5	1,116
182	48	11	8	5	2	12	2	10	8	2,891	8	0,828
183	29	6	3	6	1	10	1	7	3	3,719	3	0,472

Lotes	N	Manual	Heurístico	T Heurístico	Gupta Cluster 7	T Cluster 7	Gupta Cluster 4	T Cluster 4	Modelo Matemático	T Modelo	A- BRKGA	T A- BRKGA
184	25	5	2	6	2	8	2	6	2	0,391	2	0,395
185	44	9	5	5	2	11	1	9	5	9,609	5	0,748
186	48	5	2	4	2	12	1	10	2	5,468	2	0,814
187	42	10	7	6	3	11	3	8	7	1,703	7	0,712
188	49	13	10	5	4	12	4	10	10	0,781	10	0,825
189	41	12	8	8	3	10	1	8	8	14,25	8	0,69
190	16	6	4	3	0	5	0	4	4	0,125	4	0,273
191	62	10	6	5	1	16	1	12	6	49,984	6	1,195
192	48	5	2	8	0	12	0	10	2	17,875	2	0,815

Fonte: O autor (2021).