

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA E  
DE MATERIAIS**

**RUAN RITHELLE DE FARIA FRANCO CHAGAS**

**MÉTODO PARA OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO DE  
PRODUÇÃO DE PEÇAS QUE UTILIZAM CORTE DE CHAPAS  
METÁLICAS COM FOCO EM REDUÇÃO DE CUSTOS E RESÍDUOS**

**DISSERTAÇÃO**

**CURITIBA**

**2020**

**RUAN RITHELLE DE FARIA FRANCO CHAGAS**

**MÉTODO PARA OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO DE  
PRODUÇÃO DE PEÇAS QUE UTILIZAM CORTE DE CHAPAS  
METÁLICAS COM FOCO EM REDUÇÃO DE CUSTOS E RESÍDUOS**

**Method for Optimizing Production Planning for Parts Using Sheet Metal Cutting with a  
Focus on Cost and Waste Reduction**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Engenharia de Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Milton Borsato

**CURITIBA**

**2020**



Esta licença permite o download e o compartilhamento da obra desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-la ou utilizá-la para fins comerciais.



**Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Câmpus Curitiba**



RUAN RITHELLE DE FARIA FRANCO CHAGAS

**MÉTODO PARA OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO DE PRODUÇÃO DE PEÇAS QUE  
UTILIZAM CORTE DE CHAPAS METÁLICAS COM FOCO EM REDUÇÃO DE CUSTOS E  
RESÍDUOS**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Engenharia De Manufatura.

Data de aprovação: 18 de Dezembro de 2020

Prof Milton Borsato, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Leandro Magatao, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Marcelo Gechele Cleto, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 18/12/2020.

Dedico este trabalho a Deus, à minha mãe Divina, ao meu pai Renato, à minha irmã Pillare, ao meu irmão Miguel, à minha irmã Renata e ao meu sobrinho Anthony.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por iluminar meu caminho até esse momento e por ter me dado força para concluir esse projeto.

A minha família por todo o apoio necessário, pelas orações prestadas e por sempre serem compreensivos pelos momentos de ausência.

A todas as pessoas especiais que estiveram comigo neste processo. Agradeço por me fazerem companhia, pelas orações e pelas risadas.

Ao meu orientador Milton Borsato pelo apoio, paciência, conselhos e ensinamentos.

Aos meus colegas de laboratório por todo o auxílio e companheirismo prestado nesta jornada.

Ao PPGEM pela oportunidade de realizar este mestrado.

À UTFPR pela oportunidade e apoio financeiro para realizar este trabalho.

À CAPES pelo apoio financeiro. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior -Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 88887.485247/2020-00.

À CNH Industrial pela parceria firmada. ACT (Acordo de cooperação Tecnológica) 8/2020.

À Renault do Brasil e à Fundação Araucária pelo suporte no primeiro ano da pesquisa.

A todos que contribuíram de forma particular e especial, os meus agradecimentos.

”A felicidade pode ser encontrada mesmo nas horas mais difíceis,  
se você se lembrar de acender a luz.”

(Alvo Dumbledore)

## RESUMO

CHAGAS, Ruan Rithelle de Faria Franco. **Método para Otimização do Planejamento de Produção de Peças que Utilizam Corte de Chapas Metálicas com Foco em Redução de Custos e Resíduos**. 2020. 82 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

A redução de gastos desnecessários e o crescimento da conscientização ambiental, são fatores que impactam diretamente na decisão de grandes empresas a buscar novas formas de melhorar o aproveitamento de matéria-prima em suas fábricas. Este trabalho foi desenvolvido em parceria com uma empresa produtora de maquinário agrícola, e que buscava reduzir a quantidade de resíduos gerados no processo de corte de chapas metálicas. Mensalmente a empresa parceira descarta toneladas de aço. A empresa já possui um software que realiza a melhor distribuição física das peças dentro de suas respectivas chapas. Contudo, após a realização de uma análise bibliométrica e sistêmica, foi identificada a oportunidade de desenvolver um método que realiza essa distribuição de peças nas chapas levando em consideração que um número definido de peças poderia ser estocado. Assim, o plano de produção da empresa poderia ser alterado, de forma a permitir que fosse possível aumentar o aproveitamento das chapas. Para o desenvolvimento desse método utilizou-se como *framework* metodológico o *Design Science Research*. Dessa forma, seis etapas foram realizadas: (i) identificação do problema e motivação; (ii) definição dos objetivos da solução; (iii) projeto e desenvolvimento; (iv) demonstração; (v) avaliação; e (vi) comunicação dos resultados. No início da criação do método, foi definido que ele seria um algoritmo genético escrito em linguagem *Python*. Para realizar a demonstração do método, foi comparada a resposta obtida pelo software da empresa parceira com o resultado estimado pelo método. Deste modo, foi possível medir percentualmente a representatividade do método. Em seguida, o método foi avaliado quanto a sua eficiência, facilidade de uso, operacionalidade e generalidade. A avaliação de eficiência foi realizada de maneira quantitativa, comparando os resultados obtidos pelo método com os resultados obtidos pela empresa no mesmo período. Para este cenário, o método obteve resultados melhores. Já as avaliações de facilidade de uso, operacionalidade e generalidade, foram realizadas de maneira qualitativa a partir das respostas obtidas em questionário entregue aos engenheiros da empresa parceira. Ao analisar os resultados, é possível notar que apesar de possivelmente sofrer algumas resistências, ele poderia ser implementado na empresa parceira. E ao mesmo tempo, foi comprovado, que para o contexto avaliado, o método cumpriu seu objetivo.

**Palavras-chave:** Planejamento de produção, indústria 4.0, algoritmo genético, otimização, problema de corte

## ABSTRACT

CHAGAS, Ruan Rithelle de Faria Franco. **Method for Optimizing Production Planning for Parts Using Sheet Metal Cutting with a Focus on Cost and Waste Reduction.** 2020. 82 f. Dissertation – Postgraduate Program in Mechanical and Materials Engineering, Federal Technology University - Paraná. Curitiba, 2020.

The reduction of unnecessary expenses and the growth of environmental awareness are factors that directly impact the decision of large companies to seek new ways to improve the use of raw materials in their factories. This work was developed in partnership with a company that produces agricultural machines, and that sought to reduce the amount of waste generated in the process of cutting sheet metal. The partner company discards tons of steel every month. The company already has a software that performs the best physical distribution of parts within their respective plates. However, after conducting a bibliometric and systemic analysis, the opportunity was identified to develop a method that performs this distribution of parts on the plates considering that a defined number of parts could be stored. An analysis of the case was carried out. Thus, the company's production plan could be changed to allow it to be possible to increase the use of the plates. For the development of this method, the methodological framework used was Design Science Research. Thus, six steps were taken: *(i)* problem identification and motivation; *(ii)* definition of the solution's objectives; *(iii)* design and development; *(iv)* demonstration; *(v)* evaluation; and *(vi)* communication of results. It was defined at the beginning of the method creation that it would be a genetic algorithm written in Python. To demonstrate the method, the response obtained by the partner company's software was compared to the result estimated by the proposed method. In this way, it was possible to measure the representativeness of the presented method. Then, the method was evaluated for its efficiency, ease of use, operability, and generality. The efficiency assessment was carried out quantitatively, comparing the results obtained by the method with the results obtained by the company in the same period. For this scenario, the method obtained better results. The evaluations of ease of use, operability, and generality were carried out qualitatively from the answers obtained in a questionnaire delivered to the engineers of the partner company. When analyzing the results, it is possible to notice that although it may suffer some resistance, it could be implemented in the partner company. At the same time, it was proven that for the evaluated context, the method fulfilled its objective.

**Keywords:** Production planning, 4.0 industry, genetic algorithm, optimization, cutting stock problem



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Previsão de demanda no Planejamento de Produção	20
Figura 2	–	Esquema do processo de modelagem	22
Figura 3	–	Evolução da manufatura ao longo das Revoluções Industriais	24
Figura 4	–	Etapas do DSR	33
Figura 5	–	Fluxograma de Funcionamento do Algoritmo Genético	36
Figura 6	–	Tabela de Parâmetros	37
Figura 7	–	Exemplo de peças	38
Figura 8	–	Exemplo da distribuição espacial das peças em uma chapa	38
Figura 9	–	Tabela de Demanda	39
Figura 10	–	Exemplo de indivíduo	39
Figura 11	–	Curva para Distribuição Exponencial	41
Figura 12	–	Demonstração do <i>Crossover</i>	42
Figura 13	–	Demonstração do processo de mutação	43
Figura 14	–	Exemplo do processo de Avaliação, Classificação e Seleção	44
Figura 15	–	Gráfico histórico dos melhores indivíduos	45
Figura 16	–	Plano de produção elaborado pelo método	45
Figura 17	–	Primeira pergunta sobre facilidade de uso	55
Figura 18	–	Segunda pergunta sobre facilidade de uso	55
Figura 19	–	Terceira pergunta sobre facilidade de uso	56
Figura 20	–	Primeira pergunta sobre operacionalidade	57
Figura 21	–	Segunda pergunta sobre operacionalidade	57
Figura 22	–	Primeira pergunta sobre generalidade	58
Figura 23	–	Segunda pergunta sobre generalidade	59
Figura 24	–	Terceira pergunta sobre generalidade	59
Figura 25	–	Síntese do processo de filtragem	68
Figura 26	–	Relevância do Periódico	71
Figura 27	–	Análise do JCR	71
Figura 28	–	Número de Artigos Publicados por Ano	72

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1	–	Tipos de artefatos segundo o DSR .....	31
Quadro 2	–	Diretrizes para a condução do DSR .....	32
Quadro 3	–	Métodos para avaliação dos artefatos .....	47
Quadro 4	–	Número de citações em cada artigo .....	70

## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>AHP</b>	<i>Analytic Hierarchy Process</i>	Análise Hierárquica de Processo
<b>AI</b>	<i>Artificial Intelligence</i>	Inteligência Artificial
<b>APP</b>	<i>Aggregate Production Planning</i>	Planejamento de Produção Agregado
<b>ELECTRE</b>	<i>Elimination et Choix Traduisant la Réalité</i>	Eliminação e Escolha que Expressa a Realidade
<b>CPS</b>	<i>Cyber Physical Systems</i>	Sistemas Ciber-Físicos
<b>DSR</b>	<i>Design Science Research</i>	-
<b>ERP</b>	<i>Enterprise Resource Planning</i>	Planejamento de Recursos Empresariais
<b>GA</b>	<i>Genetic Algorithm</i>	Algoritmo Genético
<b>IoT</b>	<i>Internet of Things</i>	Internet das Coisas
<b>IT</b>	<i>Information Technology</i>	Tecnologia da Informação
<b>MIP</b>	<i>Mixed Integer Programming</i>	Programação Inteira Mista
<b>MRP</b>	<i>Material Requirement Planning</i>	Planejamento das Necessidades de Materiais
<b>MRP II</b>	<i>Manufacturing Resources Planning</i>	Planejamento de Recursos de Manufatura
<b>OR</b>	<i>Operational Research</i>	Pesquisa Operacional
<b>PP</b>	<i>Production Planning</i>	Planejamento de Produção
<b>PP&amp;C</b>	<i>Production Planning and Control</i>	Planejamento e Controle da Produção
<b>ProKnow-C</b>	<i>Knowledge Development Process - Constructivist</i>	Processo de Desenvolvimento de Conhecimento - Construtivo
<b>PROMETHEE</b>	<i>Preference Ranking Organization Method for Enriched Evaluation</i>	Método de Organização de Classificação de Preferência de Enriquecimento
<b>PSO</b>	<i>Particle Swarm Optimization</i>	Otimização por Enxame de Partículas
<b>SA</b>	<i>Simulated Annealing</i>	-

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1 OBJETIVOS	16
1.1.1 Objetivo Geral	16
1.1.2 Objetivos Específicos	16
1.2 JUSTIFICATIVA	16
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	17
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>18</b>
2.1 PLANEJAMENTO DE PRODUÇÃO	18
2.2 PESQUISA OPERACIONAL	21
2.3 INDÚSTRIA 4.0	24
2.4 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL	26
2.5 META-HEURÍSTICA	28
<b>3 ASPECTOS METODOLÓGICOS</b>	<b>31</b>
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA	31
3.2 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	34
3.2.1 Identificação do problema e motivação	34
3.2.2 Definição dos objetivos da solução	35
3.2.3 Criação e desenvolvimento	35
3.2.3.1 Inicialização	37
3.2.3.2 <i>Fitness</i>	40
3.2.3.3 Seleção dos Pais	41
3.2.3.4 <i>Crossover</i> , Mutação e Análise das Restrições	42
3.2.3.5 Avaliação, Classificação e Seleção	43
3.2.3.6 Finalização	44
3.2.4 Demonstração	45
3.2.5 Avaliação	46
3.2.6 Comunicação dos resultados	47
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>48</b>
4.1 CRIAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO	48
4.1.1 Inicialização	49
4.1.2 <i>Fitness</i>	50
4.1.3 Seleção dos Pais	50
4.1.4 <i>Crossover</i>	51
4.1.5 Mutação	51
4.1.6 Análise das Restrições	51
4.1.7 Avaliação, Classificação e Seleção	52
4.1.8 Finalização	52
4.2 DEMONSTRAÇÃO	52
4.3 AVALIAÇÃO	54
4.3.1 Desempenho	54
4.3.2 Facilidade de Uso	54
4.3.3 Operacionalidade	56

4.3.4	Generalidade .....	58
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>60</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>62</b>
	<b>Apêndice A – ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E SISTÊMICA .....</b>	<b>66</b>
A.1	INTRODUÇÃO .....	66
A.2	ASPECTOS METODOLÓGICOS .....	67
A.3	SELEÇÃO DO PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO .....	67
A.4	ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DO PORTFÓLIO .....	69
A.5	ANALISE SISTÊMICA DO PORTFÓLIO .....	72
A.6	CONCLUSÃO .....	74
	<b>Apêndice B – CÓDIGO .....</b>	<b>75</b>
B.1	PRINCIPAL .....	75
B.2	FUNÇÕES .....	75

## 1 INTRODUÇÃO

O setor agrícola está celeremente sofrendo mudanças no cenário mundial, tendo como pivô a competitividade do setor. As pequenas fazendas (geralmente de produção familiar) tem perdido lugar para as grandes fazendas (geralmente pertencentes a empresas). Assim, os agricultores estão cada vez mais preocupados com estratégia e inovação, buscando maior produtividade e maiores lucros (BARTH; MELIN, 2018). Nesse contexto, a automatização e mecanização da agricultura acabam sendo as principais alternativas (LU, 2009).

Para atender as expectativas do mercado, os agricultores precisam de um maquinário a um preço acessível, forçando a indústria a fornecer produtos com um maior custo-benefício. Dessa forma, avanços tecnológicos na manufatura ajudam a reduzir custos e aumentar a produtividade (BAUMERS et al., 2016). Segundo Ghobakhloo e Ching (2019), a concorrência está forçando indústrias de todos os tamanhos a utilizar sistemas de manufatura mais inteligentes, abrindo espaço para Indústria 4.0.

Em 2011, surgiu na Alemanha o conceito de Indústria 4.0 com o propósito de desenvolver a economia alemã. Sua principal característica é a criação de Sistemas Cyber Físicos (CPS). Esses sistemas são baseados na integração de conhecimento em conjunto com os diversos dados presentes nas empresas. A função principal do CPS é cumprir os requisitos da produção de maneira ágil e deixar a empresa mais eficiente (LU, 2017). Segundo Roblek, Meško e Krapež (2016) a indústria 4.0 se divide em cinco aspectos principais: digitalização, otimização e customização da produção; automação e adaptação; interação homem máquina; serviços e negócios com valor agregado; e por fim, comunicação e troca de dados automaticamente.

O presente trabalho foi inspirado em um problema exposto por uma empresa parceira que produz máquinas agrícolas. O setor responsável pelo corte de chapas metálicas relatou o desejo melhorar seu Planejamento de Produção (PP) e reduzir desperdícios. O PP é um elemento fundamental no controle de gastos de uma empresa. O PP determina a quantidade e a ordem de produtos a serem produzidos para atender uma demanda em um determinado horizonte de tempo (CHO; JEONG, 2017). Segundo Kilger, Reuter e Stadtler (2008), PP é uma das mais importantes decisões estratégica que uma empresa pode tomar. Dessa forma, um grande número de modelos de otimização tem sido utilizados para encontrar o melhor, ou

próximo do melhor, PP possível (DU; GUO, 2016).

Dado o problema, foi formulada a seguinte pergunta de pesquisa: **como otimizar o planejamento de produção no setor de corte de chapas de uma empresa que produz máquinas agrícolas, de forma a reduzir o desperdício de matéria-prima?**

Diversos trabalhos já utilizaram algum modelo de otimização para encontrar melhores resultados no PP. Como apoio ao presente trabalho, foi realizada uma análise bibliométrica e sistêmica, que pode ser encontrada no Apêndice A, referente ao uso de otimização no planejamento de produção. Para tal, foi realizada uma extensiva análise sobre o assunto, em diversas bases de dados, buscando artigos publicados a partir de 2015.

O PP possui inúmeros problemas que podem ser abordados. Uma dessas abordagens é o Planejamento de Produção Agregado (APP). Essa é uma técnica que busca encontrar a melhor forma de atender uma demanda prevista com os recursos disponíveis (CHAKRABORTTY et al., 2015). O APP busca determinar o nível ótimo de produção, estoque e operadores em horizontes de tempo maiores que 1 mês (AL-E-HASHEM; ARYANEZHAD; SADJADI, 2012). Em seu estudo, Chakraborty et al. (2015) utilizaram uma técnica de Inteligência Artificial (AI) chamada Otimização por Enxame de Partículas (PSO) para solucionar um problema de APP. Eles buscavam maximizar a possibilidade de obter o menor custo total e minimizar o risco de obter o maior custo total.

Quanto maior a carga utilizada em uma máquina, maior é a possibilidade de ocorrer uma falha. Assim, a taxa de produção acaba sendo reduzida. Gajpal e Nourelfath (2015) propuseram duas soluções heurísticas para um problema que integra PP com distribuição de carga. O objetivo deles era minimizar a soma dos custos de manutenção, pedidos em atraso, custos de configuração, custos de alteração de capacidade e custos de capacidade não utilizada, buscando satisfazer a demanda no horizonte de tempo requerido.

Torkaman, Ghomi e Karimi (2018) também trabalharam com PP em uma linha de produção híbrida com economia circular. Foi utilizada Programação Inteira Mista (MIP) para formular um modelo que levava em consideração os produtos novos e remanufaturados. Como este problema é *NP-Hard*, para resolvê-lo foi utilizado o algoritmo híbrido *Simulated Annealing* (SA), que para preparar uma solução inicial apropriada utilizou *Genetic Algorithm* (GA).

De maneira geral, sistemas de produção estão expostos a incertezas, como tempo de inatividade (por exemplo devido a uma manutenção de emergência), problemas de qualidade e problemas de rendimento (acima ou abaixo do esperado) (HU; DUENYAS; KAPUSCINSKI, 2008). Ji, Wang e Hu (2016) pesquisaram a forma de otimizar um PP para um período de tempo único em uma montadora de celulares chinesa. O objetivo do estudo era a redução de custos.

Esse problema contava com uma demanda aleatória e incertezas tanto na produção quanto na capacidade de montagem.

Segundo Lin et al. (2016) as indústrias de ferro e aço, consideradas os pilares da indústria, estão atentas as inovações tecnológicas no setor, buscando uma produção sensível aos movimentos do mercado. Lin et al. (2016) buscaram solucionar um problema de PP em uma indústria de fundição que produz chapas de aço. Três eram as dificuldades principais: variáveis de decisão de larga escala, parâmetros incertos e vários objetivos a serem atingidos. Para solucionar o problema, foi proposta uma abordagem envolvendo um modelo de otimização utilizando algoritmo evolutivo.

Problemas de corte estão diretamente ligados com problemas de PP. Geralmente a formatação do layout das placas a serem cortadas, são feitas apenas levando em consideração lotes individuais. Visando solucionar um problema desse tipo, Poldi e Araujo (2016) desenvolveram uma função cujo objetivo era a minimização de custos. Foram considerados os custos dos materiais desperdiçados, os custos de estocagem, o número de peças em estoque, corte feitos em apenas uma dimensão e um horizonte de tempo que contemplava vários lotes de peças. No final, os experimentos computacionais mostraram que essa análise por horizonte de tempo tem melhores resultados que uma análise lote a lote. Os pesquisadores também sugerem como trabalho futuro, estender a solução por eles encontrada para um problema de corte em duas dimensões.

Visando solucionar o problema da empresa parceira e contribuir para a expansão do conhecimento científico, o presente trabalho busca desenvolver um método que auxilie na formulação do PP, no setor de corte de chapas de uma empresa produtora de máquinas agrícolas e reduza a quantidade de resíduos gerados. Dessa forma, foi utilizado Algoritmo Genético (GA) na construção do método.

Este projeto de pesquisa faz parte do Programa de Manufatura Inteligente, integrante do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Esse programa corresponde a um grupo de pesquisa que busca soluções aplicadas na análise de custo e risco orientado por requisitos, além de outras demandas ligadas ao setor industrial. O grupo trabalha em regime de parceria com empresas, em sua maioria multinacionais, e com a aplicação direta em seus respectivos contextos, buscando sempre melhorar a competitividade das empresas parceiras e contribuir para a expansão do conhecimento científico.



## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do presente trabalho consiste em construir um método utilizando um algoritmo meta-heurístico, que contribua para a formulação de um plano de produção que reduza a quantidade de resíduos gerados no setor responsável por corte de chapas em uma indústria de máquinas agrícolas.

### 1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atender ao objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- O.1) Identificar variáveis que podem influenciar na redução de resíduos gerados no setor de corte de chapas da empresa;
- O.2) Levantar e comparar as principais técnicas de construção de um modelo de otimização, usando conceitos da indústria 4.0, como AI, e levantar as ferramentas computacionais disponíveis para esta análise;
- O.3) Construir o método;
- O.4) Demonstrar a aplicação do método por meio de provas de conceito no contexto da empresa parceira; e
- O.5) Avaliar o método quanto ao seu desempenho, facilidade de uso, operacionalidade e generalidade.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O mundo está passando por dois eventos chave para o desenvolvimento deste trabalho. O primeiro evento é a grande competição existente entre as empresas, o que força os gerentes a procurarem soluções inteligentes em suas fábricas, buscando reduzir custos e aumentar a produtividade (GHOBAKHLOO; CHING, 2019). O segundo evento é o crescimento da consciência ambiental, os recursos do planeta são limitados, e para perpetuação da espécie será necessário um crescimento sustentável (SINGHAL; TRIPATHY; KUMAR, 2020).

