



Osvaldo Bazzan Bini

**DESENVOLVIMENTO DE UMA APLICAÇÃO WEB PARA OTIMIZAÇÃO DO
SEQUENCIAMENTO DE ORDENS DE PRODUÇÃO**

Horizontina-RS
2025

Osvaldo Bazzan Bini

**DESENVOLVIMENTO DE UMA APLICAÇÃO WEB PARA OTIMIZAÇÃO DO
SEQUENCIAMENTO DE ORDENS DE PRODUÇÃO**

Trabalho Final de Curso apresentado como
requisito parcial para a obtenção do título de
bacharel em Engenharia de Produção da
Faculdade Horizontina, sob a orientação da Profª.
Ma. Eliane Garlet.

Horizontina-RS

2025

FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o trabalho final de curso

**“Desenvolvimento de uma aplicação web para otimização do sequenciamento
de ordens de produção”**

Elaborada por:
Osvaldo Bazzan Bini

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia de Produção

Aprovado em: 18/11/2025
Pela Comissão Examinadora

Mestra. Eliane Garlet
Presidente da Comissão Examinadora - Orientadora

Mestre. Sirnei César Kach
FAHOR – Faculdade Horizontina

Mestre. Fabrício Desbessel
FAHOR – Faculdade Horizontina

Horizontina - RS
2025

À minha família, por todo o incentivo, apoio incondicional e por acreditarem em mim em cada passo desta longa jornada acadêmica. Esta conquista não seria possível sem vocês.

Agradeço a todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte da minha formação acadêmica e profissional. Em especial, expresso minha profunda gratidão à minha professora orientadora, pelo seu valioso suporte e orientação dedicada ao longo desta etapa.

RESUMO

O presente trabalho abordou o processo de sequenciamento de ordens da produção em uma empresa multinacional do setor metalomecânico, onde a atividade era realizada manualmente, consumindo em torno de seis horas semanais dos analistas e resultando em violações de restrições de fábrica. O objetivo principal do estudo foi desenvolver uma aplicação *web* para otimizar este processo, visando reduzir o tempo de planejamento e minimizar as violações. O trabalho buscou, portanto, responder ao seguinte problema de pesquisa: Como otimizar o sequenciamento de ordens de produção para reduzir tempo de planejamento e minimizar violações de restrições? A pesquisa justifica-se pela necessidade de otimizar o sequenciamento da produção, já que processos manuais em ambientes de alta customização aumentam o risco de erros humanos. A metodologia empregada foi a pesquisa-ação e como métodos de abordagem utilizou-se qualquantitativo e hipotético-dedutivo. Os objetivos se caracterizaram como exploratórios e descritivos. A coleta de dados envolveu a análise de arquivos de PCP da empresa e a realização de entrevistas não estruturadas com os analistas do setor. A partir da análise dos produtos e de suas regras de sequenciamento, desenvolveu-se uma aplicação *web* que permitiu o gerenciamento eficiente das regras e dos produtos, além de proporcionar a distribuição das ordens em níveis diário e semanal. Essa aplicação utiliza tais informações como entrada para um algoritmo de otimização, adaptado do algoritmo de busca tabu. O algoritmo atua por meio de uma função objetivo, que busca minimizar o total de penalidades provenientes do descumprimento das regras operacionais. Como resultado, a validação da ferramenta demonstrou, em comparação ao processo manual, uma redução de 39,7% nas violações para a família de produtos Z e de 67,9% para a família W. Ao que diz respeito a tempo de processamento, a ferramenta otimiza as sequências num intervalo de 1 a 3 minutos por produto, garantindo maior agilidade e assertividade, junto a isso, a solução foi também implementada em outra unidade da empresa, situada na Alemanha, eliminando 80% do tempo manual dedicado à tarefa. O trabalho conclui que a aplicação desenvolvida é eficaz para a otimização do sequenciamento no caso estudado, melhorando a eficiência do processo.