O presente estudo busca desenvolver um método que forneça um PP que reduza a quantidade de resíduos gerados no processo de cortes de chapas. Além da aplicação prática,

ao realizar a análise bibliométrica e sistêmica presente no Apêndice A, é possível notar que existe diversas oportunidades de pesquisas sobre PP e aplicações na indústria 4.0. Pode-se destacar que frequentemente os modelos de otimização de PP são *NP-Hard*. Assim, uma das formas de contornar esse problema é a utilização de AI para encontrar uma solução em tempo hábil, colaborando para aumentar a robustez do trabalho.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos. No primeiro capítulo, a seção de introdução apresenta o contexto do planejamento de produção e como modelos de otimização tem auxiliado nesse processo. Neste capítulo, também são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos a serem atingidos com a realização do trabalho e a justificativa do porquê a proposta resolve o problema. No segundo capítulo é realizada a fundamentação teórica para auxiliar a compreensão da pesquisa. Em seguida, no terceiro capítulo são expostos os aspectos metodológicos do trabalho. No quarto capítulo é apresentado como foi o processo de desenvolvimento da solução, e os resultados encontrados. No quinto capítulo é realizada a conclusão do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é realizada a fundamentação teórica dos assuntos abordados ao longo da dissertação. O capítulo está dividido em quatro seções. Na Seção 2.1 são apresentados conceitos de Planejamento de Produção. Em seguida, na Seção 2.2 é realizada uma explanação sobre Pesquisa Operacional. Na sequência, a Seção 2.3 apresenta as principais características sobre Indústria 4.0. A Seção 2.4 aborda os conceitos de Inteligência Artificial. E por fim, a Seção 2.5 apresenta os conceitos básicos sobre meta-heurística.

### 2.1 PLANEJAMENTO DE PRODUÇÃO

O planejamento existe devido a inércia intrínseca nos processos decisórios. Esta inércia representa o período entre a tomada de uma decisão e seu efeito. Em um mundo ideal, em que as decisões tomadas têm efeito imediato, não seria necessário a existência de planejamento. Como este não é o caso, diferentes decisões podem possuir diferentes tempos de resposta. Dessa forma, é preciso realizar conjecturas para tomar decisões adequadas que produzam os resultados desejados no futuro. Para produzir um planejamento eficiente é necessário possuir sistemas de previsão eficazes, conhecer o presente com precisão e possuir objetivos claros a serem atingidos. A dinâmica do processo de planejamento pode ser dividida em cinco passos (CORRÊA; GIANESI; CAON, 2001). Os passos são apresentados a seguir:

- Passo 1: Levantamento da situação presente;
- Passo 2: Desenvolvimento e reconhecimento do futuro, com ou sem intervenção;
- Passo 3: Tratamento conjunto da situação presente e da estimativa do futuro por alguma lógica, transformando esses dados em informação para tomadas de decisão;
- Passo 4: Tomada de decisão com base nas informações disponibilizadas pelo sistema; e
- Passo 5: Execução do plano. Alguns eventos não irão acontecer como o planejado, sendo necessário retornar ao Passo 1.

O PP engloba tanto o planejamento de aquisição de recursos e matéria-prima, quanto o planejamento das atividades de produção necessárias para transformar a matéria-prima em

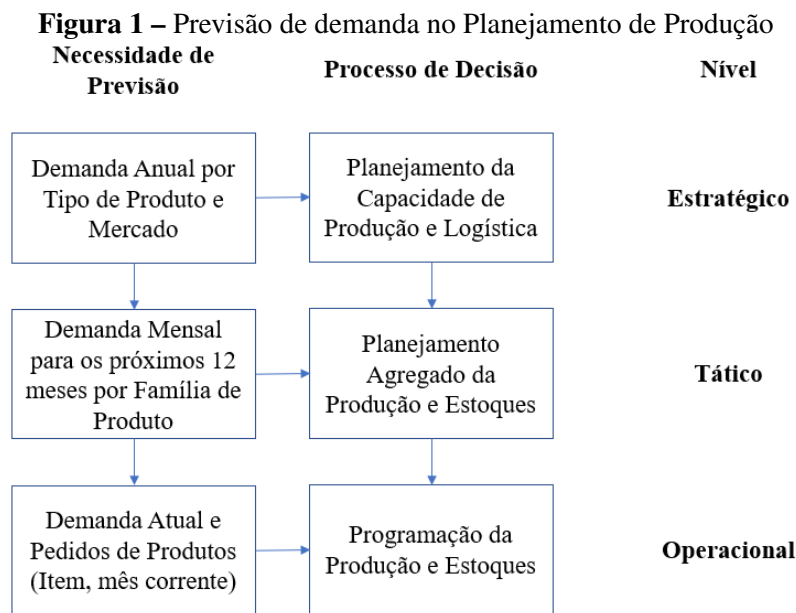
produtos, atendendo as expectativas do cliente da forma mais eficiente possível. O PP pode ter vários objetivos, e.g., minimização de custos, maximização de lucros, e objetivos menos tangíveis como aumentar a satisfação do cliente. Os PP estão ficando mais sofisticados, contribuindo para deixar a produção mais flexível e eficiente. Assim, frequentemente é utilizado modelos matemáticos para formular o PP. Contudo, para solucionar esses modelos em um tempo aceitável, e permitir que o modelo apresente soluções ótimas, ou quase ótimas, é necessário o uso de algoritmos de otimização mais eficientes (POCHET; WOLSEY, 2006).

Constantemente o PP é associado com o controle de produção, gerando o conceito: Planejamento e Controle de Produção (PP&C). Neste caso, além do planejamento, é feito o acompanhamento dos efeitos das decisões tomadas a princípio, e são executadas correções se necessário. O PP&C impacta nos custos vistos pelo cliente, na velocidade de entrega, na confiabilidade das entregas, na flexibilidade das saídas, na qualidade do produto e no serviço prestado ao cliente (CORRÊA; GIANESI; CAON, 2001). Outro conceito que frequentemente é associado com PP é a programação de produção, que determina o tempo e a sequência que as tarefas são realizadas na linha de produção, e os recursos necessários para a realização destas tarefas (e.g., pessoas, máquinas e ferramentas) (ARTIBA; ELMAGHRABY, 1996).

A falta de materiais e insumos de produção, quando necessários, pode fazer o processo não atender a demanda. Em contrapartida, um estoque elevado aumenta o custo de manutenção do estoque. Dessa forma, o Planejamento das Necessidades de Materiais (MRP) é um sistema de planejamento de necessidade de materiais que equilibra o PP e o estoque. Contudo, o fato de o MRP não considerar os recursos de produção é um problema, pois os PP gerados podem ser inviáveis devido a capacidade finita de recursos. Logo, surgiu o Planejamento de Recursos de Manufatura (MRP II), que em sua análise considera os recursos de produção como operadores, máquinas e capital. Com a internacionalização do comércio e nascimento das grandes empresas multinacionais, foi necessária a criação de um sistema único e integrado, capaz de tratar e gerenciar a maioria dos processos de negócios das áreas funcionais de uma empresa. Esse sistema ficou conhecido como Planejamento de Recursos Empresariais (ERP). O ERP permite a interação e troca de informações entre os sistemas especializados pertencentes a sua estrutura, como os de contabilidade, fiscal, comercial, logística e produção (LUSTOSA; MESQUITA; OLIVEIRA, 2008).

A previsão de demanda é um item fundamental para o planejamento de uma empresa. Essas informações guiarão as tomadas de decisões financeiras, comerciais e operacionais da companhia. As previsões de demanda sempre incluem uma margem de erro, pois quanto maior o horizonte de planejamento maiores são as incertezas em relação à demanda. Existem três níveis de previsão: estratégico, tático e operacional. Nos níveis estratégico e tático,

são utilizados dados agregados por famílias de produtos, ao invés de item a item, pois é necessário reduzir as incertezas das decisões de longo prazo. O objetivo do planejamento agregado é garantir que os recursos básicos de produção estarão disponíveis, quando a decisão da quantidade de cada produto que será produzido for tomada. Já no nível operacional, estas informações necessitam ser bem detalhadas, visando alcançar as metas de produção e estoque (LUSTOSA; MESQUITA; OLIVEIRA, 2008). A Figura 1 apresenta os níveis de previsão de demanda.



**Fonte:** Lustosa, Mesquita e Oliveira (2008)

Frequentemente o processo de corte de matéria-prima, e o dimensionamento de lotes influenciam na formulação do PP das empresas. O processo de corte consiste em cortar matéria-prima, com o objetivo de produzir peças menores. O processo de dimensionamento de lotes busca decidir quantos produtos de cada tipo precisam ser produzidos em um horizonte de tempo. Quando é formulado um PP considerando o processo de corte e o processo de dimensionamento de lote, de maneira combinada, e utilizando um método eficiente para o tratamento desses dados, é possível obter ganhos significativos, quando comparado com as práticas comuns da indústria, que por sua vez, basicamente resolve esses problemas em sequência (GRAMANI; FRANÇA; ARENALES, 2011).

Para formular um PP, é necessário considerar uma grande quantidade de fatores. Quanto mais detalhado for o modelo de planejamento, maior será a possibilidade de obter um PP mais eficiente. Nesse sentido, a Pesquisa Operacional (OR) vem sendo uma ferramenta essencial para desenvolver planos de produção que apresentem melhores resultados. Dado que, a OR

busca alocar recursos de maneira mais eficiente.

## 2.2 PESQUISA OPERACIONAL

O surgimento da Pesquisa Operacional (OR) é atribuído a iniciativas militares na segunda guerra mundial. A alocação de recursos escassos de maneira efetiva, era primordial para a sobrevivência das tropas aliadas. Após o término do conflito, foram percebidas as inúmeras possibilidades de aplicação de OR para organizações civis. Nesse período, houve a aceleração do crescimento industrial, deixando as operações fabris muito complexas, gerando um cenário ideal para a propagação de OR. Assim, várias sociedades profissionais difusoras do conhecimento em OR surgiram pelo mundo. O desenvolvimento do método *Simplex* por George Dantzig, em 1947, para resolução de problemas de programação linear, e a popularização dos computadores, foram fomentadores da expansão do uso de OR (MOREIRA, 2010).

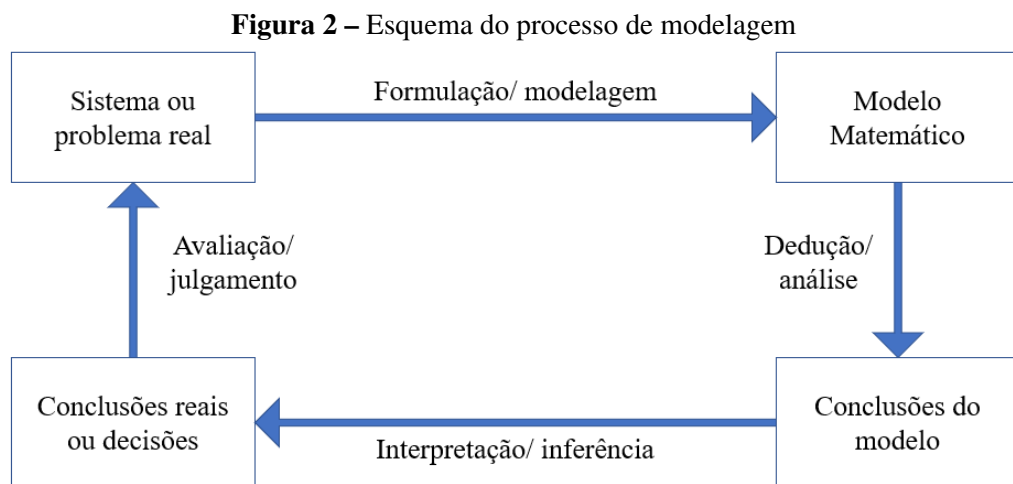
A OR trata problemas relativos à coordenação e condução das operações em uma organização. Sendo a natureza da organização inteiramente secundária. Dessa forma, a OR possui uma extensa gama de aplicações. Algumas das áreas que já possuem aplicações em OR são manufatura, construção, transporte, planejamento financeiro e assistência médica. Outra característica frequente de problemas de OR, é a tentativa de encontrar uma melhor solução, também conhecida como a solução ótima. Devido à complexidade e multidisciplinaridade dos problemas de OR, frequentemente a solução é desenvolvida por uma equipe de especialistas, que pode conter matemáticos, físicos, engenheiros, administradores, entre outros profissionais necessários para as particularidades de cada problema (HILLIER; LIEBERMAN, 2010).

Segundo Passos (2008), a OR possui diferentes técnicas. Algumas delas são:

- Programação Linear – busca maximizar ou minimizar os resultados de um problema, sujeitando-se a certas restrições. Todas as equações e inequações são lineares;
- Programação Inteira – é a programação matemática que possui apenas variáveis com valores inteiros;
- Programação Inteira Mista – é a programação matemática que possui variáveis com valores inteiros e contínuos;
- Programação Dinâmica – procura verificar a trajetória temporal das variáveis dentro de um determinado período;
- Teoria das Filas – trata problemas de congestionamento de sistemas, ou seja, diminuição do tempo de espera para atendimento;

- Teoria dos Grafos – busca otimizar problemas que buscam o caminho mais curto, árvore de ligação e mínima e roteirização de veículos;
- Simulação – através de modelos representativos de sistemas, verifica o comportamento das variáveis; e
- Teoria dos Jogos – é um problema de otimização em que as partes envolvidas usam estratégias para convencer o oponente. É muito utilizada em negociações econômicas e políticas.

A matemática tem um papel fundamental na descrição de fenômenos naturais, sociais e econômicos. Dessa forma, são buscadas leis que regem esses fenômenos, e que se puderem ser descritas em relações matemáticas, dão origem aos modelos matemáticos. Neste caso, modelo é um objeto abstrato que procura imitar as principais características de um objeto real. Para a criação desses modelos, simplificações do sistema que se deseja representar devem ser consideradas. O modelo deve ser detalhado a ponto de captar os elementos essenciais do problema e, simultaneamente, ser suficientemente tratável por métodos de resolução. A validação do modelo matemático deve ser coerente com o contexto original (ARENALES et al., 2007). A Figura 2 apresenta um esquema do processo de modelagem.



**Fonte:** Arenales et al. (2007)

Para a construção de um modelo matemático de um problema de negócios, são descritas equações, inequações e expressões matemáticas que extraiam sua essência. As decisões quantificáveis a serem feitas, são representadas por variáveis de decisão. A medida de desempenho do problema é expressa como uma função dessas variáveis, sendo chamada de função objetivo. As limitações inerentes ao problema são denominadas restrições. Os elementos

que são constantes tanto nas restrições quanto na função objetivo são denominados parâmetros. É importante salientar que coletar dados precisos é uma tarefa difícil. Assim, os valores dos parâmetros, em muitos casos, são estimativas. Gerando a necessidade de realizar análises de sensibilidade, modificando os parâmetros para outros valores plausíveis, e verificando a influência que esta mudança causa nos resultados (HILLIER; LIEBERMAN, 2010).

Apesar de não existir um consenso entre o número de fases definidas em um estudo de OR, devido as características intrínsecas de cada problema, normalmente o estudo de OR pode ser dividido em seis fases, que interagem entre si, e são mutuamente dependentes. As fases segundo Passos (2008), são:

- Identificação ou determinação do problema: é determinado exatamente o que se deseja fazer;
- Estudo do problema: são coletados todos os dados disponíveis para a resolução do problema. Evitando os dados que não estão diretamente ligados ao problema;
- Construção do modelo: são criadas as interações entre os dados e informações do problema. No caso da criação de um modelo matemático, essas interações são feitas por meio de equações e inequações;
- Resolução do modelo: normalmente é empregado o *Simplex* em associação com procedimentos de busca em árvore como o *Branch-and-Bound*, contudo diferentes técnicas de AI tem ganho importância.
- Validação do modelo: é realizada uma comparação entre o que está ocorrendo na realidade e os resultados apresentados pelo modelo; e
- Implementação dos resultados do modelo: após as etapas anteriores serem verificadas com precisão, o modelo é implementado e, se necessário, correções são realizadas.

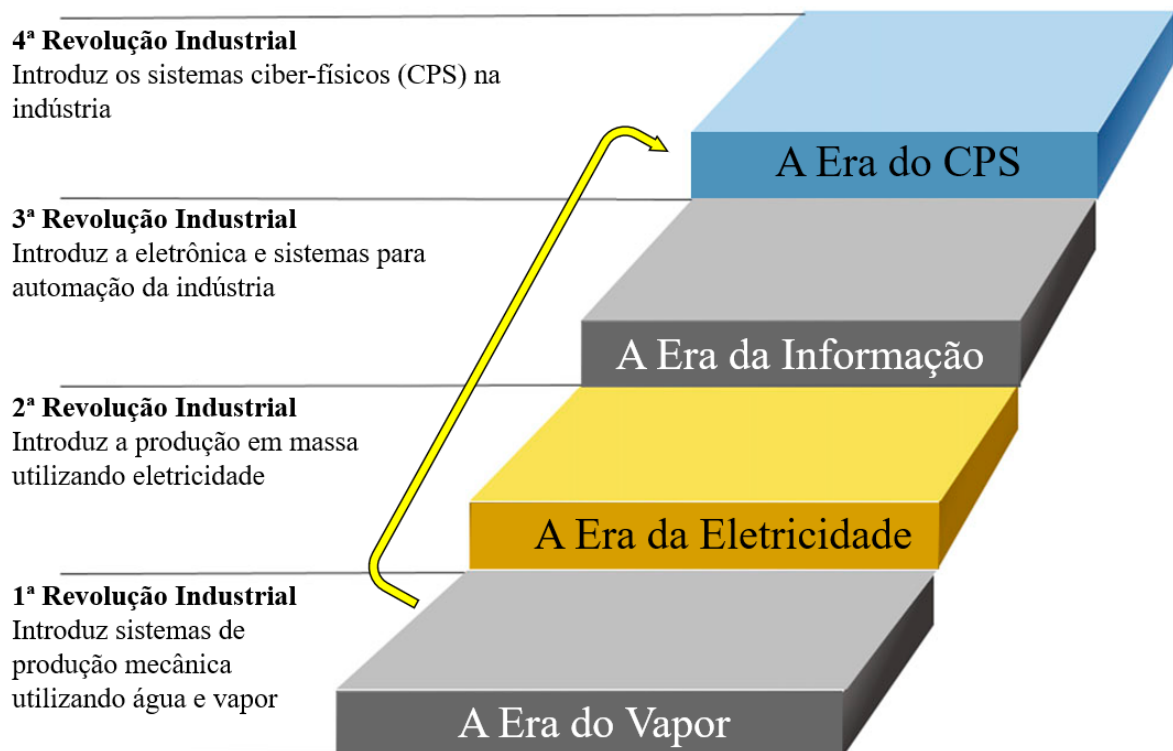
Dependendo do número de fatores considerados em um modelo, métodos de otimização convencionais de OR, como o *Simplex*, podem não conseguir encontrar uma resposta em um curto período. Nesse sentido, é necessário a utilização de técnicas mais sofisticadas. Assim, no contexto da Indústria 4.0, sugere-se o uso de uma série de ferramentas que auxiliam na solução de problemas complexos de OR.



## 2.3 INDÚSTRIA 4.0

O termo indústria 4.0 foi introduzido pela primeira vez na feira de Hannover (Alemanha) em 2011. E em 2013, o termo se tornou uma iniciativa oficial da Alemanha com o intuito de revolucionar o setor de manufatura (XU; XU; LI, 2018). A primeira revolução industrial iniciou-se no final do século XVIII, e foi marcada pelo uso de máquinas movidas a água e a vapor nas indústrias. A segunda revolução industrial ocorreu no início do século XX, e sua principal característica foi a produção em massa utilizando energia elétrica. A terceira revolução industrial ocorreu na década de 1970, nesse contexto, começou-se a utilizar automação, eletrônica e internet nas fábricas. Por fim, a quarta revolução industrial, ou mais usualmente conhecida como indústria 4.0, caracterizada pela utilização de CPS, com base na integração e conhecimento de dados que podem vir dos mais variados lugares (LUKAČ, 2015). A Figura 3 apresenta a evolução da primeira para a quarta revolução industrial.

**Figura 3** – Evolução da manufatura ao longo das Revoluções Industriais



Fonte: Xu, Xu e Li (2018, tradução nossa)

Existe uma exigência na indústria para deixar os processos mais inteligentes e digitalizados (VAIDYA; AMBAD; BHOSLE, 2018). A indústria 4.0 tem emergido como um promissor *framework* de tecnologia usado para integrar e estender os processos de manufatura, tanto a nível intraorganizacional, quanto a nível inter-organizacional. Os avanços da quarta

revolução industrial estão gerando uma série de soluções para as crescentes necessidades de informatização nas indústrias. Muitas empresas ao redor do mundo tem experimentado os benefícios de digitalizar e informatizar suas fábricas (XU; XU; LI, 2018).

Para adquirir maior eficiência e competitividade a níveis globais, as empresas precisam adotar as práticas da indústria 4.0. Já é consenso a necessidade de aplicá-la em empresas que desejam obter sucesso no longo prazo em um ambiente global (XU; XU; LI, 2018). O conceito de indústria 4.0 é baseado na integração de informação, tecnologias de comunicação e CPS, com a intenção de promover uma fábrica mais digitalizada, customizável, inteligente e sustentável (ZHOU; LIU; ZHOU, 2016). Sensores inteligentes, AI e análise de dados são utilizados para otimizar a manufatura em tempo real (XU; XU; LI, 2018).

A indústria 4.0 propõem construir um sistema de produção super flexível de produtos e serviços personalizados, com interações em tempo real entre pessoas, produtos e dispositivos no processo de produção (ZHOU; LIU; ZHOU, 2016). Dessa forma, a indústria 4.0 possui nove pilares que buscam transformar células isoladas de produção em um processo de produção totalmente integrado, automatizado e otimizado. Os nove pilares, segundo Vaidya, Ambad e Bhosle (2018), estão listados a seguir:

- *Big Data and Analytics*: é a coleta e avaliação de dados de diferentes fontes para auxiliar tomadas de decisão em tempo real.
- Robôs Autônomos: são utilizados para realizar tarefas de forma mais autônoma, precisa, versátil e segura. Podem trabalhar cooperativamente com os operadores, e atuar em lugares onde humanos não podem.
- Simulação: será mais utilizada para espelhar plantas de produção em tempo real. Auxilia na realização de mudanças, redução de falhas e tomada de decisões.
- Integração vertical e horizontal de sistemas: propõe a integração horizontal de toda rede de criação de valor, a integração vertical de todo o sistema de manufatura e a integração ao longo de todo o ciclo de vida do produto.
- Internet das coisas (IoT): é uma rede mundial de objetos interconectados e uniformes, que se comunicam através de protocolos padrões.
- CPS e ciber-segurança: CPS são sistemas físicos integrados com sistemas computacionais, em que a comunicação e controle é realizada de maneira digital. Assim, com o aumento da conectividade, é necessidade de proteger os sistemas aumentou, ampliando os estudos em ciber-segurança.

- Nuvem: é responsável por sustentar a conexão e comunicação dos vários elementos pertencentes a uma empresa.
- Manufatura aditiva: ajuda na produção de pequenos lotes de produtos customizados, e auxilia a produção de projetos mais complexos e protótipos.
- Realidade aumentada: provê para os operários informações em tempo real que ajudam no processo de tomada de decisão. Possui diversas aplicações, e.g., selecionar peças nos depósitos e enviar instruções de manutenção de uma máquina.

Uma das principais ferramentas da Indústria 4.0 é a AI. Ela é essencial para o processamento e interpretação da grande quantidade de dados disponíveis nas empresas e é altamente utilizada em robôs autônomos. A AI tem um papel importante no desenvolvimento de tecnologias de realidade aumentada, sendo fundamental no processo de identificação de imagens. Além disso, é fortemente utilizada para a solução de modelos de otimização.

## 2.4 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

O primeiro passo para definir AI, seria definir o que é inteligência. Contudo, essa é uma questão complexa, e que não possui uma resposta definida. Dessa forma, o mais próximo da definição de inteligência seria pelas propriedades que ela possui (COPPIN, 2010). Segundo Lima, Pinheiro e Santos (2014), de forma geral, sistemas inteligentes são aqueles que apresentam capacidades como:

- Aquisição de conhecimentos;
- Planejamento de eventos;
- Resolução de problemas;
- Representações de informações;
- Armazenamento de conhecimento;
- Comunicação através de linguagens coloquiais; e
- Aprendizado.

Dessa forma, AI poderia ser definido como um ramo das ciências da computação que se preocupa em desenvolver a automação do comportamento inteligente. AI ainda é uma ciência

muito nova se comparada a ciências mais maduras como a física. E as pesquisas realizadas em AI se preocupam mais com a expansão das ciências da computação, do que com a definição dos limites desta ciência. Um dos primeiros pesquisadores a estudar sistemas inteligentes foi Alan Turing. Ele criou um teste empírico chamado o jogo da imitação, e que ficou conhecido como Teste de Turing, que busca medir a performance de uma máquina supostamente inteligente contra um ser humano. Para a realização do teste, um interrogador é colocado em um ambiente isolado, e em outro ambiente são colocados a máquina e um segundo ser humano. Dessa forma, o interrogador deve interagir com a máquina e o humano por mensagens de texto. Se no final do teste, o interrogador não conseguir distinguir quem é a máquina e quem é o humano, Turing afirma que a máquina em questão é inteligente (LUGER, 2005).

Devido a sua plasticidade, AI pode ser aplicada em diversas áreas diferentes. A seguir são apresentadas algumas de suas aplicações segundo Luger (2005):

- Modelos biológicos e sociais de inteligência;
- Resolução de jogos;
- Raciocínio automatizado e prova de teoremas;
- Sistemas especialistas;
- Compreensão de linguagem natural e semântica;
- Modelagem de desempenho humano;
- Planejamento e robótica;
- Aprendizado de Máquina; e
- Representações alternativas: redes neurais e algoritmo genético.

Simon (1983) define aprendizado como “qualquer mudança em um sistema que o permite performar melhor na repetição de uma mesma tarefa ou outra tarefa desenhada a partir da mesma população”. Dessa forma, é possível inferir que o aprendizado precisa envolver a generalização da experiência. Na maioria dos problemas de aprendizado, não existe uma gama de dados suficiente que garanta uma generalização ótima. Dessa forma, é necessário utilizar heurísticas e meta-heurísticas que buscam selecionar as principais mudanças do sistema, para produzir os melhores resultados no futuro. É importante ressaltar que selecionar as mudanças que vão melhorar a performance do sistema é extremamente complicado, e que eventualmente essas mudanças podem reduzir a performance do sistema. Assim, é necessário

incluir no processo de aprendizado do sistema artificiais que previnam e detectem esse tipo de comportamento. Algumas das técnicas mais utilizadas para aprendizado de máquina são redes neurais e GA (LUGER, 2005).

## 2.5 META-HEURÍSTICA

De maneira geral, as empresas buscam constantemente fornecer produtos e serviços com os menores custos, mas que ao mesmo tempo, cumpram requisitos suficiente para atingir um bom retorno financeiro. Buscando solucionar este tipo de situação é que surge a otimização. Este termo se refere ao estudo de problemas que buscam minimizar ou maximizar uma função, sistematicamente alterando os valores de variáveis (KAVEH, 2017).

Em muitos problemas pode ser encontrado o resultado ótimo por meio de métodos como o *Simplex*. Contudo, segundo Gogna e Tayal (2013) a maioria dos problemas do mundo real são complexos, cheio de variáveis não lineares e interdependentes e com um largo espaço para a busca de solução. Dessa forma, métodos mais tradicionais de OR acabam precisando de muito esforço computacional e tempo para encontrarem respostas. Uma das formas de contornar essas questões é utilizando algoritmos meta-heurísticos.

O termo heurístico deriva do grego *heuriskein*, que significa a arte de descobrir novas estratégias para solucionar problemas. E o sufixo *meta*, também deriva do grego significando uma metodologia de alto nível. Um método heurístico busca a resolução para problemas, em um amplo espaço de solução, sem necessariamente encontrar a resposta ótima. Apesar de que métodos heurísticos bem construídos conseguirem respostas muito próximas do valor ótimo, devido sua própria construção, podem acabar sendo direcionados para mínimos locais na busca pela solução. Dessa forma, surgem os algoritmos meta-heurísticos. Estes métodos buscam se aprofundar em soluções locais, contudo, constantemente adicionam variáveis fora desse espaço de solução, havendo assim a possibilidade de migrar para outros espaços de solução, com resultados mais próximos do ótimo (KAVEH, 2017).

Os algoritmos meta-heurísticos podem ser aplicados em diversas áreas, como na engenharia, matemática, medicina, economia e outras ciências. E existem diversos tipos de algoritmo, que podem ser utilizados conforme a situação. Podem ser listados:

- *Simulated Annealing*: este algoritmo é baseado em um processo termodinâmico, em que uma substância é aquecida e em seguida é resfriada gradualmente buscando obter uma estrutura cristalina e de alta resistência. O algoritmo possui uma solução inicial, e a cada iteração, uma solução vizinha a esta é escolhida aleatoriamente. Se a solução vizinha

obtiver melhores resultados na função objetivo, a solução é substituída. Se não, é decidido por meio de uma função de probabilidade, se a solução vai ser substituída ou não. Esta decisão auxilia o algoritmo a fugir de mínimos locais. E as iterações encerram quando um critério de parada é atingido (GOGNA; TAYAL, 2013).

- *Tabu Search*: este é um algoritmo de busca local. Ele utiliza a informação acumulada durante as iterações para fazer o processo de busca mais eficiente. Assim como o *Simulated Annealing*, ele aceita soluções que apresentam resultados piores para a função objetivo, durante o processo de busca. Contudo, o Tabu Search procura soluções em toda a vizinhança de maneira determinística, diferente do *Simulated Annealing*, que utiliza uma busca aleatória. Este algoritmo também armazena as soluções por onde passou, não sendo possível selecionar esta solução novamente durante as iterações (GOGNA; TAYAL, 2013).
- *Particle Swarm Optimisation*: este algoritmo busca mimetizar o comportamento de bandos de pássaros ou cardumes. A solução é composta por várias partículas dispostas aleatoriamente. Essas partículas da solução vão sendo movimentadas, e assim, vão recebendo um *feedback*, buscando melhorar os resultados em relação a função objetivo. Dessa forma, cada partícula armazena as posições que obteve melhor desempenho. Durante esse processo, perturbações no movimento das partículas ocorrem, tentando diminuir o efeito de mínimos locais (KAVEH, 2017).
- *Genetic Algorithm*: o GA busca mimetizar a teoria da evolução para a resolução de problemas. Cada solução gerada nesse processo é conhecida como um indivíduo. Esse indivíduo possui um cromossomo, que é o conjunto de informações que compõem uma possível resposta ao problema estudado, e o *fitness*, que é o valor usado para avaliar a qualidade da resposta. A princípio é gerado aleatoriamente um conjunto de  $n$  indivíduos, que é chamado de população. Este também fica conhecido como a primeira geração. Uma quantidade pré-determinada desses indivíduos, que ficam conhecidos como pais, são escolhidos para gerar novos indivíduos. Esses pais geram novos indivíduos, a partir da mistura dos cromossomos de dois pais selecionados de maneira aleatória. Estes novos indivíduos, também sofrem mutações, que são pequenas alterações realizadas de maneira aleatória em seus cromossomos. Após esse processo é calculado o *fitness* desses novos indivíduos criados. Esses novos indivíduos são concatenados aos indivíduos da primeira geração. Todos esses indivíduos são ordenados de acordo com seu *fitness*, e são selecionados os  $n$  primeiros indivíduos para fazer parte da nova população, também conhecida por segunda geração. E esse processo se repete até que um objetivo de *fitness* escolhido previamente seja alcançado, ou até que um número de gerações definido

inicialmente seja atingido (POLI et al., 2008). Segundo Mitchell (1997), GA tem sido utilizado com sucesso para solucionar problemas de otimização. Em alguns casos essas otimizações são multiobjetivos. Nesses casos, além do algoritmo de otimização, é necessário a utilização de algum método multicritério para tomada de decisão (DEB et al., 2002). Alguns dos métodos mais famosos são a Análise hierárquica do processo (AHP), Eliminação e escolha que expressa a realidade (ELECTRE) e Método de Organização de Classificação de Preferência para Avaliações de Enriquecimento (PROMETHEE) (ISHIZAKA; NEMERY, 2013).

- **Redes Neurais:** O desenvolvimento da técnica de aprendizado por redes neurais foi inspirado na observação da interação entre os neurônios. Pode-se dizer que existem dois grupos distintos de pesquisadores que trabalham com redes neurais. O primeiro se preocupa em construir modelos de redes neurais com o objetivo de compreender o processo de aprendizagem biológico. O segundo grupo busca obter bons resultados no processo de aprendizado de máquinas, independente se esses modelos são biologicamente precisos. Algumas das aplicações de redes neurais são o reconhecimento de caracteres escritos manualmente, reconhecimento de voz e reconhecimento facial (MITCHELL, 1997).

Todos os conceitos apresentados neste capítulo auxiliam na compreensão deste trabalho. A seção a seguir apresenta a abordagem metodológica utilizada para atingir os objetivos propostos neste estudo.

### 3 ASPECTOS METODOLÓGICOS

Nesse capítulo a abordagem metodológica utilizada no estudo é apresentada. A Seção 3.1 aborda a caracterização da metodologia de pesquisa empregada nesse projeto, a Seção 3.2, descreve o procedimento metodológico adotado.

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

Existem dois tipos de pesquisa no campo de tecnologia da informação (IT). O primeiro tipo é a pesquisa descritiva, que busca entender a natureza do IT. O segundo tipo é a pesquisa prescritiva, que tem o objetivo de melhorar a performance do IT (MARCH; SMITH, 1995). Este trabalho é caracterizado como uma pesquisa prescritiva, voltado a compreender como as coisas poderiam ser e como poderiam ser atingidos esses objetivos (HEVNER; CHATTERJEE, 2010).

A abordagem utilizada para conduzir esse estudo é a *Design Science Research* (DSR). Essa abordagem é válida pois pesquisas em engenharia prezam por soluções de problemas aplicáveis (PEFFERS et al., 2007). Mais do que produzir um conhecimento teórico, o DSR precisa produzir um conhecimento aplicável com objetivo de criar artefatos eficientes. Sendo este artefatos de quatro tipos: construções, modelos, métodos e instanciações (MARCH; SMITH, 1995). No Quadro 1 são apresentadas as características de cada tipo de artefato supracitado.

**Quadro 1** – Tipos de artefatos segundo o DSR

Artefato	Características
Construção	Forma o vocabulário de um domínio. Constitui a conceitualização utilizada para descrever um problema dentro de um domínio e especificar suas soluções.
Modelo	É um conjunto de proposições que expressa relações entre construções. É uma descrição como as coisas são, e.g., abstração ou representação.
Método	É um conjunto de passos usados para cumprir uma tarefa e.g., boas práticas e algoritmos.
Instanciação	Demonstra a viabilidade e eficácia dos modelos e métodos que ela contém, e.g., protótipos e implementações de sistemas.

**Fonte:** March e Smith (1995).

Fundamentalmente o DSR busca o conhecimento e compreensão de um problema de



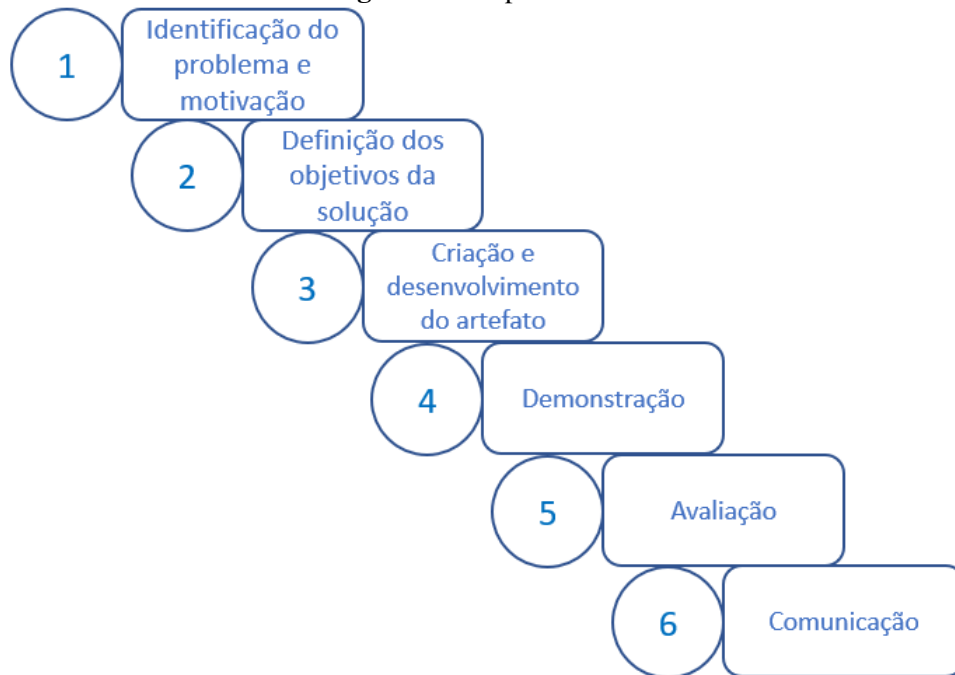
criação e sua solução através da construção e aplicação de um artefato. Dessa forma, sete diretrizes foram criadas para auxiliar revisores, redatores, pesquisadores e leitores a entender os requisitos de um DSR eficaz. Assim, devem utilizar sua criatividade e julgamento para determinar quando, onde e como utilizar cada diretriz em seus respectivos projetos de pesquisa (HEVNER et al., 2004). O Quadro 2 resume as sete diretrizes.

**Quadro 2 – Diretrizes para a condução do DSR**

Diretriz	Descrição
Criação do artefato	O DSR deve produzir um artefato viável na forma de uma construção, modelo, método ou instanciação.
Relevância do problema	O objetivo do DSR é desenvolver soluções baseadas em tecnologia para problemas comerciais importantes e relevantes.
Avaliação da criação	A utilidade, qualidade e eficácia de um artefato criado devem ser rigorosamente demonstradas através de uma avaliação bem executada.
Contribuição da pesquisa	Um DSR eficaz deve fornecer contribuições claras e verificáveis nas áreas de criação do artefato, fundamentos de criação e/ou avaliação do artefato criado.
Rigor da pesquisa	O DSR depende da aplicação de rigorosos métodos na criação e avaliação do artefato criado.
Criação como um processo de pesquisa	A pesquisa por um artefato eficaz requer a utilização dos meios disponíveis para atingir o objetivo desejado enquanto satisfaz as restrições do ambiente em que está inserido.
Comunicação da pesquisa	O DSR precisa ser devidamente apresentado tanto para um público voltado para a tecnologia quanto para um público voltado para a gestão.

**Fonte:** Hevner et al. (2004)

No presente trabalho foi desenvolvido um método. Este, é responsável por contribuir para a formulação de um plano de produção, que leve em consideração a demanda a ser atendida, os estoques de peças e que reduza a quantidade de resíduos gerados no processo de corte de chapas de uma empresa produtora de máquinas agrícolas. Para a criação deste artefato foram utilizadas as seis etapas do DSR. Na Figura 4 são apresentadas as seis etapas do DSR, e na sequência é exposta a definição de cada uma destas etapas segundo Peffers et al. (2007).

**Figura 4 – Etapas do DSR**

**Fonte:** Adaptação de Peffers et al. (2007).

- Etapa 1 - Identificação do problema e motivação: é definido o problema de pesquisa e o valor de sua solução. Como a definição do problema vai ser usada para desenvolver um artefato, é necessário destrinchar o problema conceitualmente para que as soluções possam capturar sua complexidade;
- Etapa 2 - Definição dos objetivos da solução: são deduzidos os objetivos possíveis e eficazes para a solução do problema. Os objetivos podem ser quantitativos, e.g., situação em que a solução desejada será melhor do que as soluções existentes, ou qualitativos, e.g., uma descrição de como o novo artefato apoia soluções para problemas ainda não abordados;
- Etapa 3 - Criação e desenvolvimento: é criado o artefato. Conceitualmente o artefato pode ser qualquer objeto criado no qual uma contribuição de pesquisa está embutida em sua criação. Esta etapa inclui determinar a funcionalidade desejada o artefato, sua estrutura e posteriormente criar o artefato;
- Etapa 4 - Demonstração: é demonstrado o uso do artefato para resolver um ou mais problemas. Assim, para a demonstração pode ser utilizada experimentação, simulação, estudo de caso, prova, ou outra atividade mais apropriada para o artefato em questão;
- Etapa 5 - Avaliação: é observado e medido o quanto o artefato é eficaz em solucionar o problema. Nessa etapa os objetivos são comparados com os resultados encontrados

ao usar o artefato na demonstração. Dependendo da natureza do artefato, essa avaliação pode ser realizada de diversas formas. Podem ser realizadas comparações com outros artefatos, parecer de clientes, pesquisas de satisfação, simulações, análises quantitativas, e.g., número de itens produzidos. No fim dessa etapa, os pesquisadores podem decidir retornar a Etapa 3 para melhorar a eficácia do artefato; e

- Etapa 6 - Comunicação: são comunicados o problema e sua importância, o artefato e sua utilidade, inovação, os critérios de sua criação, sua importância para os pesquisadores e outros públicos relacionados. Pode ser comunicado por meio de uma publicação científica.

## 3.2 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Uma empresa parceira produtora de máquinas agrícolas entrou em contato com o Programa de Manufatura Inteligente apresentando alguns problemas no setor de corte de chapas. Foram realizadas reuniões com o gerente e engenheiros do setor para entender a questão, e detectar se o problema fazia parte de uma das demandas de pesquisa do Programa de Manufatura Inteligente. Assim, foi identificado que o problema era relevante e foi iniciada a abordagem DSR para encontrar a sua solução.

### 3.2.1 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA E MOTIVAÇÃO

A empresa parceira é uma multinacional produtora de máquinas agrícolas e de construção. A empresa tem uma vasta gama de produtos, dentre eles, pode-se destacar tratores, colheitadeiras, pulverizadores, semeadoras e colhedoras. No intuito de suprir a demanda dos clientes, além dos fornecedores, a empresa possui um setor que é responsável pela fabricação de parte das peças metálicas utilizadas na fabricação de seus produtos. O setor é responsável pelo corte da matéria prima e sua conformação.

Nesta etapa é definido o problema de pesquisa e o valor da sua solução (PEFFERS et al., 2007). Ao aprofundar as conversas com a empresa parceira foi percebido que a questão ia além de um problema de layout de peças em chapas metálicas. A empresa já possui um software que consegue otimizar a distribuição física das peças ao serem cortadas nas chapas metálicas, e assim reduzir o desperdício de matéria-prima. Contudo, ainda assim, muito resíduo metálico é gerado. O setor possui dificuldades de definir um PP que leve em consideração variáveis como o estoque, aproveitamento de matéria-prima, demanda e logística.

Após a identificação do problema da empresa parceira, foi realizada uma análise

bibliométrica e sistêmica, presente no Apêndice A, para identificar oportunidades de pesquisa e a sua relevância para a academia e indústria. Algumas das oportunidades de pesquisa encontradas foram: otimizar um PP multiobjetivo, utilizar algoritmos híbridos para deixar a formulação de PP mais eficiente, considerar falhas e incertezas no desenvolvimento do PP, e otimizar o PP em fábricas com problema de corte. Esta última oportunidade, aborda a dificuldade apresentada pela empresa parceira e expõe uma lacuna a ser preenchida no conhecimento científico.

### 3.2.2 DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS DA SOLUÇÃO

Nesta etapa são deduzidos os objetivos possíveis e eficazes para a solução do problema (PEFFERS et al., 2007). Na etapa de identificação do problema, foi detectado que a empresa parceira já possui um software que realiza a distribuição física das peças que precisam ser cortadas nas chapas. Também foi identificado que a empresa desenvolve o PP, neste setor específico de corte de chapas, apenas buscando atender a demanda da fábrica. Desta forma, o objetivo O.1, identificar variáveis que podem influenciar na redução de resíduos gerados no setor de corte de chapas da empresa, presente na seção 1.1.2, foi executado nesta fase do DSR.

Nesse contexto, foi definido que o objetivo do trabalho é criar um método que desenvolva um PP, que concilie a quantidade de peças em estoque com o seu aproveitamento nas chapas. E dessa forma, busca-se reduzir a quantidade de matéria-prima desperdiçada no corte das chapas. Assim, a melhora pode ser avaliada de maneira quantitativa, pois pode ser analisado a quantidade de resíduos gerados com e sem a aplicação do método.