Palavras-chave: Sequenciamento da Produção. Aplicação *Web*. Algoritmo de Otimização.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Estrutura básica de um algoritmo | 17 |
| Figura 2 - Processo de comunicação entre aplicações | 18 |
| Figura 3 - Troca de requisições entre aplicações e servidor via HTTP | 19 |
| Figura 4 - Representação do algoritmo de busca de árvore..... | 22 |
| Figura 5 - Representação do algoritmo de busca tabu | 24 |
| Figura 6 - Fluxograma das atividades | 31 |
| Figura 7 - Fluxo das atividades do sequenciamento de produção | 39 |
| Figura 8 - Fluxograma dos módulos de regras de distribuição de opcionais, modelos e suas dependências..... | 43 |
| Figura 9 - Fluxograma dos módulos de regras de distribuição de modelos por dia .. | 45 |
| Figura 10 - Fluxograma do módulo de otimização | 46 |
| Figura 11 - Fluxograma da função objetivo | 48 |
| Figura 12 - Fluxograma lógico do algoritmo de otimização | 50 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 1 - Produtos da família Z | 35 |
| Quadro 2 - Opcionais disponíveis para produtos da família Z | 35 |
| Quadro 3 - Produtos da família Y | 36 |
| Quadro 4 - Opcionais disponíveis para produtos da família Y | 36 |
| Quadro 5 - Produtos da família X | 37 |
| Quadro 6 - Opcionais disponíveis para produtos da família X | 37 |
| Quadro 7 - Produtos da família W | 37 |
| Quadro 8 - Opcionais disponíveis para produtos da família W | 38 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Número de restrições violadas da família Z..... | 53 |
| Tabela 2 - Número de restrições violadas da família W | 54 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1 TEMA | 12 |
| 1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA | 12 |
| 1.3 PROBLEMA DE PESQUISA..... | 12 |
| 1.4 HIPÓTESES | 13 |
| 1.5 JUSTIFICATIVA | 13 |
| 1.6 OBJETIVOS..... | 14 |
| 1.6.1 Objetivo geral..... | 14 |
| 1.6.2 Objetivos específicos | 14 |
| 2 REVISÃO DA LITERATURA..... | 16 |
| 2.1 ALGORITMOS E LINGUAGENS DE PROGRAMAÇÃO | 16 |
| 2.2 APLICAÇÕES WEB | 17 |
| 2.3 COMPUTAÇÃO EM NUVEM | 19 |
| 2.4 DATABRICKS..... | 20 |
| 2.5 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E APRENDIZADO EM MÁQUINA..... | 20 |
| 2.6 GRANDES MODELOS DE LINGUAGEM | 21 |
| 2.7 ALGORITMOS DE BUSCA..... | 22 |
| 2.7.1 Busca Tabu | 23 |
| 2.8 PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO (PCP)..... | 24 |
| 2.8.1 Sequenciamento da produção e restrições de linha..... | 25 |
| 2.9 FUNÇÃO OBJETIVO | 27 |
| 3 METODOLOGIA | 29 |
| 3.1 MÉTODOS DE ABORDAGEM | 29 |
| 3.2 QUANTO AOS OBJETIVOS | 30 |
| 3.3 MÉTODOS DE PROCEDIMENTOS | 30 |
| 3.3.1 Etapas das atividades..... | 31 |
| 3.4 TÉCNICA DE COLETA DE DADOS..... | 32 |
| 3.5 TÉCNICA DE ANÁLISE DE DADOS | 33 |
| 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS | 34 |
| 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA | 34 |
| 4.2 PROCESSAMENTO DAS ORDENS DE PRODUÇÃO | 38 |
| 4.2.1 Restrições de fábrica..... | 39 |
| 4.3 OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO | 43 |
| 4.3.1 Interface de regras | 43 |
| 4.3.2 Interface de execução..... | 44 |
| 4.3.3 Algoritmo de otimização | 46 |
| 4.4 RESULTADOS OBTIDOS..... | 52 |
| 4.4.1 Restrições violadas | 52 |
| 4.4.2 Melhoria do processo | 54 |
| CONCLUSÃO..... | 56 |
| REFERÊNCIAS | 59 |
| APÊNDICE A - RESTRIÇÕES POR SEMANA DE PRODUÇÃO PARA FAMÍLIA Z (EXECUÇÃO MANUAL) | 62 |
| FONTE: AUTOR (2025) | 63 |
| APÊNDICE B - RESTRIÇÕES POR SEMANA DE PRODUÇÃO PARA FAMÍLIA Z (RESULTADO DO SISTEMA) | 64 |
| APÊNDICE C - RESTRIÇÕES POR SEMANA DE PRODUÇÃO PARA FAMÍLIA W (EXECUÇÃO MANUAL) | 66 |

**APÊNDICE D - RESTRIÇÕES POR SEMANA DE PRODUÇÃO PARA FAMÍLIA W
(RESULTADO DO SISTEMA) 68**

1 INTRODUÇÃO

A eficácia de qualquer processo produtivo reside, fundamentalmente, em um planejamento robusto, o qual norteia a forma como as demandas dos clientes são não apenas atendidas, mas também entregues de forma eficiente. Contudo, o planejamento fabril não se restringe à reação a pedidos pontuais, ele é um processo proativo e contínuo, onde toda a fábrica se organiza para futuras necessidades. Consequentemente, imprevistos ou alterações repentinhas no cenário de produção ressaltam a necessidade premente de um replanejamento (Slack; Brandon-Jones; Burgess, 2023).

Diante desse dinamismo, uma das etapas mais críticas do planejamento da produção é a definição da sequência em que as atividades ou produtos serão processados. Essa definição se baseia em regras de sequenciamento, que consideram as restrições físicas dos processos e do *layout*, as prioridades específicas de um cliente em relação aos demais, e os inegociáveis prazos de entrega dos produtos. Cada regra de sequenciamento seguida gera ganhos claros para a empresa: maior confiabilidade no cumprimento dos prazos, maior velocidade na produção devido ao respeito às restrições de *layout* e produto, e redução de custos ao evitar tempo ocioso e gargalos na linha, o que melhora a eficiência e a produtividade (Slack; Brandon-Jones; Burgess, 2023).

Dentro desse contexto, a ordem em que os produtos são direcionados à linha de produção assume um papel central, pois pode tanto garantir o cumprimento quanto a violação das regras de sequenciamento estabelecidas. Assim, torna-se imperativo que as ordens de produção sejam organizadas de forma otimizada. O objetivo é maximizar a eficiência, minimizando o tempo, o uso de recursos e o envolvimento de pessoas, e reduzir ao máximo a ocorrência de violações de prazos e restrições de capacidade da linha.

Na empresa estudada, do setor metalmecânico, ocorrem violações frequentes das restrições de produção, causadas pela ausência de um sequenciamento otimizado para os quatro produtos fabricados. Além disso, o processo de planejamento consome cerca de seis horas semanais de dois analistas. Quando é necessário replanejar, o tempo de trabalho aumenta ainda mais, prejudicando a organização da linha. Outro ponto crítico é a falta de documentação das restrições específicas dos produtos, conhecimento que permanece apenas com os dois

analistas, gerando um risco operacional significativo em caso de substituição de pessoal.