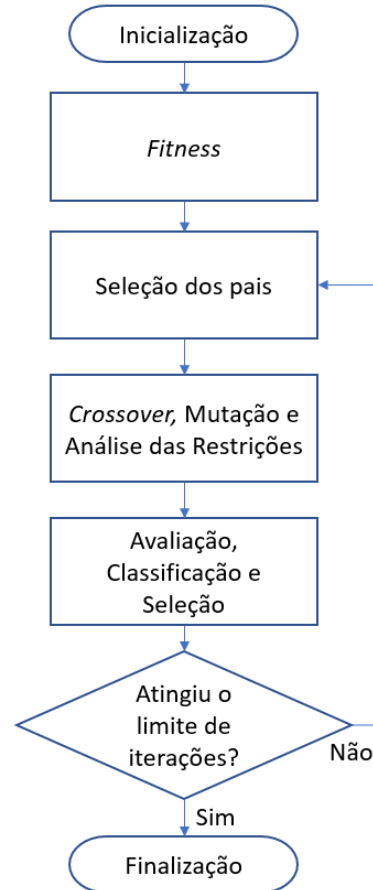
### 3.2.3 CRIAÇÃO E DESENVOLVIMENTO

O objetivo O.2, levantar e comparar as principais técnicas de construção de um modelo de otimização, usando conceitos da indústria 4.0 como AI, e levantar as ferramentas computacionais disponíveis para esta análise, presente na seção 1.1.2, é executado nessa fase do DSR. Ao ser analisado o conteúdo dos quinze artigos presentes no portfólio final da análise bibliométrica e sistêmica, presente no Apêndice A, foi possível identificar que 60% destes artigos sugeriram solucionar problemas de PP com uma abordagem meta-heurística.

No *review* sobre APP realizado por Cheraghalikhani, Khoshalhan e Mokhtari (2019), foi apresentado um estudo das diferentes abordagens utilizadas para solucionar problemas de APP. Dentro do grupo de artigos com uma abordagem meta-heurística, a maioria deles, representando metade do grupo, solucionaram seus problemas utilizando GA. Dessa forma, o objetivo O.3, construir o método, presente na seção 1.1.2, foi realizado utilizando GA. Na seção 2.4, é dada

uma introdução sobre GA. A Figura 5 contém o fluxograma utilizado na construção do método. E cada etapa será descrita em seguida.

**Figura 5** – Fluxograma de Funcionamento do Algoritmo Genético



Fonte: O próprio autor (2020).

A princípio foi considerada a possibilidade de criar um algoritmo que relacionasse diretamente o PP e a distribuição das peças na chapa. Contudo, o problema de distribuição de peças irregulares em chapas por si só, já é um problema complexo e que demanda muito esforço computacional. A empresa parceira possui a licença de um software que já realiza esta distribuição física de maneira otimizada. Dessa forma, para levar em consideração esse aspecto irregular das peças, foi utilizada uma simplificação que é apresentada na subseção 3.2.3.2.

A empresa parceira trabalha com cerca de 50 tipos diferentes de chapas. O número de diferentes peças que podem ser cortadas variam de acordo com o tipo da chapa. Existe entre 2 a 220 modelos de peças para cada tipo de chapa. O aproveitamento de matéria-prima também varia dependendo do modelo da chapa. Existem chapas que tem aproveitamento médio de até 93%, em contrapartida, existem chapas em situações críticas, no qual o aproveitamento gira em torno de 60%. Como cada tipo de chapa possui suas próprias peças, as peças de uma chapa

acabam não interferindo no corte de peças de outra chapa. Desse modo, o método desenvolvido realiza a análise de cada tipo de chapa separadamente.

### 3.2.3.1 INICIALIZAÇÃO

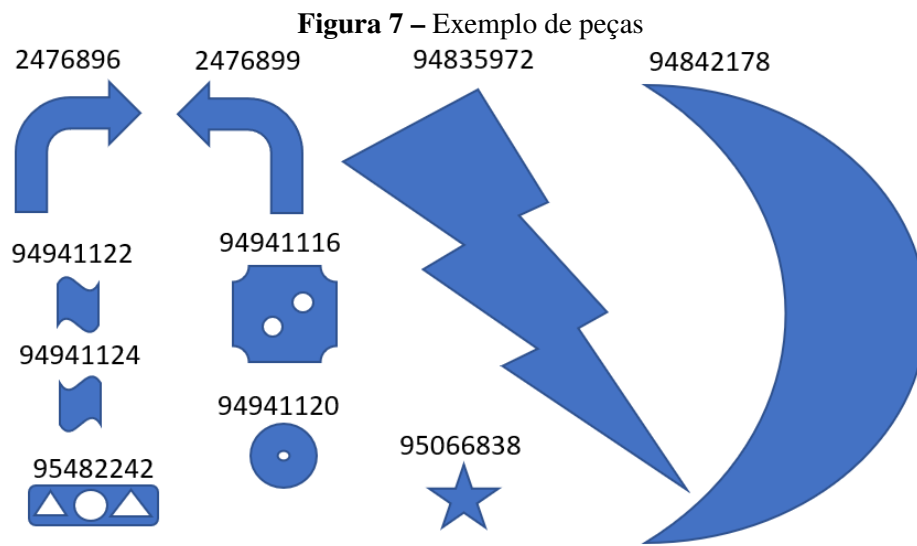
Na etapa de inicialização, primeiramente são identificados os dados de entrada do artefato. Duas tabelas contendo informações em formato CSV são utilizadas. A primeira é relacionada aos parâmetros do problema que será estudado. Esta tabela contém o código de identificação de cada peça, a massa de cada peça, a quantidade de cada peça em estoque no primeiro dia a ser simulado e a quantidade máxima de peças que podem ser estocadas. A Figura 6 apresenta um exemplo de como os parâmetros são organizados na tabela.

**Figura 6** – Tabela de Parâmetros

	A	B	C	D
1	Codigo	Massa	Estoque	Capacidade Máxima
2	2476896	314	0	0
3	2476899	314	0	0
4	94835972	1430	0	0
5	94842178	1440	0	0
6	94941116	351	0	0
7	94941120	235	40	40
8	94941122	191	32	40
9	94941124	191	23	40
10	95066838	222	32	40
11	95482242	212	40	40

**Fonte:** O próprio autor (2020).

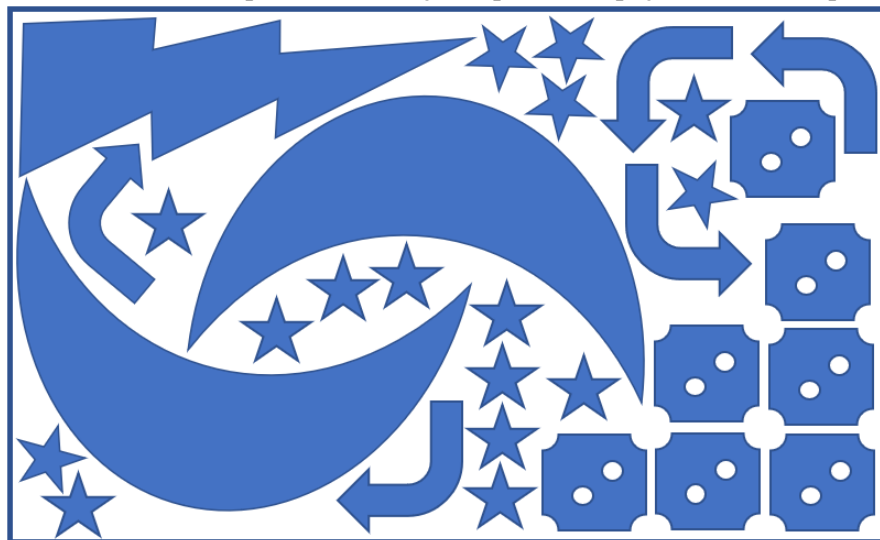
A Figura 7 exemplifica como poderiam ser as formas das peças apresentadas na Figura 6. Pode-se notar que as peças com maiores valores de massa, consequentemente, são as maiores peças. É comum a existência de peças espelhadas como as de código 24766896 e 2476896. É possível notar que essas peças também possuem a mesma massa.



**Fonte:** O próprio autor (2020).

A Figura 8 apresenta de maneira puramente ilustrativa, como algumas dessas peças apresentadas na Figura 7 poderiam ser distribuídas em uma chapa metálica a partir de um PP genérico.

**Figura 8 – Exemplo da distribuição espacial das peças em uma chapa**



**Fonte:** O próprio autor (2020).

A segunda tabela é referente a demanda que deverá ser atendida no período estudado. A tabela contém o código de cada peça, a data e a quantidade de peças que deverá ser entregue nesse dia. A Figura 9 apresenta um exemplo do formato da tabela de pedido. Os demais parâmetros definidos na inicialização serão apresentados ao longo da descrição do método.

**Figura 9 – Tabela de Demanda**

	A	B	C
1	Codigo	Dia	Quant. Requerida
2	2476896	02/02/2019	0
3	2476896	04/02/2019	0
4	2476896	05/02/2019	0
5	2476896	06/02/2019	0
6	2476896	07/02/2019	82
7	2476896	09/02/2019	0
8	2476896	12/02/2019	0
9	2476896	14/02/2019	0
10	2476896	16/02/2019	0
11	2476896	20/02/2019	0
12	2476896	22/02/2019	100
13	2476896	23/02/2019	0
14	2476896	25/02/2019	0
15	2476896	26/02/2019	0
16	2476896	27/02/2019	0
17	2476899	02/02/2019	0
18	2476899	04/02/2019	0

Fonte: O próprio autor (2020).

Após a inserção dos parâmetros é criada a primeira geração de indivíduos. Cada indivíduo possui um PP para o período analisado e um valor de *Fitness* que é o valor usado para comparar um indivíduo com os demais. A variável que diferencia um indivíduo do outro, também conhecida como cromossomo, é a coluna contendo a quantidade de cada tipo de peça que será produzida em cada dia. Na população inicial, esses cromossomos são gerados de maneira aleatória, contudo eles respeitam as restrições de demanda e quantidade máxima em estoque. A Figura 10 é um exemplo de um indivíduo no método criado.

**Figura 10 – Exemplo de indivíduo**

**Indivíduo**

PP + <i>Fitness</i>			
Codigo	Data	Quantidade	Movimentação estoque
94941124	25/02/2019	8	21
94941124	26/02/2019	1	22
94941124	27/02/2019	9	31
95066838	02/02/2019	1	38
95066838	04/02/2019	4	42
95066838	05/02/2019	1	43
95066838	06/02/2019	0	43
95066838	07/02/2019	5	48
95066838	09/02/2019	0	48
95066838	12/02/2019	1	49

Cromossomo

Fonte: O próprio autor (2020).



### 3.2.3.2 FITNESS

Na etapa de *Fitness* é medido a performance de cada indivíduo da população. Para este trabalho, é estimada a quantidade de resíduo gerado para cada indivíduo. Como as peças a serem cortadas são irregulares, foi decidido que para calcular o aproveitamento das chapas e a quantidade de resíduos gerados, seria utilizada uma relação entre a somatória das áreas das peças e a área da chapa.

Primeiramente é calculado o número de chapas utilizadas por dia ( $n_i$ ), ele sempre é um número natural arredondado para cima. Para tal, é realizado um somatório da multiplicação da área de cada peça ( $a_j$ ) pela quantidade das respectivas peças a serem produzidas neste dia ( $q_{i,j}$ ). O  $i$  representa o dia,  $j$  representa de cada peça pertencente a um conjunto  $K$ . Como já mencionado, as peças são de formatos irregulares, o coeficiente  $\alpha$  representa essa dificuldade de encaixe entre as peças e outros detalhes como furos, que algumas peças possuem. E  $A$  é o valor da área da chapa. A seguir é apresentada a equação do cálculo de número de chapas por dia.

$$n_i = \frac{\alpha \times \sum_{j \in K} a_j \times q_{i,j}}{A} \quad (1)$$

Como o objetivo do método é reduzir a quantidade de matéria-prima gerada, e como as chapas tem diferentes espessuras, para uma avaliação administrativa é mais interessante a análise desses dados em função da massa. Assim, a equação pode ser reescrita conforme apresentado a seguir. Nesta equação,  $m_j$  é a massa de cada peça,  $M$  é a massa da chapa,  $d$  é a densidade do material e  $t$  é a espessura, como a densidade e espessura são iguais entre a chapa e as peças, esses valores se cancelam.

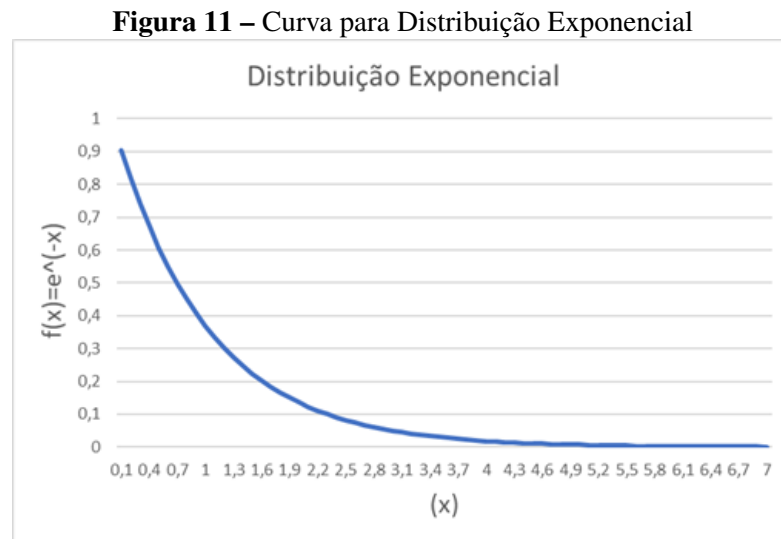
$$n_i = \frac{\alpha \times \sum_{j \in K} \frac{m_j}{d \times t} \times q_{i,j}}{\frac{M}{d \times t}} = \frac{\alpha \times \sum_{j \in K} m_j \times q_{i,j}}{M} \quad (2)$$

O *fitness* ( $fit$ ) é calculado pelo número total de chapas utilizadas no período  $W$  multiplicado pela massa da chapa, e esse valor é subtraído pela massa total de peças produzidas no período.

$$fit = \left( M \times \sum_{i \in W} n_i \right) - \left( \sum_{i \in W} \sum_{j \in K} m_j \times q_{i,j} \right) \quad (3)$$

### 3.2.3.3 SELEÇÃO DOS PAIS

Os pais são os indivíduos que fornecerão seus cromossomos para a próxima geração. Na etapa de inicialização são definidos o número de novos indivíduos que serão gerados em cada geração. Para cada novo indivíduo gerado, dois pais são necessários. Existem várias formas de realizar a seleção dos pais. Neste projeto, foi escolhido o método conhecido como *roulette wheel*. Esse método busca imitar uma roleta de cassino, selecionando indivíduos de maneira aleatória. A diferença é que como o projeto busca reduzir a quantidade de resíduos gerados, quanto menor é o *fitness*, maior é chance de ele ser selecionado. Para tal, foi utilizada a distribuição exponencial, pois para esta distribuição, quanto maior o valor do domínio, menor é o valor da sua imagem. Na Figura 11 é apresentada a forma da curva de uma distribuição exponencial.



A equação a seguir é uma divisão do *fitness* ( $fit_r$ ) de um indivíduo dentro de uma população  $S$ , pelo valor médio de todos os *fitness* dessa população. Essa variável ( $var_r$ ) serve para atenuar a influencia da magnitude do valor do *fitness* nas equações em que será utilizado.

$$var_r = \frac{fit_r}{\overline{fit}} \quad (4)$$

Utilizando a distribuição exponencial, é calculado o valor proporcional ( $prop_r$ ) da probabilidade de cada indivíduo ser escolhido para ser pai da próxima geração.

$$prop_r = e^{-var_r} \quad (5)$$

Para calcular a probabilidade ( $P_r$ ) de cada indivíduo ser escolhido. É necessário calcular sua proporção  $prop_r$ , dividido pela somatória de todas as proporções presentes naquela população  $S$ .

$$P_r = \frac{prop_r}{\sum_{r \in S} prop_r} \quad (6)$$

### 3.2.3.4 CROSSOVER, MUTAÇÃO E ANÁLISE DAS RESTRIÇÕES

Nesta etapa, os pais selecionados na etapa anterior realizam a troca de características nos seus cromossomos. Essa troca é realizada em características equivalentes dos pais, e é realizada de maneira aleatória. E assim, são gerados os novos indivíduos, que também podem ser chamados de filhos. A Figura 12 exemplifica a realização do *crossover*. Nesta figura, é possível notar que é trocado o material genético dos pais 1 e 2, gerando os filhos 1 e 2. Deste modo, a coluna contendo a movimentação dos estoques também é atualizada nesse processo.

**Figura 12 – Demonstração do Crossover**

Antes				Depois			
Pai 1				Pai 2			
Codigo	Data	Quantidade	Movimentação estoque	Codigo	Data	Quantidade	Movimentação estoque
94941124	25/02/2019	8	21	94941124	25/02/2019	4	31
94941124	26/02/2019	0	21	94941124	26/02/2019	10	31
94941124	27/02/2019	5	26	94941124	27/02/2019	9	26
95066838	02/02/2019	1	33	95066838	02/02/2019	8	12
95066838	04/02/2019	4	37	95066838	04/02/2019	5	23
95066838	05/02/2019	1	38	95066838	05/02/2019	0	38
95066838	06/02/2019	0	38	95066838	06/02/2019	3	35
95066838	07/02/2019	0	38	95066838	07/02/2019	5	36
95066838	09/02/2019	0	38	95066838	09/02/2019	7	14
95066838	12/02/2019	1	39	95066838	12/02/2019	7	5

Filho 1				Filho 2			
Codigo	Data	Quantidade	Movimentação estoque	Codigo	Data	Quantidade	Movimentação estoque
94941124	25/02/2019	8	21	94941124	25/02/2019	4	31
94941124	26/02/2019	0	21	94941124	26/02/2019	10	31
→ 94941124	27/02/2019	9	30	94941124	27/02/2019	5	22 ←
95066838	02/02/2019	1	37	95066838	02/02/2019	8	8
95066838	04/02/2019	4	41	95066838	04/02/2019	5	19
95066838	05/02/2019	1	42	95066838	05/02/2019	0	34
→ 95066838	06/02/2019	3	45	95066838	06/02/2019	0	28 ←
→ 95066838	07/02/2019	5	50	95066838	07/02/2019	0	24 ←
95066838	09/02/2019	0	50	95066838	09/02/2019	7	2
95066838	12/02/2019	1	51	95066838	12/02/2019	7	-7

Fonte: O próprio autor (2020).

A mutação é uma pequena alteração que ocorre de maneira aleatória em alguma característica do cromossomo dos novos indivíduos. A mutação é necessária para diminuir a probabilidade de o *fitness* ir para um mínimo local. A Figura 13 exemplifica a realização do processo de mutação. Nota-se que aleatoriamente alguns elementos dos cromossomos dos

filhos 1 e 2 são alterados. Esta mutação pode ser a adição ou redução da quantidade de peças produzidas em um dia. E como consequência, o valor de peças em estoque é atualizado.

**Figura 13 – Demonstração do processo de mutação**

Antes				Depois			
Filho 1				Filho 2			
Codigo	Data	Quantidade	Movimentação estoque	Codigo	Data	Quantidade	Movimentação estoque
94941124	25/02/2019	8	21	94941124	25/02/2019	4	31
94941124	26/02/2019	0	21 +1	94941124	26/02/2019	10	31
94941124	27/02/2019	9	30	94941124	27/02/2019	5	22
95066838	02/02/2019	1	37	95066838	02/02/2019	8	8
95066838	04/02/2019	4	41	95066838	04/02/2019	5	19
95066838	05/02/2019	1	42	95066838	05/02/2019	0	34
95066838	06/02/2019	3	45 -3	95066838	06/02/2019	0	28 +3
95066838	07/02/2019	5	50	95066838	07/02/2019	0	24 +2
95066838	09/02/2019	0	50	95066838	09/02/2019	7	2
95066838	12/02/2019	1	51	95066838	12/02/2019	7	-7

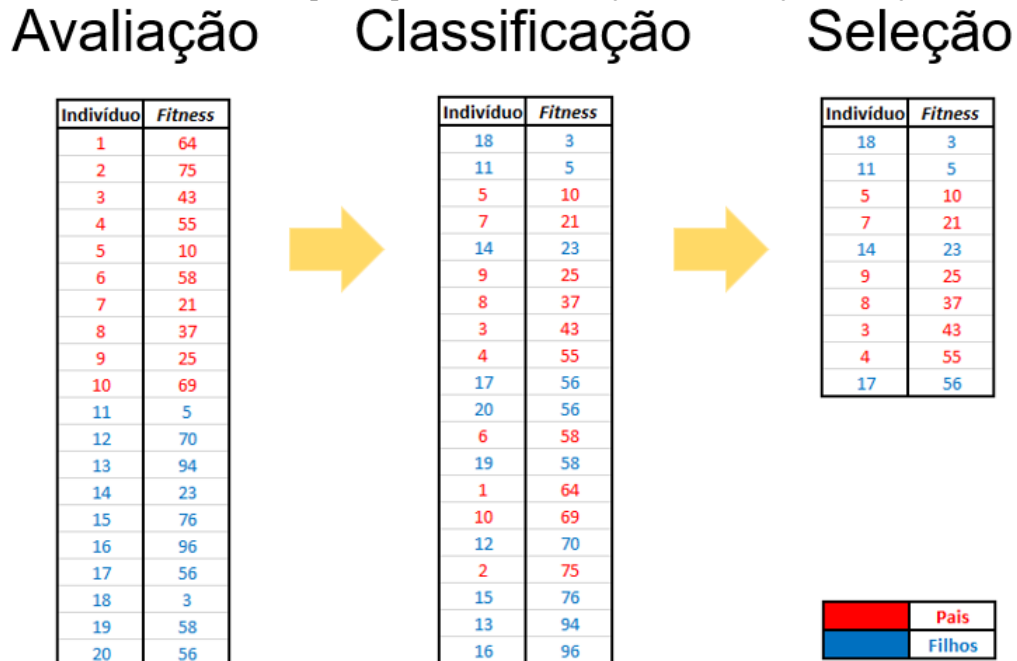
Fonte: O próprio autor (2020).

Já a análise das restrições, serve para verificar se o cromossomo está dentro dos parâmetros esperados da resposta, podendo também corrigir possíveis irregularidades. Geralmente, as irregularidades se tratam de características do cromossomo fora dos limites de valores predeterminados.

### 3.2.3.5 AVALIAÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E SELEÇÃO

Nesta etapa os filhos passam pela avaliação do *fitness*, apresentada na subseção 3.2.3.2. Após essa avaliação, os filhos gerados são concatenados junto com os pais e ordenados conforme o valor de seu *fitness*. Neste trabalho, o objetivo é reduzir a quantidade de resíduos gerados. Assim, os indivíduos com os menores *fitness* ocupam as primeiras posições. Após isso, os indivíduos que ocupam essas posições, são selecionados para a nova geração, conforme o limite definido de indivíduos da população. Os demais indivíduos são eliminados. A Figura 14 exemplifica esse processo.

**Figura 14** – Exemplo do processo de Avaliação, Classificação e Seleção

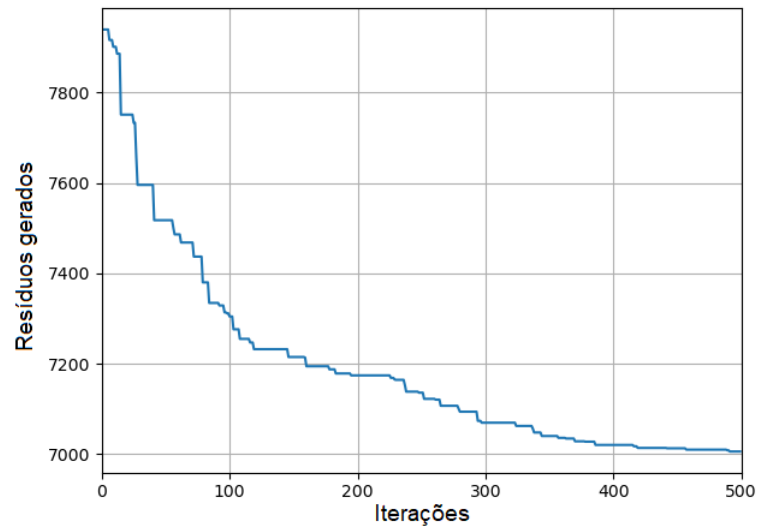


Fonte: O próprio autor (2020).

Após essa etapa é analisado se o algoritmo atingiu o número máximo de iterações preestabelecido. Se não atingiu, é repetido todo o processo a partir da fase de seleção de pais. Se atingiu, é realizada a etapa de finalização.

### 3.2.3.6 FINALIZAÇÃO

Durante todas as gerações, é armazenado um histórico contendo os melhores indivíduos de cada geração em relação aos seus respectivos *fitness*. Na finalização é apresentado um gráfico contendo esse histórico, conforme apresentado na Figura 15. Também é apresentado o valor esperado para o desperdício de resíduos, o aproveitamento médio esperado das chapas e um PP que possivelmente proverá esses resultados. O PP gerado também apresenta a movimentação dos estoques durante o período avaliado, ou seja, a quantidade de cada peça em estoque no final da data apresentada. A Figura 16 apresenta um exemplo do PP.

**Figura 15** – Gráfico histórico dos melhores indivíduos

Fonte: O próprio autor (2020).

**Figura 16** – Plano de produção elaborado pelo método

	A	B	C	D
1	Codigo	Data	Quantidade	Movimentação estoque
2	94941124	25/02/2019	8	21
3	94941124	26/02/2019	0	21
4	94941124	27/02/2019	5	26
5	95066838	02/02/2019	1	33
6	95066838	04/02/2019	4	37
7	95066838	05/02/2019	1	38
8	95066838	06/02/2019	0	38
9	95066838	07/02/2019	0	38
10	95066838	09/02/2019	0	38
11	95066838	12/02/2019	1	39
12	95066838	14/02/2019	132	11
13	95066838	16/02/2019	13	24
14	95066838	20/02/2019	5	29
15	95066838	22/02/2019	6	35

Fonte: O próprio autor (2020).

### 3.2.4 DEMONSTRAÇÃO

Nesta etapa é demonstrado o uso do artefato para resolver um ou mais problemas (PEFFERS et al., 2007). O objetivo O.4, demonstrar a aplicação do método por meio de provas de conceito no contexto da empresa parceira, presente na seção 1.1.2, é executado nessa fase do DSR.

O primeiro passo da demonstração é selecionar qual tipo de chapa o método será aplicado. Como descrito na subseção 3.2.3, existem aproximadamente 50 tipos de chapas. Após

essa seleção, é necessário escolher o período de tempo no qual o método será implementado.

No próximo passo, é necessário analisar a situação da empresa sem a aplicação do método. A partir de documentos fornecidos pela empresa parceira, é coletado o PP do tipo de chapa escolhida, no período selecionado. Este PP é inserido no software de alocação espacial das peças, no qual a empresa possui a licença. A partir dessa implementação, são obtidos os dados de aproveitamento das chapas e desperdício de resíduos da empresa, sem a utilização do método.

A próxima etapa é calcular o coeficiente  $\alpha$ . Para isto, foi criada uma planilha que recebe como parâmetros de entrada o PP e o  $\alpha$ . Essa planilha foi desenvolvida para calcular o *fitness* conforme descrito na subseção 3.2.3.2. E como resultado a planilha apresenta o aproveitamento das chapas e desperdício de resíduos. Assim, o PP sem a utilização do método é inserido na planilha, e o valor do  $\alpha$  vai sendo alterado, até os resultados apresentados pela planilha se tornarem próximos aos apresentados no passo anterior.

Por fim, o PP, o  $\alpha$  e os parâmetros são inseridos no método. E como resultados o método apresenta um novo PP, e os valores estimados do aproveitamento das chapas e da quantidade de resíduos gerados. Este novo PP, é inserido no software de alocação de peças da empresa parceira, e a partir disso são fornecidos os reais valores de aproveitamento e de resíduos gerados. Estes resultados reais são comparados com os resultados estimados fornecidos pelo modelo, e a partir disso é possível verificar a representatividade do método criado.

### 3.2.5 AVALIAÇÃO

Nesta etapa é observado e medido o quanto o artefato é eficaz em solucionar o problema (PEFFERS et al., 2007). O objetivo O.5, avaliar o modelo quanto à sua eficiência, facilidade de uso, operacionalidade e generalidade, presente na seção 1.1.2, é executado nessa fase do DSR. O Quadro 3 apresenta as formas de avaliação presentes no DSR.

O método é avaliado em quatro aspectos. Ele é avaliado quanto ao seu desempenho, facilidade de uso, operacionalidade e generalidade. A avaliação de desempenho é realizada de maneira quantitativa. Esta é uma avaliação analítica, que a partir de uma análise estatística compara os resultados apresentados pela empresa sem e com a utilização do método. Já as avaliações de facilidade de uso, operacionalidade e generalidade são de natureza qualitativa. Estas avaliações são executadas de maneira descritiva, a partir de argumentos fundamentados a partir de um questionário realizado pelos engenheiros da empresa parceira.

**Quadro 3 – Métodos para avaliação dos artefatos**

Forma de Avaliação	Métodos Propostos
Observacional	Estudo de Caso: Estudar minuciosamente o artefato no ambiente de negócios.
	Estudo de Campo: Monitorar o uso do artefato em vários projetos.
Analítica	Análise Estatística: Examinar a estrutura do artefato em valores estatísticos.
	Análise da Arquitetura: Estuda a adaptação do artefato na arquitetura do sistema de informação.
	Otimização: Demonstrar as propriedades ótimas inerentes ao artefato ou então demonstrar os limites de otimização no comportamento do artefato.
	Análise Dinâmica: Estudar o artefato durante o uso para avaliar suas características dinâmicas (e.g., desempenho).
Experimental	Experimento Controlado: Estudar o artefato em um ambiente controlado para verificar suas características (e.g., usabilidade).
	Simulação: Executar o artefato com dados artificiais.
Teste	Teste Funcional ( <i>Black Box</i> ): Executar as interfaces do artefato para descobrir possíveis falhas e identificar defeitos.
	Teste Estrutural ( <i>White Box</i> ): Realizar testes para analisar algumas métricas na implementação do artefato (e.g., caminhos para a execução).
Descritivo	Argumento Fundamentado: Utilizar a informação das bases de conhecimento (e.g., de pesquisas relevantes) para construir um argumento convincente a respeito da utilidade do artefato.
	Cenários: Construir cenários detalhados em torno do artefato, para demonstrar sua utilidade.

**Fonte:** Hevner et al. (2004)

### 3.2.6 COMUNICAÇÃO DOS RESULTADOS

Nesta etapa é realizada a comunicação das análises e resultados obtidos (PEFFERS et al., 2007). Essa comunicação está sendo realizada por meio desta dissertação de mestrado. E futuramente será comunicado pela publicação deste trabalho em periódico internacional e por um relatório técnico a ser entregue para empresa parceira.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nesta pesquisa. Estes são apresentados conforme as etapas do *Design Science Research*, descritas no Capítulo 3. Os resultados das etapas 1, 2 e 6 do DSR já foram apresentados no capítulo 3. Este capítulo foca nas etapas 3, 4 e 5 do DSR.

### 4.1 CRIAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO

Nesta seção é apresentado como o método foi construído, a partir da explicação de alguns trechos de código utilizados na criação do artefato. O código completo pode ser encontrado no Apêndice B. A linguagem de programação escolhida para o desenvolvimento desse método foi o *Python*. Alguns aspectos que ajudaram nessa decisão foram:

- É bastante utilizado para realizar trabalhos de análise de dados e AI;
- É uma linguagem de programação gratuita;
- Possui bastante conteúdo de qualidade disponível de maneira gratuita;
- Programas em *Python* podem ser executados em qualquer dispositivo que possua um interpretador.

No desenvolvimento do trabalho foi necessário utilizar as seguintes bibliotecas do *Python*:

- `numpy`: utilizada para trabalhar com *arrays*;
- `matplotlib.pyplot`: utilizada para plotar gráficos;
- `structure`: utilizada para criar estruturas, que são elementos que conseguem comportar dados de diversos tipos dentro de si, de forma organizada;
- `csv`: utilizada para trabalhar com dados em formato CSV;
- `copy`: utilizada para copiar elementos.

#### 4.1.1 INICIALIZAÇÃO

O primeiro passo da inicialização é a inserção dos dados do problema, apresentado entre as linhas 8 e 14 do Apêndice B. Assim, são inseridos o valor da massa da chapa metálica, o coeficiente  $\alpha$  e as tabelas contendo os parâmetros das peças e a demanda diária para cada tipo de peça. A função `extraíCSV` foi criada com o intuito de extrair os dados de tabelas em formato CSV, e transforma-los em um *array*. O trecho de código pode ser encontrado no Apêndice B, entre as linhas 202 e 221 do Apêndice B. Primeiramente os arquivos CSV são abertos, e depois são adicionados à matriz `parametrosArquivo`. Em seguida, é deletada a primeira linha da matriz, pois está é a linha que possui os títulos. Logo após, essa matriz é transformada no *array* `parametrosArray`. E por fim, todos os dados do `parametrosArray` são transformados em números inteiros. A função `extraíCSV` é utilizada para extrair os dados da tabela de parâmetros, que possuem os dados da massa das peças, estoque inicial e a capacidade máxima do estoque. Também é utilizada para extrair os dados da tabela de pedido, que contém a demanda diária de cada peça durante determinado período de tempo.

Em seguida, como pode ser observado entre as linhas 16 e 21 do Apêndice B são inseridos os parâmetros relativos ao GA. Esses parâmetros incluem o número máximo de iterações (`parametros.maxit`), tamanho da população (`parametros.npop`), a proporção de filhos que serão criados em cada geração em relação ao tamanho da população (`parametros.pc`) e a taxa de mutação dos filhos (`parametros.mu`).

Entre as linhas 58 e 70 do Apêndice B é apresentada a criação de um indivíduo. Os indivíduos são estruturas que possuem os dados `empty_individual.position` representando o PP deste indivíduo e `empty_individual.cost` representando o valor do *fitness* deste indivíduo. Esse indivíduo ainda não possui dados relevantes, a sua função é criar uma estrutura que futuramente será preenchida. Entre as linhas 72 e 74 é criada a população `pop`, repetindo o indivíduo `empty_individual` até que a população tenha o tamanho definido nos parâmetros.

Entre as linhas 82 e 102 do Apêndice B a população previamente criada é preenchida com os valores que atendem a demanda. Para tal, são definidos os valores máximos (`vMax`) e mínimos (`vMin`) da produção diária de cada tipo de peça. Com esses valores definidos, é utilizada a função `np.random.randint(vMin, vMax+1)`, para aleatoriamente definir a quantidade de determinado tipo de peça que irá ser produzida no dia. Em seguida, é calculado o *fitness* de cada indivíduo da população. Como o método para este trabalho busca a minimização do *fitness*, o indivíduo com o menor *fitness* de cada população é armazenado na variável `bestsol`.

#### 4.1.2 FITNESS

O cálculo do *fitness* é realizado pela função `residuo`, que pode ser encontrada entre as linhas 223 e 255 do Apêndice B. Primeiramente a função identifica quantas peças de cada tipo serão produzidas no dia, e multiplica esses valores pelas respectivas massas de cada peça. Em seguida, esses valores são somados e armazenados na matriz `massaDia`, que armazena a massa total de peças a serem cortadas cada dia.

O próximo passo é calcular a quantidade total de chapas necessárias no período analisado. Dessa forma, para calcular o número diário de chapas necessárias (`nChapas`), é realizada a multiplicação entre a matriz `massaDia` pelo coeficiente de aproveitamento  $\alpha$ , e este valor é dividido pela massa da chapa. Se o valor (`nChapas`) não for inteiro, o valor é arredondado para cima, afastando-se de zero. O número total de chapas no período (`totalChapas`) é igual ao somatório de todos os valores de (`nChapas`).

Paralelamente é calculada a variável `consumido`. Esta variável é o resultado do somatório dos valores totais de massa de peças a serem cortadas diariamente (`massaDia`). Por fim, é calculado o valor do *fitness*. Para tal, o valor do número total de chapas utilizadas no período (`totalChapas`) é multiplicada pela massa das chapas, e esse valor é subtraído pela variável `consumido`.

#### 4.1.3 SELEÇÃO DOS PAIS

Na subseção 3.2.3.3, foi indicado que o método utilizado para selecionar os pais é o *Roulette Wheel*. Este método seleciona os pais como se estivesse sorteando um número em uma roleta de cassino. Contudo, os elementos dessa roleta são os indivíduos de uma população, e as probabilidades de cada indivíduo ser escolhido são maiores quando o valor do *fitness* é menor.

Entre as linhas 110 e 114 do Apêndice B é apresentado como as probabilidades de cada indivíduo ser selecionado são calculadas. A matriz `costs` a princípio armazena o *fitness* de cada indivíduo da população. Em seguida, a matriz `costs` é atualizada ao dividir todos seus elementos pelo valor médio dos mesmos. Dessa forma, o efeito da magnitude é reduzido.

Para calcular a probabilidade de cada indivíduo ser escolhido foi utilizada a distribuição exponencial. Pois quanto maior o valor de `costs`, menor é a probabilidade do indivíduo ser escolhido para ser um pai. Dessa forma, a matriz `probs` é o valor  $e$  elevado à multiplicação de `costs` por  $(-1)$ .

Entre as linhas 257 e 261 do Apêndice B é apresentada a função `rouletteWheel`

utilizada para selecionar os pais. Essa função recebe como dado de entrada a matriz `probs`. Em seguida, `probs` utilizada para calcular a matriz `c`, que cada elemento é substituído pela soma cumulativa de todos os elementos que vieram anteriormente na matriz. Por fim, é sorteado aleatoriamente um número ( $r$ ) entre 0 e o último número de `c`. E o primeiro indivíduo da matriz `c` que tiver o número com valor superior a  $r$ , será o indivíduo selecionado para ser um dos pais.

#### 4.1.4 CROSSOVER

*Crossover* é a etapa do GA, em que pares de pais selecionados trocam características e geram novos indivíduos. A função `crossover` pode ser encontrada entre as linhas 263 e 278 do Apêndice B. Cada pai possui uma característica genética (cromossomo) diferente. Para este trabalho, o cromossomo é o PP de cada indivíduo. Dessa forma, quando o *crossover* ocorre, os indivíduos trocam entre si a quantidade de determinado tipo de peças que serão produzidas em um dia. Primeiramente é criada uma lista com valores booleanos `beta`, esta lista é gerada de maneira aleatória, e tem o tamanho do PP. Essa lista define quais elementos serão trocados entre os pais, sendo os zeros as posições dos elementos que serão trocados. A lista `omega`, foi criada com o intuito de atualizar os valores dos estoques, com o novo PP criado.

#### 4.1.5 MUTAÇÃO

A mutação é o fator que ajuda o GA fugir de mínimos locais. Após os filhos passarem pelo *crossover*, eles tem a possibilidade de sofrer modificações de maneira aleatória no PP. A função `mutate` é encontrada entre as linhas 281 e 292 do Apêndice B. A lista `flag`, é uma lista binária e que tem a probabilidade `mu` de ter valores iguais a 1. Quando o valor de `flag` é igual a 1, significa que o item equivalente do filho, sofrerá mutação. A mutação é igual ao valor prévio somado a um número inteiro obtido por uma distribuição normal, com desvio padrão 1 e média 0.

#### 4.1.6 ANÁLISE DAS RESTRIÇÕES

Depois dos filhos passarem pelo processo de *crossover* e mutação, é necessário analisar se eles ainda atendem os critérios de demanda e número máximo de peças no estoque. Esse processo é realizado pela função `adicionarLimites`, encontrada entre as linhas 294 e 330 do Apêndice B. Essa função é focada em analisar a movimentação do estoque. Se o valor do estoque para determinada peça está menor que 0. Isso significa que a demanda por peças neste dia não está sendo atendida, então é adicionado o valor da diferença necessária para deixar o valor do estoque igual a 0. Em seguida, é analisado os dias em que o estoque tem um valor

acima do permitido. Para estes dias, é subtraída a diferença do estoque para chegar no nível definido. E as peças sobressalentes são adicionadas na variável *desperdicio*, pois essas representam as peças que foram produzidas, mas que não são utilizadas no dia e nem podem ser armazenadas em estoque.

#### 4.1.7 AVALIAÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E SELEÇÃO

Terminada as etapas de criação dos novos indivíduos, é necessário calcular o valor dos seus respectivos *fitness*. Contudo, para estes novos indivíduos, o *fitness* deles é igual à soma do resultado da função *fitness* com a variável *desperdicio*. Este processo pode ser encontrado entre as linhas 135 a 145 do Apêndice B.

Em seguida, os novos indivíduos são adicionados à antiga população. É realizada uma classificação dos indivíduos da população. Sendo que os indivíduos com menor valor de *fitness*, ocupam as primeiras posições. Então os indivíduos que ocupam a parte inicial dessa população, até atingir o limite do tamanho da população, são selecionados para fazerem parte da próxima geração de indivíduos. Os demais indivíduos são descartados. Esses passos são apresentados entre as linhas 151 e 154 do Apêndice B. Por fim, é analisado o número de iterações. Se ele atingir o limite, é iniciada a finalização, se não, novos pais são selecionados para uma nova iteração.

#### 4.1.8 FINALIZAÇÃO

Entre as linhas 163 e 199 do Apêndice B, ocorre a primeira etapa da finalização. Os valores do aproveitamento médio das chapas, número de chapas utilizadas e quantidade de resíduos gerados, são armazenados em um arquivo de texto. E o novo PP é armazenado em um arquivo em formato CSV. A segunda etapa da finalização ocorre entre as linhas 26 e 36 do Apêndice B. Nesta etapa é plotado o gráfico dos melhores *fitness* por iteração.

## 4.2 DEMONSTRAÇÃO

Na etapa de demonstração, foi realizado o objetivo O.4, demonstrar a aplicação do método por meio de provas de conceito no contexto da empresa parceira. Como foi previamente explicitado na seção 4.1, a empresa parceira possui diferentes peças, e que por sua vez, possuem diferentes matérias-primas. Dessa forma, é possível inferir que as peças de um material não influenciam no PP de outro material. A primeira etapa da demonstração foi escolher uma matéria-prima que tivesse baixo aproveitamento, e que tivesse uma alta variedade de peças.

A baixa variedade de peças reduz o número de possíveis combinações nas chapas. A matéria-prima escolhida possui um aproveitamento médio de 68,4% e 30 modelos de peças diferentes.

Para demonstrar o funcionamento do método foi coletado o PP da matéria-prima escolhida durante o período de 1 mês da empresa parceira. Esse PP foi inserido em um software, no qual a empresa parceira possui a licença, que realiza a distribuição das peças nas chapas. O software apresentou um aproveitamento de 65,5%, e produziu 17776 unidades de massa (UM) de resíduos. Para encontrar o coeficiente de encaixe  $\alpha$ , foi criada uma planilha que calculava o *fitness* conforme descrito na subseção 4.1.2. O PP foi inserido nessa planilha, e os valores de  $\alpha$  foram sendo modificados até que os valores de aproveitamento e resíduos gerados estivessem próximos de 65,5% e 17776 UM, respectivamente. O valor de  $\alpha$  encontrado para este caso foi 1,39.

O passo seguinte foi inserir o valor de  $\alpha$  e o PP no método criado. Em conversas com os engenheiros da empresa parceira, foi definido que peças com peso igual ou inferior a 6 UM, poderiam ser estocadas, com um limite de 40 unidades por tipo de peça. Outros parâmetros definidos foram o tamanho da população ser de 150 indivíduos, e o número máximo de 500 iterações. Durante o processo de desenvolvimento do método, vários experimentos foram realizados. Foi percebido que após 400 iterações o *fitness* dificilmente sofria alterações significativas. Após a inserção destes dados, o método foi executado e como resultado apresentou um novo PP, que forneceria um aproveitamento de 67,5% das chapas, e produziria 16128 UM de resíduos.

O último passo da demonstração foi inserir o PP fornecido pelo método no software de distribuição de peças nas chapas. Esta etapa foi a mais complicada de ser realizada. Isso se deve ao software só poder ser operado em um desktop da empresa parceira, e concomitantemente as restrições sanitárias devido à pandemia do COVID-19, dificultaram a obtenção dessas respostas. Mesmo assim, os resultados foram coletados. O aproveitamento das chapas foi de 66,8%, e a quantidade de resíduos gerados é de 16655 UM.

Analisando o aproveitamento das chapas, o método forneceu um resultado com aproximadamente 1% de erro em relação ao software da empresa parceira. Se o mérito analisado for o volume de resíduos gerados, o método apresentou um erro percentual de apenas 3%. Dessa forma, ficou comprovado que para este caso, o método funciona.

### 4.3 AVALIAÇÃO

Nessa fase foram realizados quatro diferentes tipos de avaliação, buscando atingir o objetivo O.5 do trabalho, que é avaliar o método quanto ao seu desempenho, facilidade de uso, operacionalidade e generalidade. A avaliação de desempenho foi realizada de forma quantitativa, e levando em consideração os resultados apresentados na etapa de demonstração (seção 4.2). As avaliações dos quesitos de facilidade de uso, operacionalidade e generalidade, foram realizadas de maneira qualitativa. A princípio foi realizada uma apresentação para três engenheiros da área de manufatura da empresa parceira, sendo um deles gestor do setor. Em seguida lhes foi entregue um questionário contendo oito questões. Foram três questões relacionadas à facilidade de uso, duas relacionadas à operacionalidade e três relacionadas à generalidade. Nas questões foi utilizada a escala de Likert para obter as respostas. Esta escala nos ajuda a perceber as nuances das respostas dos entrevistados.