Diante da complexidade do sequenciamento de ordens de produção para os quatro produtos da planta, este trabalho tem como objetivo principal desenvolver uma aplicação *web* que auxilie na tomada de decisão. Essa aplicação, baseada em um algoritmo de otimização, teve como propósito reduzir o tempo necessário para a concepção desses sequenciamentos e, simultaneamente, minimizar o número de violações de restrições de fábrica, otimizando assim o processo produtivo.

1.1 TEMA

O tema do presente estudo foi a otimização do sequenciamento de ordens de produção, com foco na redução de violações de restrições de fábrica e do tempo para a geração dos sequenciamentos.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Este estudo se delimita na otimização do sequenciamento de ordens de produção no setor de Planejamento e Controle da Produção (PCP) de uma empresa metalomecânica multinacional localizada na região Noroeste do Rio Grande do Sul. A proposta envolveu o desenvolvimento de uma aplicação *web* com algoritmo de otimização para reduzir o tempo de criação dos sequenciamentos e minimizar as violações de restrições operacionais.

1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

No setor de planejamento e controle da produção da empresa estudada, o sequenciamento das ordens de produção referentes aos quatro produtos fabricados exige como já citado, em média, seis horas de trabalho de dois analistas por semana, visto que o processo de sequenciamento abrange o horizonte de uma semana de produção.

Esse esforço elevado decorre da necessidade de conciliar múltiplas restrições da linha de montagem por produto. Em virtude da complexidade combinatória e da variabilidade dos cenários de produção, os sequenciamentos gerados pelos analistas apresentam violações frequentes de restrições, reduzindo a produtividade e ocasionando atrasos de produção.

Além do tempo significativo consumido e violações de restrições frequentes, constatou-se que grande parte do conhecimento sobre as restrições da linha de montagem é informal, pertencendo apenas aos analistas responsáveis pelo sequenciamento. Tal fato torna o processo dependente da experiência individual desses profissionais, tornando difícil a substituição dos funcionários encarregados do processo.

Diante disso, definiu-se para o estudo o seguinte problema de pesquisa: Como otimizar o sequenciamento de ordens de produção para reduzir tempo de planejamento e minimizar violações de restrições?

1.4 HIPÓTESES

Com base nos dados apontados no problema de pesquisa, foram elaboradas as seguintes hipóteses:

- A implementação da aplicação de otimização reduzirá em no mínimo 70% do tempo necessário para a criação das sequências de ordens de produção pelos analistas;
- A aplicação permitirá a redução de pelo menos 45% das violações de restrições de fábrica por produto anualmente, em comparação com o sequenciamento manual realizado pelos analistas.

1.5 JUSTIFICATIVA

Para manterem-se competitivas no mercado atual, muitas empresas têm optado por oferecer uma linha enxuta de produtos acompanhada por uma ampla variedade de opcionais. Essa estratégia permite a customização dos pedidos e a formação de um *mix* variado de itens, conforme as preferências dos clientes. Contudo, essa diversidade acarreta um desafio relevante: a necessidade de organizar combinações únicas de produtos que atendam a diferentes encomendas dentro de prazos curtos de planejamento (Yano; Rachamadugu, 1991).

Diante da variedade de configurações possíveis, a eficiência da linha de montagem passa a depender diretamente da ordem em que os modelos são produzidos, afinal pretende-se entregar no tempo certo, utilizando o mínimo de recursos possíveis ao cliente, sem a necessidade da geração de estoques. Assim, o sequenciamento das ordens de produção torna-se um fator determinante para o bom

desempenho da linha, pois afeta diretamente sua eficiência (Okamura; Yamashina, 1979).

Para o setor de PCP, a otimização do sequenciamento das ordens de produção proporciona maior transparência e previsibilidade nas operações, simplificando a gestão de uma série de combinações de produtos. Isso se traduz em menos tempo dedicado ao planejamento manual e uma diminuição do retrabalho na criação de novas sequências, permitindo que os analistas direcionem seus esforços para atividades mais estratégicas.

Ainda, a dependência de processos de sequenciamento manuais introduz a vulnerabilidade ao erro humano, o que pode levar a violações de restrições de fábrica. Essas violações dos limites operacionais resultam em perdas significativas de eficiência na linha de produção e, consequentemente, no não cumprimento dos prazos de entrega, impactando diretamente a satisfação do cliente e a reputação da empresa.

Diante desse contexto, a justificativa deste trabalho fundamenta-se na necessidade de otimizar o processo de geração das sequências de ordens de produção, com o objetivo de minimizar o número de violações de restrições de fábrica e reduzir o tempo para a geração de novos sequenciamentos.

1.6 OBJETIVOS

Diante do que foi apresentado, definiram-se os objetivos geral e específicos que orientaram o desenvolvimento deste estudo.

1.6.1 Objetivo geral

Desenvolver uma aplicação *web* para otimizar o sequenciamento de ordens de produção de uma empresa do setor metalomecânico.

1.6.2 Objetivos específicos

Com a finalidade de alcançar o objetivo geral, definiram-se os seguintes objetivos específicos:

- Coletar informações sobre as restrições por produto da linha de produção;
- Desenvolver o algoritmo de otimização para o sequenciamento das ordens de produção;
- Criar uma *interface* para cadastro e edição de regras de sequenciamento;

- Desenvolver *interface* para execução do sequenciamento;
- Comparar as restrições geradas pelos sequenciamentos manuais com os gerados pela aplicação;
- Mensurar o tempo de processamento do sistema para compará-los com o tempo médio despendido pelos analistas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo concentra-se na revisão de publicações relacionadas ao tema em estudo, destacando os principais autores e referências relevantes. O objetivo é apoiar-se em fontes científicas e bibliográficas para embasar as ferramentas e metodologias que foram aplicadas na prática, garantindo uma base sólida de conhecimento para o desenvolvimento da pesquisa. Entre os principais temas abordados no capítulo pode-se destacar os algoritmos de busca destacando-se a busca tabu, aplicações web, planejamento e controle de produção e sequenciamento da produção.