#### 4.3.1 DESEMPENHO

Para a execução do método, realizada na etapa de demonstração foi utilizado um Notebook *Acer Aspire V17 Nitro*, processador *Intel Core i7-4720HQ @ 2,60 GHz*, memória ram de 16 GB e placa de vídeo *Nvidia GEFORCE 960m 4 GB*. Com essas configurações, o notebook levou cerca de 70 minutos para executar o método com os dados de entrada apresentados na seção 4.2. Considerando que o método disponibilizou como resposta o PP de um mês inteiro, 70 minutos é um tempo aceitável.

Outro aspecto já mencionado na etapa de demonstração, é o baixo valor do erro percentual apresentado pelo método. Aproximadamente 1% para o aproveitamento de chapas, e 3% para a quantidade resíduos gerados. Assim, para este exemplo, o resultado apresentado pelo método ficou muito próximo do real. E comparando o PP do método com o PP inicialmente fornecido pela empresa, é possível notar uma redução de 1121 UM de resíduos metálicos. Uma redução de 6,3%. E quanto ao aproveitamento das chapas, é possível notar que o aproveitamento médio aumentou 1,8%.

#### 4.3.2 FACILIDADE DE USO

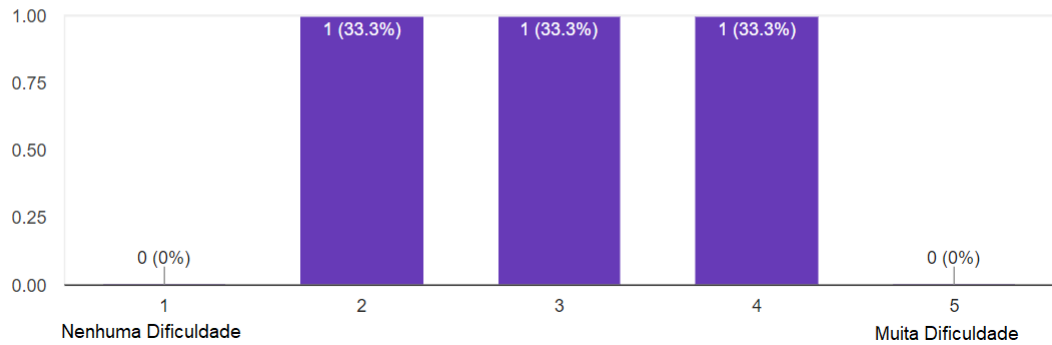
A avaliação da facilidade de uso busca identificar se os usuários conseguirão utilizar o método, e caso tenham dificuldades, ajudam os desenvolvedores a realizarem melhorias. A primeira questão foi “Qual nível de dificuldade você teria em operar o programa?”. Sendo o valor 1 para nenhuma dificuldade e o valor 5 para muita dificuldade. Ao analisarmos a Figura

17, é possível notar que os entrevistados acreditam que poderiam ter alguma dificuldade em manusear o programa.

**Figura 17 – Primeira pergunta sobre facilidade de uso**

Qual o nível de dificuldade você teria em operar o programa?

3 respostas



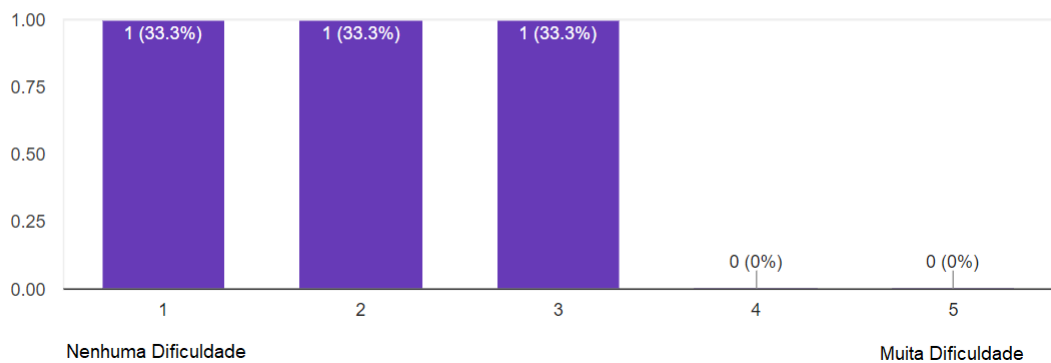
Fonte: O próprio autor (2020).

A segunda questão foi “É fácil compreender os dados de entrada requeridos pelo programa?”. Como pode ser inferido na Figura 18, os entrevistados não encontraram muita dificuldade para compreender os dados de entrada do método.

**Figura 18 – Segunda pergunta sobre facilidade de uso**

É fácil compreender os dados de entrada requeridos pelo programa?

3 respostas



Fonte: O próprio autor (2020).

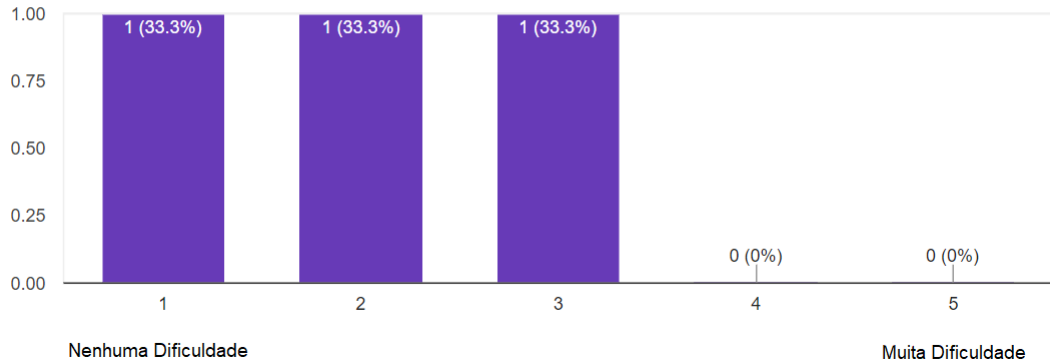
A terceira questão foi “É fácil compreender os dados de saída apresentados pelo programa?”. E como pode ser notado na Figura 19, assim como na questão anterior, os entrevistados não tiveram muita dificuldade em compreender os dados de saída fornecidos pelo método.



**Figura 19** – Terceira pergunta sobre facilidade de uso

É fácil compreender os dados de saída apresentados pelo programa?

3 responses



**Fonte:** O próprio autor (2020).

Levando em consideração as respostas apresentadas, foi identificado que os usuários conseguiriam utilizar o método, saberiam identificar quais dados fornecer para o programa, e quais respostas esperar dele. Para melhorar essa experiência dos usuários, pode ser elaborado um manual passo a passo de como utilizar o programa.

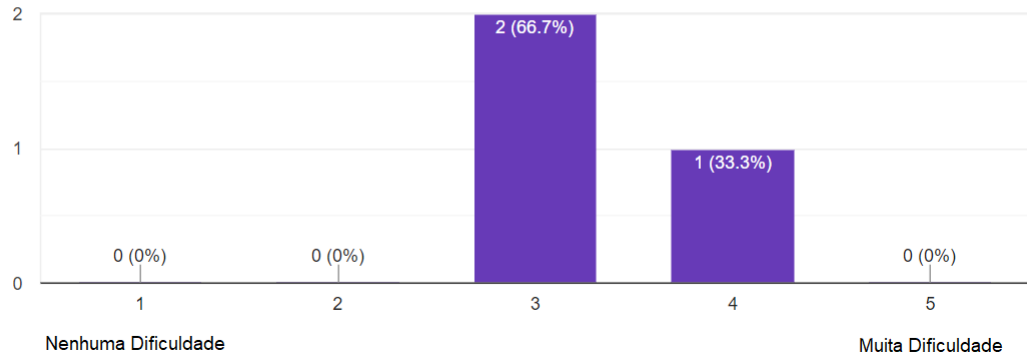
#### 4.3.3 OPERACIONALIDADE

A avaliação de operacionalidade é necessária para identificar as dificuldades de implementação do método na empresa parceira. A primeira questão deste item foi “Você acredita que este programa teria dificuldades em ser implementado na empresa?”. Sendo o valor 1 nenhuma dificuldade, e o valor 5 muita dificuldade. Conforme apresentado na figura 20, é identificado que, na opinião dos entrevistados, o método poderia enfrentar alguma resistência em sua implementação, mas ainda assim não seria muito difícil de ser implementado.

**Figura 20 – Primeira pergunta sobre operacionalidade**

Você acredita que este programa teria dificuldade em ser implementado na empresa?

3 respostas



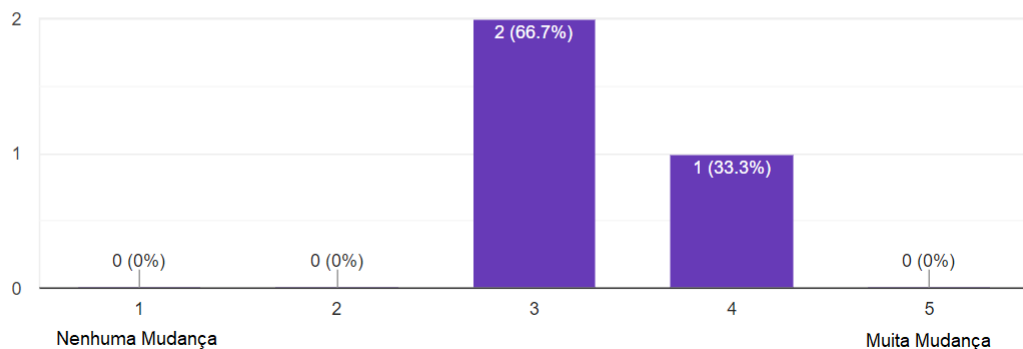
Fonte: O próprio autor (2020).

A segunda pergunta da avaliação de operacionalidade foi “O quanto você avalia que será necessário mudar em termos de estrutura da empresa para a implementação do programa?”. Sendo o valor 1 para nenhuma mudança, e o valor 5 para muita mudança. Como pode ser notado na Figura 21, os entrevistados acreditam que serão necessárias mudanças estruturais.

**Figura 21 – Segunda pergunta sobre operacionalidade**

O quanto você avalia que será necessário mudar em termos de estrutura da empresa para a implementação do programa?

3 respostas



Fonte: O próprio autor (2020).

Como pode ser constatado pela percepção dos entrevistados, o método pode enfrentar resistências em uma futura etapa de implementação na empresa. Muito provavelmente o método enfrentará uma barreira adaptativa, que todo método novo sofre, pois geralmente os funcionários são avessos a mudanças. E existe uma barreira estrutural, em que mudanças no sistema terão que ser realizadas para implementar o método, ou então, o método terá de ser hospedado de

maneira online.

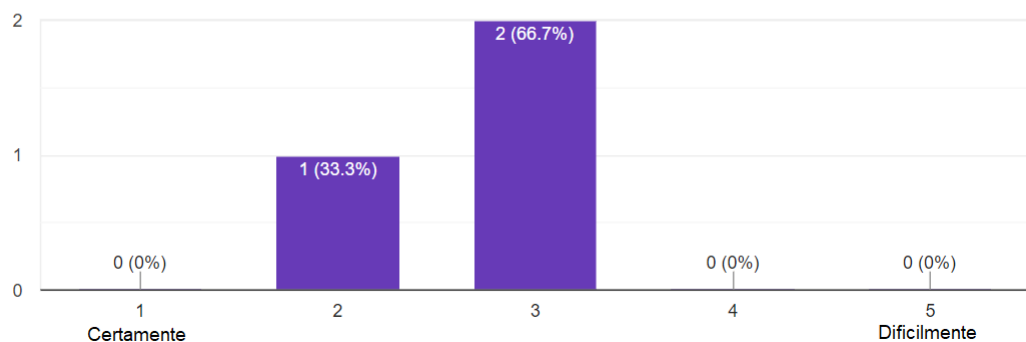
#### 4.3.4 GENERALIDADE

A avaliação de generalidade busca identificar se na percepção dos entrevistados o método poderia ser adaptado para solucionar outros problemas. A primeira questão dessa categoria foi “Você acredita que esse método pode ser adaptado para solucionar outros problemas no setor?”. Sendo o valor 1 para certamente, e o valor 5 para dificilmente. Como apresentado na Figura 22, os entrevistados tendem a acreditar que não seria difícil adaptar o método para resolver outros problemas do setor.

**Figura 22** – Primeira pergunta sobre generalidade

Você acredita que esse método pode ser adaptado para solucionar outros problemas no setor?

3 responses



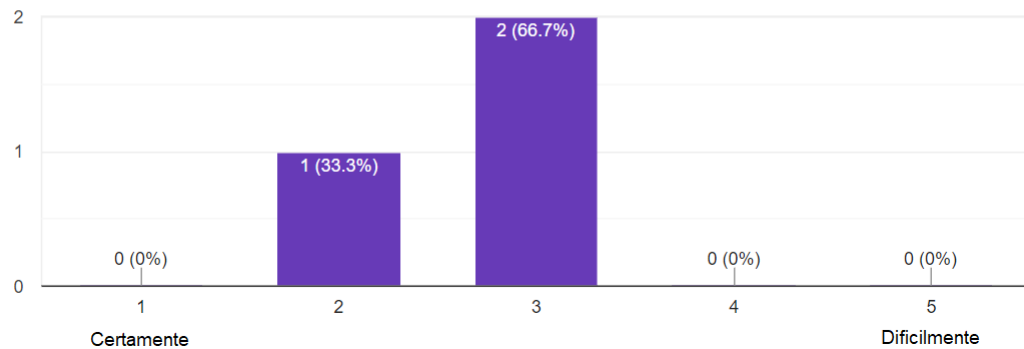
Fonte: O próprio autor (2020).

A segunda questão sobre generalidade foi “Você acredita que esse método pode ser adaptado para solucionar problemas em outros setores da empresa?”. Como pode ser notado na Figura 23, a resposta dos entrevistados foi a mesma da questão anterior. Assim, é percebido que eles acreditam que o método poderia auxiliar outros setores sem grandes dificuldades.

**Figura 23 – Segunda pergunta sobre generalidade**

Você acredita que esse método pode ser adaptado para solucionar problemas em outros setores da empresa?

3 respostas



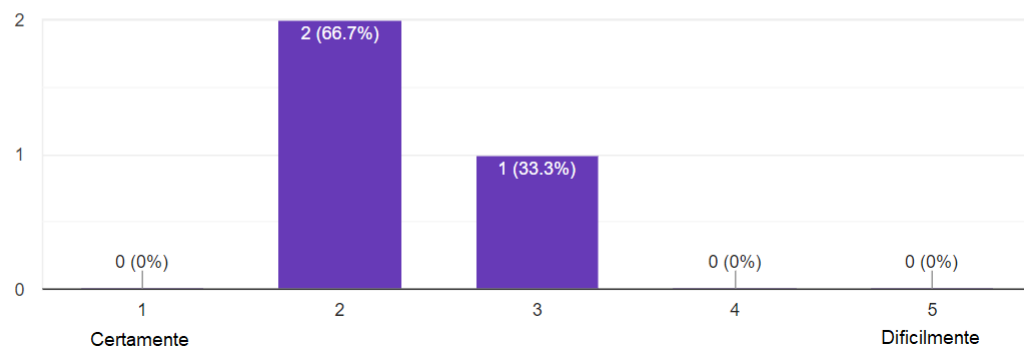
Fonte: O próprio autor (2020).

A terceira questão posta aos entrevistados foi “Você acredita que esse método pode ser adaptado para solucionar problemas em outras empresas?”. E como pode ser visto na Figura 24, os entrevistados tendem a ter uma visão mais positiva da aplicação do método em outras empresas.

**Figura 24 – Terceira pergunta sobre generalidade**

Você acredita que esse método pode ser adaptado para solucionar problemas em outras empresas?

3 respostas



Fonte: O próprio autor (2020).

Analisando as respostas das três questões, é notado um certo otimismo em relação a generalidade do método. Principalmente no que se refere a aplicação em outras empresas. Várias indústrias utilizam processos de corte de matéria prima. E o método poderia ser adaptado para solucionar outras problemáticas, além das atividades de corte.

## 5 CONCLUSÃO

A formulação de um PP eficiente é uma das decisões estratégicas mais importantes que uma empresa pode tomar. Quanto mais precisas forem as previsões realizadas pela empresa, melhores serão os seus resultados. O planejamento errôneo de produção pode elevar custos de produção, gerar estoques desnecessários, gerar atrasos, aumentar o desperdício de matéria prima e diminuir o lucro e credibilidade da empresa. O trabalho foi desenvolvido com o intuito de auxiliar uma empresa parceira a melhorar o PP e reduzir a quantidade de matéria-prima desperdiçada pela mesma.

Para desenvolver uma visão mais ampla sobre o tema, foi realizado uma análise bibliométrica e sistêmica, utilizando o método *ProKnow-C*. Assim, foi possível perceber as inúmeras dificuldades que as empresas têm no processo de formulação do PP. Muitas das dificuldades vêm das características particulares de cada empresa, se tornando um terreno fértil para o desenvolvimento de estudos científicos. Dentre as várias possibilidades de abordagem, este trabalhou buscou desenvolver um método, que por meio de GA fornecesse um PP que considere a quantidade de resíduos gerados no processo de corte e atenda as demandas de peças da empresa parceira nos dias necessários.

O método foi desenvolvido utilizando a linguagem *Python*, e foi demonstrada a sua funcionalidade com os dados fornecidos pela empresa parceira. Apesar de utilizar uma simplificação para calcular a distribuição espacial das peças nas chapas metálica, para o exemplo específico simulado e comparando com os resultados apresentados pelo software já adotado pela empresa, o método apresentou erros percentuais de apenas 1% em relação ao aproveitamento de chapas e 3% em relação a quantidade de resíduos gerados.

Em relação à avaliação do método, quatro categorias foram consideradas. No que diz respeito ao desempenho, para o caso estudado, o método cumpriu seu objetivo, pois reduziu a quantidade de resíduos gerados e aumentou o aproveitamento das chapas. Em relação à facilidade de uso, os engenheiros da empresa parceira demonstram que apesar da possibilidade de haver algumas dificuldades, eles conseguiriam utilizar o método. Ao analisar a operacionalidade, os engenheiros avaliam que mudanças teriam que ser realizadas na empresa, mas nada muito difícil de ser realizado. E em relação à generalidade do método, os engenheiros acreditam que ele poderia ser adaptado para solucionar outros problemas do próprio setor,

problemas de outros setores e até de outras empresas.

A maior dificuldade enfrentada no desenvolvimento do método foi a questão de acesso à empresa parceira no período de pandemia do COVID-19. As medidas sanitárias adotadas, acabaram reduzindo bastante o número de visitas que o pesquisador poderia efetuar na empresa parceira. Isso influenciou diretamente na demonstração e avaliação do método. Pois era desejável que o método pudesse ser exposto a outros cenários, com outras matérias-primas e outros períodos. Contudo, a licença do software de *nesting* que a empresa usa, só poderia ser utilizada internamente. Assim, foi reduzido o número de comparações que poderiam ser realizadas.

Para trabalhos futuros, o cálculo do *fitness* do método poderia ser melhorado utilizando técnicas de identificação de sistemas, dos tipos *Multiple Inputs Single Output* ou *Multiple Inputs Multiple Outputs*. Outra possibilidade, seria a resolução do problema utilizando outras técnicas de AI, como *Simulated Annealing*, *Tabu Search* e possivelmente até redes neurais. Assim, a rede poderia ser treinada com os dados históricos de aproveitamento de chapas da empresa. Também poderia ser avaliada a inserção de outras variáveis no método, *e.g.* custos e logística.

Por fim, ao serem ponderados os objetivos definidos na introdução do trabalho. O trabalho cumpriu seu objetivo geral e objetivos específicos. O método foi disponibilizado para a empresa parceira e poderá ser implementado, caso os gestores assim decidirem.

## REFERÊNCIAS

- AFONSO, M. H. F. et al. Como Construir Conhecimento Sobre O Tema De Pesquisa? Aplicação Do Processo Proknow-C Na Busca De Literatura Sobre Avaliação Do Desenvolvimento Sustentável. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 5, n. 2, p. 47–62, 2012.
- AL-E-HASHEM, S. M. J. M.; ARYANEZHAD, M. B.; SADJADI, S. J. An efficient algorithm to solve a multi-objective robust aggregate production planning in an uncertain environment. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 58, n. 5-8, p. 765–782, 2012.
- ARENALES, M. N. et al. **Pesquisa operacional**. [S.l.]: Elsevier, 2007. 3–5 p.
- ARTIBA, A.; ELMAGHRABY, S. E. **The planning and scheduling of production systems: methodologies and applications**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 1996. 1–5 p.
- BARTH, H.; MELIN, M. A Green Lean approach to global competition and climate change in the agricultural sector – A Swedish case study. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier Ltd, v. 204, p. 183–192, 2018.
- BAUMERS, M. et al. The cost of additive manufacturing: Machine productivity, economies of scale and technology-push. **Technological Forecasting and Social Change**, Elsevier Inc., v. 102, p. 193–201, 2016.
- CHAKRABORTTY, R. K. et al. A possibilistic environment based particle swarm optimization for aggregate production planning. **Computers and Industrial Engineering**, Elsevier Ltd, v. 88, p. 366–377, 2015.
- CHERAGHALIKHANI, A.; KHOSHALHAN, F.; MOKHTARI, H. **Aggregate production planning: A literature review and future research directions**. [S.l.]: Growing Science, 2019. v. 10. 309–330 p.
- CHERGUI, A.; HADJ-HAMOU, K.; VIGNAT, F. Production scheduling and nesting in additive manufacturing. **Computers and Industrial Engineering**, Elsevier, v. 126, n. September, p. 292–301, 2018.
- CHO, H. M.; JEONG, I. J. A two-level method of production planning and scheduling for bi-objective reentrant hybrid flow shops. **Computers and Industrial Engineering**, Elsevier Ltd, v. 106, p. 174–181, 2017.
- COPPIN, B. **Inteligência artificial**. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2010. 4–5 p.
- CORRÊA, H. L.; GIANESI, I. G.; CAON, M. **Planejamento, programação e controle da produção**. [S.l.: s.n.], 2001. v. 1. 10–15 p.
- DEB, K. et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 6, n. 2, p. 182–197, 2002.

- DU, B.; GUO, S. Production planning conflict resolution of complex product system in group manufacturing: A novel hybrid approach using ant colony optimization and Shapley value. **Computers and Industrial Engineering**, Elsevier Ltd, v. 94, p. 158–169, 2016.
- FANG, C. C.; LAI, M. H.; HUANG, Y. S. Production planning of new and remanufacturing products in hybrid production systems. **Computers and Industrial Engineering**, Elsevier Ltd, v. 108, p. 88–99, 2017.
- GAJPAL, Y.; NOURELFATH, M. Two efficient heuristics to solve the integrated load distribution and production planning problem. **Reliability Engineering and System Safety**, Elsevier, v. 144, p. 204–214, 2015.
- GHOBAKHLOO, M.; CHING, N. T. Adoption of digital technologies of smart manufacturing in SMEs. **Journal of Industrial Information Integration**, Elsevier, v. 16, p. 100–107, 2019.
- GOGNA, A.; TAYAL, A. Metaheuristics: review and application. **Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence**, Taylor & Francis, v. 25, n. 4, p. 503–526, 2013.
- GRAMANI, M. C. N.; FRANÇA, P. M.; ARENALES, M. N. A linear optimization approach to the combined production planning model. **Journal of the Franklin Institute**, v. 348, n. 7, p. 1523–1536, 2011.
- HEVNER, A.; CHATTERJEE, S. **Design Research in Information Systems: Theory and Practice**. [S.l.: s.n.], 2010. v. 22. 1–8 p.
- HEVNER, A. R. et al. Design science in information systems research. **MIS Quarterly: Management Information Systems**, v. 28, n. 1, p. 75–105, 2004.
- HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2010. 1–22 p.
- HU, X.; DUENYAS, I.; KAPUSCINSKI, R. Optimal joint inventory and transshipment control under uncertain capacity. **Operations Research**, v. 56, n. 4, p. 881–897, 2008.
- ISHIZAKA, A.; NEMERY, P. **Multi-criteria decision analysis: methods and software**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013.
- JI, Q.; WANG, Y.; HU, X. Optimal production planning for assembly systems with uncertain capacities and random demand. **European Journal of Operational Research**, Elsevier B.V., v. 253, n. 2, p. 383–391, 2016.
- KAVEH, A. **Advances in metaheuristic algorithms for optimal design of structures**. [S.l.]: Springer, 2017. 1–2 p.
- KILGER, C.; REUTER, B.; STADTLER, H. Collaborative planning. In: **Supply Chain Management and Advanced Planning (Fourth Edition): Concepts, Models, Software, and Case Studies**. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2008. p. 263–284.
- LIMA, I.; PINHEIRO, C. A.; SANTOS, F. A. O. **Inteligência artificial**. [S.l.]: Elsevier Brasil, 2014. v. 1. 1–2 p.
- LIN, J. et al. A multi-objective optimization approach for integrated production planning under interval uncertainties in the steel industry. **Computers and Operations Research**, Elsevier, v. 72, p. 189–203, 2016.



- LU, F. M. The role of agricultural mechanization in the modernization of asian agriculture taiwan's experience. **Engineering in Agriculture, Environment and Food**, Asian Agricultural and Biological Engineering Association (AABEA), v. 2, n. 4, p. 124–131, 2009.
- LU, H. C.; HUANG, Y. H. An efficient genetic algorithm with a corner space algorithm for a cutting stock problem in the TFT-LCD industry. **European Journal of Operational Research**, Elsevier Ltd., v. 246, n. 1, p. 51–65, 2015.
- LU, Y. Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. **Journal of Industrial Information Integration**, Elsevier Inc., v. 6, p. 1–10, 2017.
- LUGER, G. F. **Artificial intelligence: structures and strategies for complex problem solving**. [S.l.]: Pearson education, 2005. 5–10 p.
- LUKAČ, D. The fourth ICT-based industrial revolution "industry 4.0- HMI and the case of CAE/CAD innovation with EPLAN P8. In: **23 Telecommunications Forum, TELFOR 2015**. [S.l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2015. p. 835–838.
- LUSTOSA, L. J.; MESQUITA, M. A. de; OLIVEIRA, R. J. **Planejamento e controle da produção**. [S.l.]: Elsevier Brasil, 2008. 10 p.
- MARCH, S. T.; SMITH, G. F. Design and natural science research on information technology. **Decision Support Systems**, v. 15, n. 4, p. 251–266, 1995.
- MITCHELL, T. M. **Machine learning**. [S.l.]: Burr Ridge, IL: McGraw Hill, 1997. 1–10 p.
- MOREIRA, D. A. **Pesquisa operacional: curso introdutório**. [S.l.]: Cengage Learning, 2010. 5–20 p.
- PASSOS, E. J. P. F. d. **Programação linear como instrumento da pesquisa operacional**. [S.l.]: Editora Atlas SA, 2008.
- PEFFERS, K. et al. A design science research methodology for information systems research. **Journal of Management Information Systems**, v. 24, n. 3, p. 45–77, 2007.
- POCHET, Y.; WOLSEY, L. A. **Production planning by mixed integer programming**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2006. 7–37 p.
- POLDI, K. C.; ARAUJO, S. A. de. Mathematical models and a heuristic method for the multiperiod one-dimensional cutting stock problem. **Annals of Operations Research**, Springer US, v. 238, n. 1-2, p. 497–520, 2016.
- POLI, R. et al. **A field guide to genetic programming**. [S.l.]: Lulu. com, 2008. 2 p.
- POLOTSKI, V.; KENNE, J. P.; GHARBI, A. Optimal production scheduling for hybrid manufacturing-remanufacturing systems with setups. **Journal of Manufacturing Systems**, The Society of Manufacturing Engineers, v. 37, p. 703–714, 2015.
- ROBLEK, V.; MEŠKO, M.; KRAPEŽ, A. A Complex View of Industry 4.0. **SAGE Open**, v. 6, n. 2, 2016.
- SIMON, H. A. Why should machines learn? In: **Machine Learning**. [S.l.]: Elsevier, 1983. p. 25–37.

SINGHAL, D.; TRIPATHY, S.; KUMAR, S. Resources , Conservation & Recycling Remanufacturing for the circular economy : Study and evaluation of critical factors. **Resources, Conservation & Recycling**, Elsevier, v. 156, p. 104–681, 2020.

TORKAMAN, S.; Fatemi Ghomi, S. M.; KARIMI, B. Multi-stage multi-product multi-period production planning with sequence-dependent setups in closed-loop supply chain. **Computers and Industrial Engineering**, Elsevier, v. 113, n. September, p. 602–613, 2017.

TORKAMAN, S.; GHOMI, S. M. T. F.; KARIMI, B. Hybrid simulated annealing and genetic approach for solving a multi-stage production planning with sequence-dependent setups in a closed-loop supply chain. **Applied Soft Computing Journal**, Elsevier Ltd, v. 71, p. 1085–1104, 2018.

VAIDYA, S.; AMBAD, P.; BHOSLE, S. Industry 4.0 - A Glimpse. **Procedia Manufacturing**, Elsevier B.V., v. 20, p. 233–238, 2018.

XU, L. D.; XU, E. L.; LI, L. Industry 4.0: State of the art and future trends. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 8, p. 2941–2962, 2018.

YAN, H. S.; WAN, X. Q.; XIONG, F. L. Integrated production planning and scheduling for a mixed batch job-shop based on alternant iterative genetic algorithm. **Journal of the Operational Research Society**, v. 66, n. 8, p. 1250–1258, 2015.

ZHOU, K.; LIU, T.; ZHOU, L. Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges. **2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, FSKD 2015**, IEEE, p. 2147–2152, 2016.

## APÊNDICE A – ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E SISTÊMICA

### A.1 INTRODUÇÃO

O planejamento da produção é uma das decisões estratégicas mais importantes que uma empresa pode tomar (KILGER; REUTER; STADTLER, 2008). Ele é um elemento fundamental no controle de custos nas empresas. O planejamento de produção determina a quantidade e a sequência em que os produtos serão produzidos para atender à solicitação em um horizonte de tempo (CHO; JEONG, 2017). Devido à complexidade desse tipo de problema, é necessário muito esforço computacional. Nesse sentido, o uso de conceitos da indústria 4.0, como inteligência artificial, tem ajudado as empresas a formular planos de produção ótimos ou quase ótimos para o seu processo em um tempo satisfatório (DU; GUO, 2016).

O conceito de Indústria 4.0 surgiu na Alemanha em 2011. E em 2013 tornou-se uma iniciativa oficial para revolucionar o sistema de fabricação alemão (XU; XU; LI, 2018). Este conceito propõe a construção de um sistema de produção super flexível, com produtos e serviços personalizados, e com interações em tempo real entre pessoas, produtos e o processo de produção (ZHOU; LIU; ZHOU, 2016). A indústria 4.0 pode ser dividida em cinco partes principais: digitalização; otimização e customização da produção; adaptação e automação; interação homem-máquina; serviços e negócios de valor agregado; e comunicação e troca automática de dados (ROBLEK; MEŠKO; KRAPEŽ, 2016).

Como cada empresa possui características e variáveis diferentes, as possibilidades de formular e otimizar um planejamento de produção são diversas. Assim, muitos estudos de caso podem ser realizados. Dessa forma, uma enorme variedade de oportunidades de pesquisa é disponibilizada. Para tanto, foi realizada uma análise bibliométrica e sistêmica sobre otimização do planejamento da produção, com o objetivo de encontrar temas comuns entre os artigos e oportunidades para trabalhos futuros.

Na Seção A.2 é apresentada a metodologia da pesquisa. Na Seção A.3 é apresentado o processo para filtrar o portfólio bibliométrico. Na Seção A.4, é feita a revisão bibliométrica. Na Seção A.5, a análise sistêmica é apresentada. Então, na Seção A.6, contém a conclusão.

## A.2 ASPECTOS METODOLÓGICOS

A primeira coisa que as pesquisas fazem para desenvolver um trabalho é construir conhecimento em algum contexto e uma revisão bibliométrica sobre o assunto. Frequentemente, pesquisadores têm dificuldade em encontrar a informação desejada e perdem tempo com leituras não essenciais (AFONSO et al., 2012). Nesse sentido, foi utilizado o método *Knowledge Development Process - Constructivist* (ProKnow-C).

O ProKnow-C foi desenvolvido pelo Laboratório de Metodologias Multicritério em Apoio à Decisão (LabMCDA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). O ProKnow-C é uma metodologia que busca o desenvolvimento do conhecimento, ele é estruturado em quatro etapas. A primeira etapa é a seleção do portfólio bibliográfico, a segunda é a análise bibliométrica do portfólio, a terceira é a análise sistêmica do portfólio e a quarta etapa é a elaboração das oportunidades de pesquisa (AFONSO et al., 2012).

O ProKnow-C ajuda a desenvolver o conhecimento sobre o assunto da pesquisa selecionando os artigos mais relevantes. Nesse sentido, são verificados os principais autores sobre o tema, as principais palavras-chave e o prestígio científico. Este método foi aplicado em muitos campos, por exemplo, administração pública e divulgação ambiental (AFONSO et al., 2012).

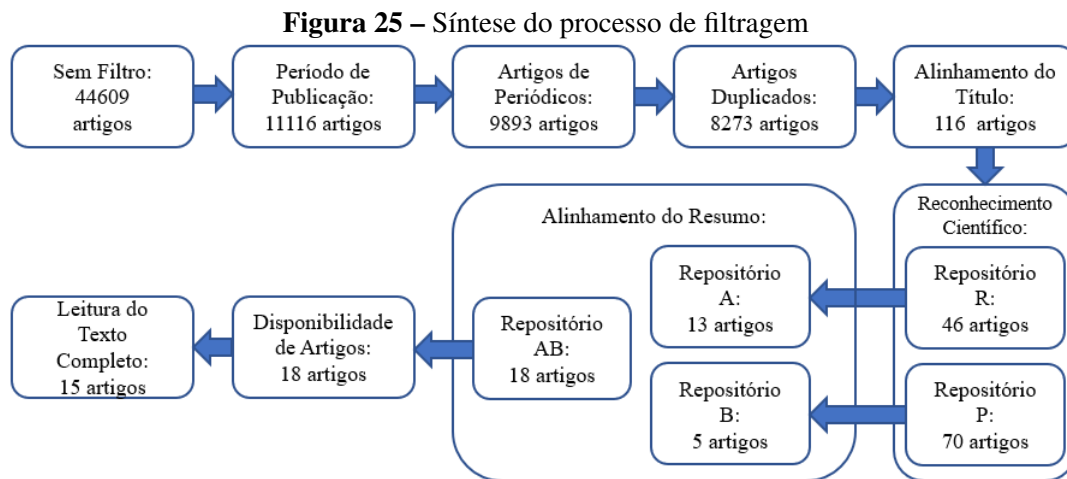
## A.3 SELEÇÃO DO PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO

O primeiro passo para pesquisar artigos é definir o eixo de pesquisa. Neste trabalho, foram definidos três eixos. O primeiro é planejamento da produção, o segundo é otimização e o terceiro é manufatura. As palavras-chave escolhidas para o primeiro eixo foram *Production Planning* e *Rolling Horizon*; para o segundo eixo foram *Optimization*, *Optimal Production* e *Nesting*; e para o terceiro eixo, foram *Manufacturing*, *Supply Chain*, *Industrial* e *Metal Industry*. Para criar a chave de pesquisa, foi necessário o uso dos operadores booleanos “AND” e “OR”. Portanto, a chave de busca foi (“*PRODUCTION PLANNING*”OR “*ROLLING HORIZON*”) AND (“*OPTIMIZATION*”OR “*OPTIMAL PRODUCTION*”OR “*NESTING*”) AND (“*SUPPLY CHAIN*”OR “*INDUSTRIAL*”OR “*MANUFACTURING*”OR “*METAL INDUSTRY*”).

O próximo passo foi escolher os bancos de dados para pesquisar os artigos. Nesta etapa, foram escolhidas algumas das bases de dados relevantes disponíveis no portal periódico da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), com base em áreas correlacionadas e na possibilidade de busca avançada. Os bancos de dados selecionados foram: *ScienceDirect* (Elsevier), *Scopus* (Elsevier), *ProQuest*, *SAGE Journals*, *Springer Link*, *Web of*

*Science e EBSCOhost.*

Após a seleção dos bancos de dados, a chave de busca foi aplicada em cada um dos bancos de dados. Foram encontrados 44609 artigos. Nesse sentido, foi necessário o utilizar alguns filtros para reduzir o tamanho do portfólio. A Figura 25 apresenta uma síntese do processo de filtragem.



Fonte: O Autor

- **Período de Publicação:** Somente artigos dos últimos 5 anos (2015-2020) foram considerados, portanto, os artigos publicados antes de 2015 foram descartados. Dessa forma, o número de artigos selecionados foi caiu para 11116, representando 24,92% do portfólio inicial.
- **Artigos de Periódicos:** Apenas artigos periódicos foram considerados. O número de artigos selecionados caiu para 9893, representando 22,18% do portfólio inicial.
- **Artigos Duplicados:** O portfólio foi poluído com artigos repetidos. Esses artigos de reposição foram excluídos, e o tamanho do portfólio caiu para 8273, representando 18,55% do valor inicial.
- **Alinhamento do Título:** Nesta etapa, foram descartados os artigos que o título não correspondia ao assunto. Apenas 116 artigos permaneceram no portfólio, representando 0,26% do portfólio inicial.
- **Reconhecimento Científico:** Nesta etapa, o portfólio foi dividido em dois grupos. O Repositório R representa o grupo de artigos que já possuem reconhecimento científico comprovado. E o Repositório P representa os artigos que não possuem reconhecimento científico relevante. Para fazer esta divisão foi necessário coletar o número de vezes que

cada artigo foi citado. Os artigos foram ordenados dos mais citados aos menos citados. Dessa forma, foram selecionados os artigos com o maior número de citações, e que juntos possuíam 80% do total de citações, para compor o Repositório R, totalizando 46 artigos. Os demais artigos foram colocados no Repositório P, totalizando 70 artigos.

- Alinhamento do Resumo: Nesta etapa, foi lido o resumo de todos os artigos do Repositório R. E os artigos que tiveram o resumo alinhado com o sujeito da pesquisa foram colocados no Repositório A, totalizando 13 artigos. Para o Repositório P, foram lidos os resumos dos artigos que foram publicados a partir de 2018 ou aqueles que foram escritos por pelo menos um autor pertencente ao Repositório A. Os artigos que tiveram seus resumos alinhados com o sujeito da pesquisa foram colocados no Repositório B, totalizando 5 artigos. Assim, foi criado o Repositório AB, contendo os artigos dos Repositórios A e B, totalizando 18 artigos e representando 0,04% do portfólio inicial.
- Disponibilidade de Artigos: Todos os artigos do Repositório AB tinham seu texto completo disponível para acesso.
- Leitura do Texto Completo: Todos os artigos do Repositório AB foram lidos na íntegra e 15 artigos foram selecionados para compor o portfólio bibliográfico desta pesquisa, representando 0,03% do portfólio inicial.

#### A.4 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DO PORTFÓLIO

Na etapa de análise bibliométrica, é realizada uma análise estatística dos 15 artigos pertencentes ao portfólio bibliográfico da pesquisa. A primeira análise é a relevância do periódico. Para realizar esta análise foi comparado o número de artigos publicados em cada periódico. Nesse sentido, o periódico mais relevante foi *Computers and Industrial Engineering*, que representam 20% do portfólio. Essa comparação pode ser vista na Figura 26.

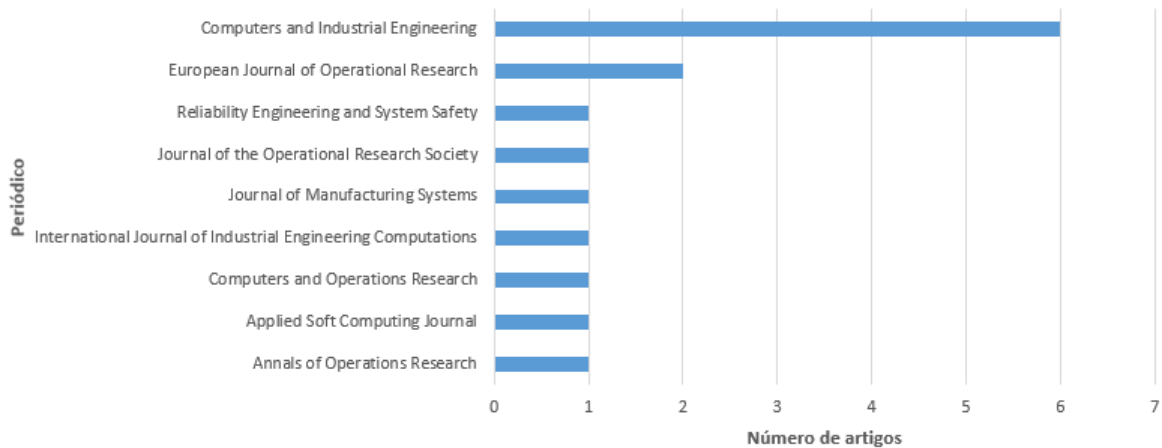
O Quadro 4 foi desenvolvido com o objetivo de analisar o reconhecimento científico do portfólio. O artigo mais citado foi *A possibilistic environment-based particle swarm optimization for aggregate production planning*, sendo citado 30 vezes, representando 11,19% do número total de citações. O artigo menos citado *Aggregate production planning: A literature review and future research directions*, citado 6 vezes, representando 2,24% do número total de citações.

Os 15 artigos pertencentes ao portfólio foram escritos por 39 autores. 92,30% dos autores escreveram apenas um artigo do portfólio. Somayeh Torkaman, S.M.T. Fatemi Ghomi

**Quadro 4 – Número de citações em cada artigo**

Artigo	Citações
<i>A possibilistic environment-based particle swarm optimization for aggregate production planning</i>	30
<i>Production scheduling and nesting in additive manufacturing</i>	28
<i>Optimal production planning for assembly systems with uncertain capacities and random demand</i>	28
<i>A multi-objective optimization approach for integrated production planning under interval uncertainties in the steel industry</i>	26
<i>Optimal production scheduling for hybrid manufacturing-remanufacturing systems with setups</i>	24
<i>Mathematical models and a heuristic method for the multiperiod one-dimensional cutting stock problem</i>	20
<i>An efficient genetic algorithm with a corner space algorithm for a cutting stock problem in the TFT-LCD industry</i>	18
<i>Integrated production planning and scheduling for a mixed batch job-shop based on alternant iterative genetic algorithm</i>	18
<i>Production planning of new and remanufacturing products in hybrid production systems</i>	17
<i>Production planning conflict resolution of complex product system in group manufacturing: A novel hybrid approach using ant colony optimization and Shapley value</i>	16
<i>A two-level method of production planning and scheduling for bi-objective reentrant hybrid flow shops</i>	12
<i>Two efficient heuristics to solve the integrated load distribution and production planning problem</i>	10
<i>Multi-stage multi-product multi-period production planning with sequence-dependent setups in closed-loop supply chain</i>	8
<i>Hybrid simulated annealing and genetic approach for solving a multi-stage production planning with sequence-dependent setups in a closed-loop supply chain</i>	7
<i>Aggregate production planning: A literature review and future research directions</i>	6

**Fonte:** O Autor

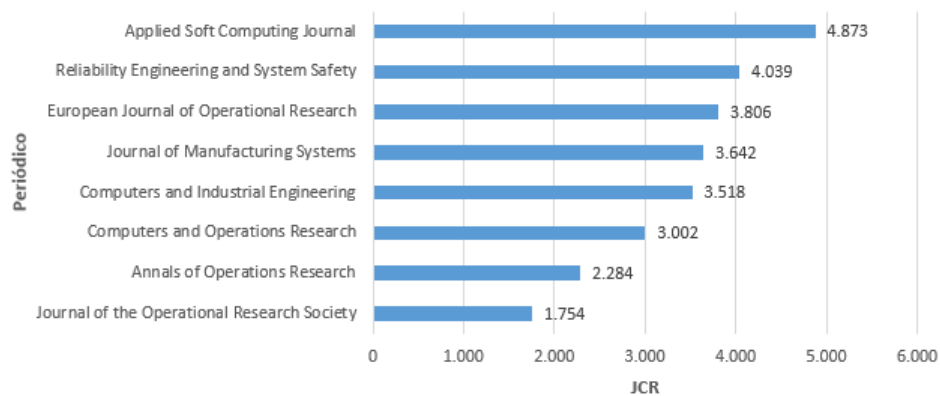
**Figura 26 – Relevância do Periódico**

Fonte: O Autor

e Behrooz Karimi foram os únicos autores que têm mais de um artigo escrito no portfólio. Eles escreveram juntos 2 artigos, representando 12,33% do portfólio.