2.1 ALGORITMOS E LINGUAGENS DE PROGRAMAÇÃO

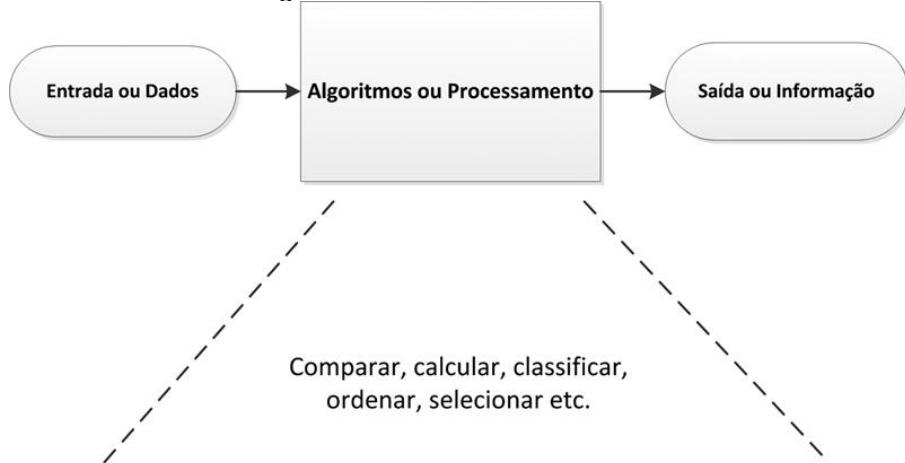
Algoritmos são procedimentos estruturados em etapas sequenciais que têm como finalidade a resolução de um problema. A partir de um valor ou de um conjunto de valores, denominados entradas, obtém-se uma solução, denominada saída, dentro de um tempo finito. Assim, um algoritmo deve apresentar descrições precisas das etapas necessárias para a resolução do problema proposto (Cormen *et al.*, 2024).

Na área da informática, os algoritmos são utilizados para construir sequências lógicas que possam ser interpretadas por máquinas ou computadores, por meio de linguagens de programação. Essas linguagens artificiais descrevem a sequência de ações que a máquina deve executar, atuando como um instrumento de controle das suas operações (Piva Jr. *et al.*, 2019).

De acordo com Santos, Saraiva e Fátima (2018), as linguagens de programação podem ser classificadas em linguagens de alto nível (mais próximas da linguagem natural humana) e linguagens de baixo nível (mais próximas da linguagem de máquina). Como os computadores não são capazes de interpretar diretamente essas linguagens, torna-se necessário o uso de um programa que converta o código-fonte em uma linguagem comprehensível pela máquina, composta por combinações de 0s e 1s, conhecida como código binário (Alves, 2015). Essa conversão é realizada por tradutores, que podem ser compiladores ou interpretadores. Os compiladores transformam todo o código-fonte (algoritmo) em linguagem de máquina antes da execução, enquanto os interpretadores realizam a tradução e a execução linha por linha (Aguilar, 2008).

Na Figura 1, pode-se visualizar a estrutura básica de funcionamento de um algoritmo.

Figura 1 - Estrutura básica de um algoritmo



Fonte: Piva Jr. et al. (2019, p. 7).

Como se observa na Figura 1, o algoritmo parte de uma entrada de informações, que são então submetidas a uma sequência finita de instruções lógicas. Tais instruções, que constituem o algoritmo, devem ser rigorosamente definidas para evitar interpretações ambíguas e são frequentemente implementadas por meio de linguagens de programação. O objetivo dessa execução é transformar os dados de entrada, através de etapas de processamento predeterminadas, em um resultado de saída, que constitui a solução para o problema que o algoritmo se propõe a resolver (Piva Jr. et al., 2019).

2.2 APLICAÇÕES WEB

Aplicações *web* são exemplos da arquitetura cliente-servidor, na qual páginas hospedadas na internet geram requisições a servidores. Cada página *web* é composta por diversos objetos, como arquivos *HTML*, imagens, entre outros, acessíveis por meio de um localizador uniforme de recursos (*Uniform Resource Locator — URL*). Nessa estrutura, os clientes enviam requisições aos servidores, que as processam e retornam as respostas com os objetos solicitados (Kurose; Ross, 2013).

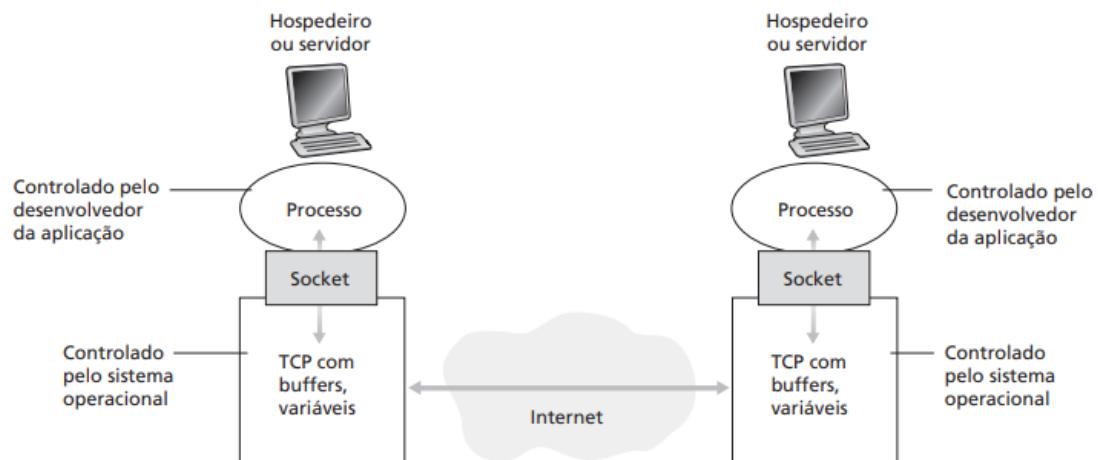
Dessa forma, aplicações *web* operam como pares comunicantes, onde um sistema envia uma requisição e outro a recebe por meio de uma interface de *software* conhecida como *socket*. O *socket* atua como uma camada intermediária entre a camada de aplicação e a de transporte de dados dentro de uma máquina. Ele também é denominado interface de programação de aplicação (*Application Programming*

Interface — API). Em sistemas baseados em *sockets*, os desenvolvedores têm controle sobre as interfaces de *software*, mas possuem pouca influência sobre a camada de transporte de uma aplicação *web* (Kurose; Ross, 2013).

O protocolo de comunicação mais utilizado na *web* é o Protocolo de Transferência de Hipertexto (*HyperText Transfer Protocol — HTTP*), que serve como pilar central para as interações entre clientes e servidores. O *HTTP* define a estrutura das mensagens trocadas e a forma como cliente e servidor se comunicam. O cliente encaminha suas requisições *HTTP* para a interface *socket*, pela qual também recebe as respostas do servidor. Da mesma maneira, o servidor *HTTP* recebe as requisições por meio de sua interface *socket* e envia as respostas pelo mesmo canal, garantindo um fluxo contínuo e organizado da comunicação entre os sistemas (Kurose; Ross, 2013).

Os processos de comunicação entre *sockets* se apresentam na Figura 2, onde os serviços comunicam-se mandando mensagens aos *sockets* e estes os enviam a camada de comunicação.

Figura 2 - Processo de comunicação entre aplicações



Fonte: Kurose; Ross (2013, p.66).

Na Figura 3 apresenta-se uma estrutura simplificada de troca de requisições entre aplicações evidenciando a utilização do protocolo de comunicação *HTTP*.

Figura 3 - Troca de requisições entre aplicações e servidor via HTTP



Fonte: Kurose; Ross (2013, p.73).

Observa-se na Figura 3, que um mesmo servidor é capaz de processar múltiplas requisições simultaneamente, provenientes de diferentes clientes. Essa capacidade permite que aplicações web sejam acessadas e utilizadas por vários usuários ao mesmo tempo, caracterizando um ambiente de comunicação dinâmica e concorrente (Kurose; Ross, 2013).

2.3 COMPUTAÇÃO EM NUVEM

A computação em nuvem surge como uma ideia, em vez da compra de um computador físico compra-se computação sob demanda. Computadores físicos demandam investimento constante, pois são produtos que possuem vida útil limitada e demandam manutenção frequente, além da substituição de peças devido à rápida obsolescência dos componentes computacionais. Com a nuvem, esses desafios são minimizados uma vez que a manutenção e o gerenciamento da infraestrutura se tornam responsabilidade da empresa fornecedora (Arundel; Domingus, 2019).

Além do aluguel de poder computacional, a computação em nuvem também permite o uso de softwares de terceiros para atender necessidades específicas ou adicionar funcionalidades a uma aplicação. Esse modelo é conhecido como *Software como Serviço (Software as a Service – SaaS)* (Arundel; Domingus, 2019).

Outro conceito essencial no contexto da computação em nuvem é o de Infraestrutura como Serviço (*Infrastructure as a Service – IaaS*), que se refere ao fornecimento de recursos de infraestrutura de tecnologia da informação por meio da internet. Para que os softwares funcionem adequadamente, é necessário um

ambiente composto por sistemas operacionais, armazenamento de dados, monitoramento, redes, filas de mensagens, entre outros. Ao adotar esses serviços em nuvem, as empresas contratam não apenas recursos computacionais, mas toda a infraestrutura necessária para suportar e escalar suas aplicações (Arundel; Domingus, 2019).

2.4 DATABRICKS

A *Databricks* é uma plataforma integrada com serviços em nuvem voltada para criação, implantação, compartilhamento, manutenção de análises de dados e implementação de soluções de inteligência artificial. Em sua infraestrutura utiliza um sistema de gerenciamento de dados chamado de lago de dados (*data lakehouse*), esse sistema oferece serviços para processamento e armazenamento dimensionados em uma estrutura unificada. Através da implementação do sistema de gerenciamento, os dados são apresentados a camadas de preparação e transformação as quais refinam, melhoram e os enriquecem de forma gradual (*Databricks*, 2025).

Para o processamento customizado de dados, a plataforma oferece os *notebooks*. Os *Notebooks* são ferramentas que possibilitam a implementação de códigos em diferentes linguagens e a leitura de seus resultados de uma maneira fácil, através deles pode-se criar fluxos de trabalhos colaborativos (*Databricks*, 2025).

Outra funcionalidade disponível é a possibilidade de orquestrar um ou mais fluxos de trabalho implementando lógicas de controle, assim pode-se agendar execuções recorrentes, definir gatilhos para inicialização da execução do fluxo, orientação lógica para definição de tarefas a serem executadas via condições, integração com serviços externos e definição da ordem das etapas a serem executadas, esse sistema de orquestração recebe o nome de *Job* (*Databricks*, 2025).