Entre os 15 artigos do portfólio, foram identificadas 63 palavras-chave. Apenas 9,52% das palavras-chave foram usadas em mais de um artigo. A palavra-chave mais relevante foi *Production Planning*, sendo usado 8 vezes. Seguido por *Closed-loop supply chain*, *Flow shop*, *Genetic algorithm*, *Reverse logistics* e *Rolling Horizon*, sendo usados 2 vezes cada.

Para analisar o fator de impacto dos periódicos, foi utilizada a edição 2018 do *Journal Citation Report (JCR)*. O *International Journal of Industrial Engineering Computations* não foi considerado porque não possui um JCR. O periódico com o JCR mais alto foi o *Applied Soft Computing Journal* com fator de impacto de 4.873. Na Figura 27, é apresentado um gráfico mostrando cada periódico com seu respectivo JCR.

**Figura 27 – Análise do JCR**

Fonte: O Autor



A última análise é sobre o ano das publicações dos 15 artigos do portfólio. 2015 foi o ano com o maior número de publicações. Cinco artigos foram publicados naquele ano, representando 33,33% do portfólio. Na Figura 28 é possível observar o número total de artigos do portfólio publicados em cada ano.



Fonte: O Autor

## A.5 ANÁLISE SISTÊMICA DO PORTFÓLIO

A análise sistêmica procura construir o conhecimento em torno do assunto de pesquisa. Após a leitura dos 15 artigos do portfólio, foi realizada uma análise de conteúdo. A análise envolvia encontrar os principais problemas de pesquisa, os meios para resolvê-los, tendências e oportunidades futuras de pesquisa.

Os problemas de planejamento da produção podem ser misturados com muitos outros problemas, por exemplo, *nesting* no processo de manufatura aditiva (CHERGUI; HADJ-HAMOU; VIGNAT, 2018), linhas de montagem com capacidade incerta e demanda aleatória (JI; WANG; HU, 2016), sistemas de produção complexos (DU; GUO, 2016), *hybrid flow shops* (CHO; JEONG, 2017), distribuição de carga (GAJPAL; NOURELFATH, 2015), incertezas na produção (LIN et al., 2016) e programação de produção (YAN; WAN; XIONG, 2015). Essas variedades de aplicações fazem o planejamento de produção um assunto muito abrangente, e com muitas oportunidades para pesquisas futuras.

Torkaman, Fatemi Ghomi e Karimi (2017) e Torkaman, Ghomi e Karimi (2018) estudaram um problema de planejamento de produção em uma cadeia de suprimentos com ciclo fechado. O problema é formulado usando a programação inteira mista. Para resolver o modelo, foram desenvolvidas heurísticas considerando um horizonte rolante. Torkaman, Fatemi Ghomi e Karimi (2017) utilizaram o algoritmo *Simulated Annealing* para resolver o problema.

Torkaman, Ghomi e Karimi (2018) utilizaram um algoritmo híbrido entre *Simulated Annealing* e algoritmo genético. Para trabalhos futuros, sugere-se considerar as incertezas relacionadas à remanufatura, como a quantidade e a qualidade dos produtos devolvidos e o tempo de reprocessamento, além de resolver o problema como um problema de múltiplos objetivos.

Outro problema que tem um enorme impacto no planejamento da produção é a logística reversa. Fang, Lai e Huang (2017) e Polotski, Kenne e Gharbi (2015) enfrentaram o desafio de coordenar um sistema de produção que possui produtos novos e remanufaturados. Esses sistemas são conhecidos como sistemas híbridos. Polotski, Kenne e Gharbi (2015) focaram a pesquisa em abordar a programação de produção ideal para sistemas híbridos. Por outro lado, Fang, Lai e Huang (2017) consideraram a limitação de capacidade, durabilidade do produto usado reciclado, concorrência entre os produtos novos e usados e lucro total maximizado. Como trabalho futuro, propõe-se incorporar os estoques do produto remanufaturado para investigar o impacto na lucratividade.

Desenvolver uma técnica que agrega todas as informações de produção é uma tarefa difícil. Esse problema é chamado de Planejamento de Produção Agregada. Para resolver um estudo de caso com este problema, Chakraborty et al. (2015) propuseram uma abordagem que minimiza o risco de obter o maior custo total e maximiza as possibilidades de obter o menor custo total. Para tal, foi utilizada otimização de enxame de partículas e algoritmo genético. Cheraghalikhani, Khoshalhan e Mokhtari (2019) fizeram uma revisão sobre esse assunto e, para trabalhos futuros, foi proposto o estudo de modelos estocásticos e de múltiplos objetivos para planejamento agregado de produção.

Segundo Poldi e Araujo (2016) o problema de corte multi-período surge no planejamento da produção de muitas indústrias. Lu e Huang (2015) investigaram um problema de corte bidimensional na indústria de telas de cristal líquido de transistores de filme fino. A programação inteira mista foi usada para modelar o problema. Devido à sua complexidade, foi necessário o uso de algoritmo genético para encontrar uma solução. Poldi e Araujo (2016) apresentaram um modelo matemático para resolver um problema semelhante, a diferença era que para este caso o corte era unidimensional. Para pesquisas futuras, é necessário desenvolver mais soluções para problemas de corte bidimensional e integrar o dimensionamento de lote ao problema de corte.

Através da análise sistêmica do portfólio, algumas oportunidades de pesquisa se destacaram. São elas:

- Otimizar um planejamento de produção considerando incertezas no processo e falhas aleatórias.

- Otimizar um planejamento de produção considerando objetivos múltiplos e usando algoritmos híbridos na solução.
- Otimizar um planejamento de produção de problemas de corte bidimensional e/ou tridimensional.
- Otimizar o planejamento de produção de um problema de corte considerando mais variáveis do processo, por exemplo, custos de transporte, custos de configuração e prazo de entrega.
- Otimizar o planejamento da produção de um sistema híbrido, considerando o estoque de produtos remanufaturados e/ou regulamentação governamental.

## A.6 CONCLUSÃO

O planejamento da produção afeta diretamente a eficiência de uma empresa e, devido à sua complexidade, exige muito esforço computacional. Nesse sentido, os conceitos da indústria 4.0, por meio de técnicas de inteligência artificial, têm ajudado a formular planos de produção otimizados. Foi realizada uma análise bibliométrica e sistêmica, buscando construir um conhecimento sobre o assunto e encontrar oportunidades de pesquisa. A metodologia utilizada para a realização deste trabalho foi o ProKnow-C, pois ajuda a encontrar artigos mais alinhados com o assunto da pesquisa. No início, muitos artigos relacionados à chave de pesquisa foram encontrados. Nesse sentido, era necessário o uso de alguns filtros. Assim, ao final da seleção do portfólio bibliográfico, foram selecionados apenas 15 artigos. Foi realizada uma análise bibliométrica do portfólio, com o objetivo de descobrir a relevância científica dos artigos. E, finalmente, uma análise sistêmica foi feita para investigar o conteúdo dos artigos, destacar temas comuns e encontrar lacunas para trabalhos futuros.

## APÊNDICE B – CÓDIGO

### B.1 PRINCIPAL

```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 from ypstruct import structure
4 import csv
5 import FUNÇÕES
6 import copy
7
8 #Dados Problema
9 problema = structure()
10 problema.matrizPedidos = funcoes.extraiCSV('pedido.csv')
11 problema.matrizParametros = funcoes.extraiCSV('parametrosmassa.csv')
12 problema.limiteNovaChapa = 0
13 problema.massaChapa = 22600
14 problema.alfa = 1.39
15
16 #Parametros GA
17 parametros = structure()
18 parametros.maxit =50
19 parametros.npop = 150
20 parametros.pc = 1
21 parametros.mu = 0.02
22
23 #Run GA
24 out = funcoes.run(problema,parametros)
25
26 #Results
27 plt.plot(out.bestcostHistory)
28 #plt.semilogy(out.bestcost)
29 plt.xlim(0, parametros.maxit)
30 plt.xlabel('Iterations')
31 plt.ylabel('Waste reduction')
32 plt.title('Genetic Algorithm (GA)')
33 plt.grid(True)
34 plt.tight_layout()
35 plt.savefig('graf.png', format='png')
36 plt.show()
```

### B.2 FUNÇÕES

```
37 import numpy as np
```

```

38 import matplotlib.pyplot as plt
39 from ypstruct import structure
40 import csv
41 import copy
42
43 def run(problema,parametros):
44     #Dados Problema
45     maPedi = problema.matrizPedidos
46     maParam = problema.matrizParametros
47     limNovChapa = problema.limiteNovaChapa
48     massaChapa = problema.massaChapa
49     alfa = problema.alfa
50
51     #Parametros GA
52     maxit = parametros.maxit
53     npop = parametros.npop
54     pc = parametros.pc
55     nc = int(np.round(pc*npop/2)*2)
56     mu = parametros.mu
57
58     #Empty individual template
59     empty_individual = structure()
60     empty_individual.position = copy.deepcopy(maPedi)
61
62     #Cria coluna para armazenar dados estoque
63     colunaEstoque = np.zeros(((len(maPedi)),1))
64     empty_individual.position = \
65         np.append(empty_individual.position, colunaEstoque, axis=1)
66     empty_individual.cost = None
67
68     #A melhor solucao encontrada
69     bestsol = empty_individual.deepcopy()
70     bestsol.cost = np.inf
71
72     #Inicializa a populacao
73     pop = empty_individual.repeat(npop)
74     tam_individual = len(pop[0].position[:,2])
75
76     #Cria lista com posição do primeiro elemento de cada tipo de peça
77     primeiroElemento = []
78     for vadr in list(set(maPedi[:,0])):
79         primeiroElemento.append(list(np.where(maPedi[:,0] == \
80             vadr)[0])[0])
81
82     # Cria a primeira geração da populacao
83     for i in range(npop):
84         for j in range(tam_individual):
85
86             #Puxa estoque da lista de parametros, ou pega do dia anterior
87             if j in primeiroElemento:
88                 pedidoEstoque = maPedi[j][2] -\
89                     maParam[int(np.where(maParam[:,0] == \
90                         pop[i].position[j][0])[0])[2]]
91             else:

```

```

92         pedidoEstoque = maPedi[j][2] - pop[i].position[j-1][3]
93     vMax = maParam[int(np.where(maParam[:,0] == \
94         pop[i].position[j][0])[0])[3] + pedidoEstoque
95     vMin = np.maximum(0, pedidoEstoque) # vmin nao pode ser menor que zero
96
97     #Seleciona quantas pecas serao construidas
98     pop[i].position[j][2] = np.random.randint(vMin,vMax+1)
99     pop[i].position[j][3] = pop[i].position[j][2] - pedidoEstoque
100     pop[i].cost = residuo(pop[i].position,maParam,limNovChapa,massaChapa,alfa)
101     if pop[i].cost < bestsol.cost:
102         bestsol = pop[i].deepcopy()
103
104 #Melhor custo das iteracoes
105 bestcost = np.empty(maxit)
106
107 #Main loop
108 for it in range(maxit):
109
110     costs = np.array([x.cost for x in pop])
111     avg_cost = np.mean(costs)
112     if avg_cost != 0:
113         costs = costs/avg_cost
114     probs = np.exp(-costs)
115
116     popc = []
117     for _ in range(nc//2):
118
119         #Seleciona pais por meio de Rolette Wheel
120         p1 = pop[rouletteWheel(probs)]
121         p2 = pop[rouletteWheel(probs)]
122
123         #Realiza o crossover
124         c1, c2 = crossover(p1, p2, primeiroElemento)
125
126         #Realiza a mutação
127         c1 = mutate(c1, mu, primeiroElemento)
128         c2 = mutate(c2, mu, primeiroElemento)
129
130         #adiciona Limites
131         c1, desp1 = adicionarLimites(c1, primeiroElemento, maParam)
132         c2, desp2 = adicionarLimites(c2, primeiroElemento, maParam)
133         print("Desp1: {}; Desp2: {}".format(desp1, desp2))
134
135         #Evaluate First Offspring
136         c1.cost = abs(desp1) + residuo(c1.position,maParam,limNovChapa,\
137             massaChapa,alfa)
138         if c1.cost < bestsol.cost:
139             bestsol = c1.deeppcopy()
140
141         #Evaluate Second Offspring
142         c2.cost = abs(desp2) + residuo(c2.position,maParam,limNovChapa,\
143             massaChapa,alfa)
144         if c2.cost < bestsol.cost:
145             bestsol = c2.deeppcopy()

```

```

146
147         #Add offsprings topopc
148         popc.append(c1)
149         popc.append(c2)
150
151     #Unir, ordenar e selecionar
152     pop += popc
153     pop = sorted(pop, key=lambda x: x.cost)
154     pop = pop[0:npop]
155
156     #Armazenar o menor custo
157     bestcost[it] = bestsol.cost
158
159     #Mostra a informacao das iteracoes
160     print("Iteração {}: Redução de Resíduos: {}".format(it, \
161         (bestcost[it]/100)))
162
163     #Prefinalização
164     bestsolFil = bestsol.deepcopy()
165     for j in range(len(bestsolFil.position)):
166         if j in primeiroElemento:
167             bestsolFil.position[j][3] = bestsolFil.position[j][2] + \
168                 maParam[int(np.where(maParam[:,0] == \
169                     bestsolFil.position[j][0])[0])][2] - maPedi[j][2]
170         else:
171             bestsolFil.position[j][3] = bestsolFil.position[j][2] + \
172                 bestsolFil.position[j-1][3] - maPedi[j][2]
173
174     bestsolFil = adicionarLimiteFinal(bestsolFil, primeiroElemento, maParam)
175     bestcostFil = residuo(bestsolFil.position,maParam,limNovChapa,\
176         massaChapa,alfa)
177
178     #output
179     out = structure()
180     out.pop = pop
181     out.bestsol = bestsolFil
182     out.bestcost = bestcostFil/100
183     out.bestcostHistory = bestcost/100
184     titulo = np.array(['tipo','data','quantidade','estoque'])
185     novoelemento = np.concatenate((titulo, out.bestsol.position), axis=0)
186     novoelemento2 = np.concatenate((titulo, bestsol.position), axis=0)
187     np.savetxt('versaomenor.csv', novoelemento2, fmt="%s", delimiter=";")
188     np.savetxt('values.csv', novoelemento, fmt="%s", delimiter=";")
189     totCha = chapasUsadas(out.bestsol.position,maParam,limNovChapa,\
190         massaChapa,alfa)
191     aproveitament = round(100 - ((out.bestcost)*100/(totCha*\
192         massaChapa/100)),2)
193     print("Número de Chapas: {}; Aproveitamento: {}".format(totCha,\
194         aproveitament))
195     ft1 = open("Resultados.txt", "w")
196     ft1.write("Número de Chapas: {}\nAproveitamento: {}\nResíduos: {} kg"\
197         .format(totCha, aproveitament, out.bestcost))
198     ft1.close()
199     return out

```

```

200
201
202 #Funcao para extrair dados csv e transformar em matriz
203 def extraiCSV(nomeArquivo):
204     #Extrai parametros do CSV
205     with open(nomeArquivo,'r') as arquivo:
206         leitor = csv.reader(arquivo, delimiter = ';')
207         parametrosArquivo = []
208         for x in leitor:
209             parametrosArquivo.append(x)
210
211     #Tira cabeçalho da tabela de massas e cria matriz(array)
212     del parametrosArquivo[0]
213     parametrosArray = np.empty((len(parametrosArquivo),\
214         len(parametrosArquivo[0])), int)
215
216     #Transforma Parametros de entrada em inteiros
217     for i in range(len(parametrosArquivo)):
218         for j in range(len(parametrosArquivo[i])):
219             parametrosArray[i][j] = int(parametrosArquivo[i][j])
220
221     return parametrosArray
222
223 #Funcao caucula residuo gerado
224 def residuo\
225     (pedido,maParametros,limiteNovaChapa,massaChapa,aproveitamentoChapa):
226
227     massaDia = {}
228     totalChapas = 0
229     consumido = 0
230
231     #Calcula a massa de todos os dias em um dicionário
232     for i in range(len(pedido)):
233         #se for a primeira massa ele cria o item, se nao, ele so adiciona
234         if pedido[i][1] in massaDia:
235             massaDia[pedido[i][1]] += pedido[i][2]*\
236                 maParametros[int(np.where(maParametros[:,0]\
237                     == pedido[i][0])[0])[1]
238         else:
239             massaDia[pedido[i][1]] = pedido[i][2]\
240                 *maParametros[int(np.where(maParametros[:,0]\
241                     == pedido[i][0])[0])[1]
242
243     # Calcula o numero total de chapas necessaria,
244     # e depois o calcula quanto sobra
245     for j in massaDia:
246         nChapas = (massaDia[j]*aproveitamentoChapa)/(massaChapa)
247         consumido += massaDia[j]
248         if nChapas <= int(nChapas) + limiteNovaChapa:
249             nChapas = int(nChapas)
250         else:
251             nChapas = int(nChapas) + 1
252         totalChapas += nChapas
253

```



```

254
255     return totalChapas*massaChapa - consumido
256
257 def rouletteWheel(p):
258     c = np.cumsum(p)
259     r = sum(p)*np.random.rand()
260     ind = np.argwhere(r <= c)
261     return ind[0][0]
262
263 def crossover(p1, p2, primElem):
264
265     c1 = p1.deepcopy()
266     c2 = p2.deepcopy()
267     beta = np.random.randint(0, 2, c1.position[:,2].shape[0])
268     omega = (1-beta) * (c1.position[:,2] - c2.position[:,2])
269
270     for i in range(c1.position[:,2].shape[0]):
271         if i not in primElem:
272             omega[i] += omega[i-1]
273
274     c1.position[:,2] = beta*p1.position[:,2] + (1-beta)*p2.position[:,2]
275     c2.position[:,2] = beta*p2.position[:,2] + (1-beta)*p1.position[:,2]
276     c1.position[:,3] = p1.position[:,3] - omega
277     c2.position[:,3] = p2.position[:,3] + omega
278     return c1, c2
279
280
281 def mutate(x, mu, primElem):
282     y = x.deepcopy()
283     flag = np.random.rand(x.position[:,2].shape[0]) <= mu
284     zeta = np.round(np.random.randn(x.position[:,2].shape[0]))
285     rho = flag*zeta
286     theta = copy.deepcopy(rho)
287     for i in range(x.position[:,2].shape[0]):
288         if i not in primElem:
289             theta[i] += theta[i-1]
290     y.position[:,2] = x.position[:,2] + rho
291     y.position[:,3] = x.position[:,3] + theta
292     return y
293
294 def adicionarLimites(y, primElem, paramet):
295     x = y.deepcopy()
296     eta = (x.position[:,2] < 0) * x.position[:,2]
297     iota = copy.deepcopy(eta)
298     for i in range(x.position[:,2].shape[0]):
299         if i not in primElem:
300             iota[i] += iota[i-1]
301
302     x.position[:,2] -= eta
303     x.position[:,3] -= iota
304
305     kappa = 0
306     desperdicio = 0
307

```

```

308     for j in range(x.position[:,2].shape[0]):
309         if j in primElem:
310             int(np.where(paramet[:,0] == x.position[j][0])[0])
311             massa = paramet[int(np.where(paramet[:,0] ==\
312                 x.position[j][0])[0])[1]
313             kappa = 0
314
315             if (x.position[j][3] + kappa) < 0:
316                 tau = (x.position[j][3] + kappa )*(-1)
317                 x.position[j][2] += tau
318                 kappa += tau
319
320             if (x.position[j][3] + kappa) > paramet[int(np.where(paramet[:,0]\
321                 == x.position[j][0])[0])[3]:
322                 phi = paramet[int(np.where(paramet[:,0] ==\
323                     x.position[j][0])[0])[3] - (x.position[j][3] + kappa)
324                 desperdicio -= (phi*massa)
325                 #x.position[j][2] += phi
326                 kappa += phi
327
328             x.position[j][3] += kappa
329
330     return x, desperdicio
331
332 #Funcao calcula o numero de chapas usadas
333 def chapasUsadas\
334     (pedido,maParametros,limiteNovaChapa,massaChapa,aproveitamentoChapa):
335
336     massaDia = {}
337     totalChapas = 0
338     consumido = 0
339
340     #Calcula a massa de todos os dias em um dicionário
341     for i in range(len(pedido)):
342         #se for a primeira massa ele cria o item, se nao, ele so adiciona
343         if pedido[i][1] in massaDia:
344             massaDia[pedido[i][1]] += pedido[i][2]*maParametros\
345                 [int(np.where(maParametros[:,0] == pedido[i][0])[0])[1]
346         else:
347             massaDia[pedido[i][1]] = pedido[i][2]*maParametros\
348                 [int(np.where(maParametros[:,0] == pedido[i][0])[0])[1]
349
350     # Calcula o numero total de chapas necessaria, e depois o calcula quanto sobra
351     for j in massaDia:
352         nChapas = (massaDia[j]*aproveitamentoChapa)/(massaChapa)
353         consumido += massaDia[j]
354         if nChapas <= int(nChapas) + limiteNovaChapa:
355             nChapas = int(nChapas)
356         else:
357             nChapas = int(nChapas) + 1
358         totalChapas += nChapas
359
360
361     return totalChapas

```

```

362
363 def adicionarLimiteFinal(y, primElem, paramet):
364     x = y.deepcopy()
365     eta = (x.position[:,2] < 0) * x.position[:,2]
366     iota = copy.deepcopy(eta)
367     for i in range(x.position[:,2].shape[0]):
368         if i not in primElem:
369             iota[i] += iota[i-1]
370
371     x.position[:,2] -= eta
372     x.position[:,3] -= iota
373
374     kappa = 0
375     #desperdicio = 0
376
377     for j in range(x.position[:,2].shape[0]):
378         if j in primElem:
379             int(np.where(paramet[:,0] == x.position[j][0])[0])
380             #massa = paramet[int(np.where(paramet[:,0] == x.position[j][0])[0])[1]
381             kappa = 0
382
383             if (x.position[j][3] + kappa) < 0:
384                 tau = (x.position[j][3] + kappa) * (-1)
385                 x.position[j][2] += tau
386                 kappa += tau
387
388             if (x.position[j][3] + kappa) > paramet[\
389                 int(np.where(paramet[:,0] == x.position[j][0])[0])[3]:
390                 phi = paramet[int(np.where(paramet[:,0] == \
391                     x.position[j][0])[0])[3] - (x.position[j][3] + kappa)
392                 #desperdicio -= (phi*massa)
393                 x.position[j][2] += phi
394                 kappa += phi
395
396             x.position[j][3] += kappa
397
398     return x #, desperdicio

```