2.5 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E APRENDIZADO EM MÁQUINA

A inteligência artificial (IA) foi desenvolvida com o objetivo de que máquinas e outros dispositivos pudessem realizar operações sem interferência humana. Os sistemas de IA não apenas possuem a capacidade de lidar com os dados que lhes são fornecidos, mas também de manipular, aprender e deduzir novos conhecimentos utilizando bases prévias. Desta forma, tornam-se aptos a resolver problemas complexos de maneira independente (Silva *et al.*, 2018).

Um ramo importante da IA é o aprendizado de máquina (*machine learning - ML*), que visa compreender como ocorre o aprendizado dos computadores por meio dos dados que lhes são fornecidos. Com base nesse princípio, busca-se construir modelos estatísticos capazes de interpretar grandes volumes de dados (Deo, 2015).

Dessa maneira, o *ML* é uma abordagem na qual o sistema adquire a capacidade de aprender padrões complexos por meio de treinamento com dados. Uma vez treinado, e utilizando os padrões descobertos, o sistema torna-se capaz de prever comportamentos ao analisar fontes de dados que nunca lhe foram apresentadas anteriormente (Huyen, 2022).

2.6 GRANDES MODELOS DE LINGUAGEM

Os grandes modelos de linguagem (*large language models - LLM*), de acordo com *Databricks* se definem como:

...sistemas de IA desenvolvidos para processar e analisar enormes quantidades de dados de linguagem natural e, em seguida, usar essas informações para gerar respostas às solicitações dos usuários. Esses sistemas são treinados em grandes conjuntos de dados usando algoritmos avançados de *machine learning* para aprender os padrões e as estruturas da linguagem humana e são capazes de gerar respostas em linguagem natural a uma ampla variedade de contribuições escritas (*Databricks*, 2024).

As *LLMs* podem ser adaptadas para suportar diferentes problemas através do fornecimento de dados a seus algoritmos de aprendizagem. Como interpretam e respondem utilizando a linguagem humana, encontram-se principalmente na utilização de *chats bots*. Quando treinados com dados dedicados adquirem a capacidade de interpretar o contexto em que se apresentam e analisam a resposta com base nessa informação fornecida, sendo mais assertivos em suas análises (*Databricks*, 2024).

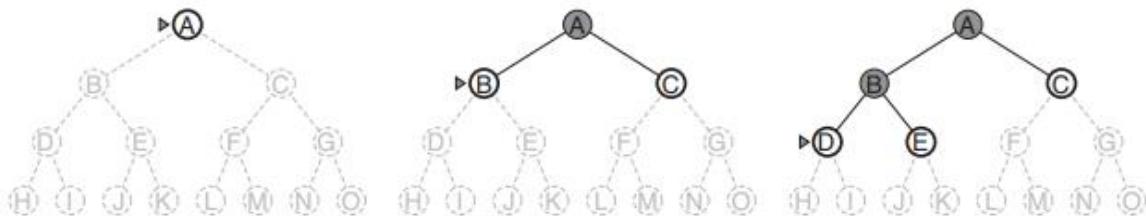
Algumas empresas disponibilizam suas *LLMs* previamente treinadas por meio de serviços, permitindo que outras companhias e aplicações os integrem em seus próprios sistemas. Dessa forma, é possível utilizar as *APIs* (Interfaces de Programação de Aplicações) fornecidas por essas empresas para o desenvolvimento de novas ferramentas e soluções (*Databricks*, 2024).

2.7 ALGORITMOS DE BUSCA

Algoritmos de busca são métodos computacionais utilizados para explorar diferentes sequências de ações com o objetivo de encontrar uma solução para um determinado problema, idealmente a mais eficiente ou otimizada. Esses algoritmos compartilham uma estrutura conceitual comum denominada árvore de busca (*search tree*), que se inicia a partir de um estado inicial, representado pela raiz (*root*) da árvore. A partir dessa raiz, o processo se ramifica por meio de galhos (*branches*), que correspondem às ações possíveis, e gera nós (*nodes*), os quais representam os diferentes estados que podem ser alcançados ao longo da resolução do problema (Russell; Norvig, 2009).

Essa estrutura recebe o nome de árvore de busca justamente por refletir o modo como o processo de exploração se desenvolve. Como ilustrada na Figura 4, o algoritmo inicia na raiz da árvore, expandindo o estado atual e gerando novos estados (nós) possíveis. Em seguida, escolhe o próximo estado a ser explorado com base em determinados critérios, ramificando novamente em novos estados. Esse processo continua até que uma solução seja encontrada. Assim, o que diferencia os algoritmos de busca entre si é justamente a estratégia de busca (*search strategy*) adotada para selecionar o próximo estado a ser explorado (Russell; Norvig, 2009).

Figura 4 - Representação do algoritmo de busca de árvore



Fonte: Russell; Norvig (2009, p.86).

No entanto, uma das principais limitações dos algoritmos de busca em árvores está na possibilidade de repetir caminhos já explorados, o que pode comprometer tanto o desempenho quanto a eficiência da busca. Para lidar com esse problema, é importante que o algoritmo seja capaz de reconhecer os estados já visitados ao longo do processo. Uma das abordagens para isso é o uso de uma estrutura auxiliar chamada conjunto explorado (*explored set*) responsável por armazenar todos os estados que já foram expandidos. Dessa forma, quando novos nós são gerados, o algoritmo verifica se eles já estão presentes nesse conjunto ou na fronteira (conjunto

de nós a serem explorados). Essa lógica dá origem ao algoritmo conhecido como busca em grafo (*graph search*), que incorpora esse controle de estados visitados para tornar a busca mais eficiente (Russell; Norvig, 2009).

Os algoritmos de busca tradicionais são projetados para navegar em espaços de estados conhecidos. Isso significa que eles são ideais para resolver problemas observáveis e determinísticos, onde a solução ótima é uma sequência clara de ações. No entanto, quando um problema não se encaixa nessas características, ou seja, é parcialmente observável ou não determinístico e o caminho para a solução não é a solução esperada, os algoritmos de busca local (*local search*) se tornam uma alternativa (Russell; Norvig, 2009). Um desses algoritmos é o algoritmo de busca tabu.

2.7.1 Busca Tabu

O algoritmo de Busca Tabu (*Tabu Search*) é uma ferramenta eficaz para resolver problemas combinatórios. Ele se destaca não apenas por sua capacidade de encontrar soluções muito próximas do ideal, mas também por ser considerado uma das abordagens mais efetivas para problemas dessa natureza (Morales; Romeijn, 2004; Gendreau; Potvin, 2005).

O algoritmo de busca tabu opera com uma diretriz clara: ao alcançar uma solução promissora durante sua pesquisa, ele a registra em uma lista tabu. Isso permite que novas buscas explorem movimentos que, inicialmente, podem não melhorar a solução, mas evitam o retorno a soluções já visitadas, otimizando o processo de busca. Assim, a lógica do algoritmo se baseia na busca por minimizar uma função, representada por $f(s)$, também conhecida como função objetivo (Gendreau; Potvin, 2005). Na Figura 5, é apresentada a representação lógica do algoritmo.

Figura 5 - Representação do algoritmo de busca tabu

```

1. Seja  $s_0$  solução inicial;
2.  $s^* \leftarrow s_0$ ; {Melhor solução obtida até então}
3. Iter  $\leftarrow 0$ ; {Contador do número de iterações}
4. MelhorIter  $\leftarrow 0$ ; {Iteração mais recente que forneceu  $s^*$ }
5. Seja BTmax o número máximo de iterações sem melhora em  $s^*$ ;
6. T  $\leftarrow \emptyset$ ; {Lista Tabu}
7. Inicialize a função de aspiração A;
8. enquanto (Iter - MelhorIter  $\leq$  BTMax) faça
9.     Iter  $\leftarrow$  Iter + 1;
10.    Seja  $s' \leftarrow s \oplus m$  o melhor elemento de  $V \subseteq N(s)$  tal que o movimento  $m$  não seja tabu ( $m \notin T$ ) ou  $s'$  atenda a condição de aspiração ( $f(s') < A(f(s))$ );
11.    Atualize a Lista Tabu T;
12.     $s^* \leftarrow s_1$ ;
13.    se  $f(s) < f(s^*)$  então
14.         $s^* \leftarrow s$ ;
15.        MelhorIter  $\leftarrow$  Iter;
16.    fim-se
17.    Atualize a função de aspiração A;
18. fim-enquanto;
19. fim BT;

```

Fonte: Viscardi Filho et al., (2023, p.10).

A Figura 5 ilustra a dinâmica de decisão da Busca Tabu ao escapar de um ponto de estagnação, representado como um ótimo local. Para superar este ponto, o algoritmo permite, de forma controlada, movimentos de piora, aceitando temporariamente uma solução de menor qualidade para explorar novas regiões do espaço de busca. Simultaneamente, para evitar o retorno imediato à solução anterior, o movimento reverso é proibido, sendo classificado como "Tabu" e armazenado numa memória de curto prazo (Gendreau; Potvin, 2005).

O segundo mecanismo ilustrado é o critério de aspiração. Conforme Gendreau e Potvin (2005), os critérios de aspiração são regras de exceção que permitem revogar o status tabu de um movimento caso ele leve a uma solução melhor do que a melhor solução conhecida até aquele momento.

2.8 PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO (PCP)

O Planejamento e Controle da Produção (PCP) desempenha um papel estratégico de suporte, sendo responsável por coordenar e otimizar a utilização dos recursos produtivos da empresa. Sua principal função é assegurar que as operações

estejam alinhadas de forma eficiente com os planos estabelecidos pela organização. Devido à sua natureza integradora, ele se relaciona direta ou indiretamente com todas as áreas do sistema produtivo, tornando-se essencial para a fluidez das atividades e o alcance dos objetivos organizacionais (Tubino, 2017).

Cabe ao PCP, analisando as características de volume de produção e variedade de produtos (Slack; Brandon-Jones; Burgess, 2023), determinar quanto e quando montar, fabricar ou adquirir cada item necessário para a obtenção do produto final. Dessa forma, ele é responsável por dimensionar e emitir ordens de compra, fabricação e montagem, além de gerenciar o sequenciamento dessas ordens, visando a melhor utilização dos recursos disponíveis (Tubino, 2017).

Além do planejamento, tem como função o acompanhamento e o controle da produção, garantindo que a execução ocorra conforme o previsto. Sabe-se que um planejamento pode não sair como o esperado, ocasionando problemas na sequência das atividades. Dessa forma, cabe ao time garantir o replanejamento da operação, a fim de superar os imprevistos a curto, médio e longo prazo e atender à demanda e às expectativas dos clientes (Slack; Brandon-Jones; Burgess, 2023). Uma forma de aplicar esse controle dá-se por meio de trabalhos de coleta e análise de dados da linha de produção, que também podem ser fornecidos a outros setores a fim de apoiar o processo produtivo como um todo (Tubino, 2017).

2.8.1 Sequenciamento da produção e restrições de linha

A programação de operações na indústria de manufatura é inherentemente complexa. Watanabe, Iida e Gen (2005) atribuem essa dificuldade à necessidade de satisfazer uma série de restrições complexas e interligadas nos processos de sequenciamento de produção. Em complemento, Girotti, Nishimura e Mesquita (2011) destacam que a natureza combinatória é a principal responsável por essa complexidade na otimização.

Em essência, a programação da produção deve garantir o respeito aos limites de capacidade de todo sistema produtivo, alinhando-se aos recursos disponíveis. É esse processo, denominado sequenciamento, que integra as atividades do PCP, e cuja granularidade varia conforme o tipo de sistema produtivo em que é aplicado (Tubino, 2017).

Nos sistemas produtivos contínuos, a fabricação concentra-se em grandes volumes de poucos produtos finais. Nesses casos, o planejamento foca

exclusivamente no produto acabado, definindo a quantidade a ser produzida em cada período e os estoques necessários para abastecimento e distribuição, sem a necessidade de detalhar ordens para componentes (Tubino, 2017).

De forma semelhante, os sistemas de produção em massa operam com baixa variedade e alta escala. O planejamento prioriza o ritmo de trabalho e a definição dos tempos de ciclo, que orientam a organização dos postos de montagem. Como o foco permanece no produto final, não é necessário detalhar as ordens para cada componente do processo (Tubino, 2017).

Já nos sistemas em lotes ou sob encomenda, há maior variedade de produtos e compartilhamento dos recursos produtivos, o que demanda o desdobramento do produto final em seus componentes. Isso gera ordens detalhadas de compra, fabricação e montagem, que precisam ser sequenciadas de forma cuidadosa. Em produções sob encomenda, o controle da capacidade produtiva assume prioridade, sendo comum o uso de técnicas como o caminho crítico para assegurar o cumprimento dos prazos estabelecidos (Tubino, 2017).

No contexto das linhas de montagem, o processo de sequenciamento é conhecido como balanceamento de linha, cujo principal objetivo é garantir que todos os postos de trabalho operem em ritmo uniforme para atender ao volume de produção planejado. Diferentemente das linhas de montagem, nos processos em lotes ou sob encomenda, cada lote de produtos segue um roteiro específico de operações padrão em cada estação de trabalho. Nestes casos, torna-se necessário estabelecer uma priorização dos lotes, baseada em regras definidas, para determinar a sequência em que os recursos produtivos serão utilizados. Nesses sistemas, o foco está na eficiente alocação e carregamento das máquinas, e não no equilíbrio do ritmo da mão de obra (Tubino, 2017).

Para garantir a eficiência do sequenciamento, é fundamental analisar as restrições e particularidades que a linha de produção pode apresentar. Entre os principais fatores a serem considerados estão as especificações físicas das peças ou itens a serem processados, que influenciam diretamente a determinação da ordem das operações. Além disso, a importância estratégica de certos clientes pode impactar a priorização dos pedidos, uma vez que encomendas realizadas por clientes prioritários podem requerer tratamento diferenciado no fluxo produtivo (Slack; Brandon-Jones; Burgess, 2023).

Outro aspecto relevante é a data de entrega estabelecida, que pode demandar a reorganização da sequência produtiva para assegurar o cumprimento dos prazos acordados. Dessa forma, o planejamento da produção precisa ser dinâmico e adaptável, considerando múltiplas variáveis para otimizar recursos e atender às demandas do mercado (Slack; Brandon-Jones; Burgess, 2023).

A necessidade de ponderar essas múltiplas variáveis evidencia o que Russomano (2000) e Ribeiro e Cordeiro (2020) descreve como a dificuldade central da programação: definir prioridades. O processo decisório busca conciliar critérios como o cumprimento de prazos, a maximização de lucros e a minimização de custos. Contudo, esses objetivos são frequentemente conflitantes; optar rigidamente pelo atendimento às datas de entrega, por exemplo, pode elevar os custos de produção a um patamar muito superior ao que seria possível se alguns atrasos fossem gerenciados. Portanto, a escolha de uma regra de sequenciamento é estratégica e depende intrinsecamente dos objetivos da organização, do sistema produtivo empregado, da caracterização da capacidade e da estratégia de negócio estabelecida (Russomano, 2000; Ribeiro; Cordeiro, 2020).

2.9 FUNÇÃO OBJETIVO

A representação idealizada de problemas complexos de negócios é realizada através da modelagem matemática, que traduz elementos essenciais em linguagem simbólica. Embora um modelo completo inclua diversas equações e inequações que definem suas limitações, o componente que articula o propósito central da análise é a função objetivo. Esta função consiste na tradução formal da principal medida de desempenho que se busca otimizar. Ela serve como o critério de sucesso do modelo, determinando se a meta é, por exemplo, a maximização da rentabilidade, a minimização dos custos operacionais etc (Hillier *et al.*, 2013).

A formulação da função objetivo ocorre por meio de uma expressão matemática que vincula o resultado desejado às diversas escolhas quantificáveis disponíveis. Essas escolhas são estruturadas no modelo como variáveis de decisão (representadas, por exemplo, como x_1, x_2, \dots, x_n), cujos valores ótimos precisam ser encontrados. Desta forma, a função objetivo quantifica precisamente como o desempenho global é influenciado pelo valor atribuído a cada uma dessas variáveis. Em um cenário de definição de *mix* de produtos, por exemplo, a função objetivo

representaria o lucro total agregando o produto da quantidade de cada item por seu respectivo lucro unitário (Hillier *et al.*, 2013).

A finalidade de um modelo matemático de otimização é determinar os valores das variáveis de decisão que resultam no melhor resultado possível (máximo ou mínimo) para a função objetivo, ao mesmo tempo que respeitam integralmente o conjunto de restrições especificado. A confiabilidade dessa solução ótima depende diretamente da exatidão dos parâmetros, os coeficientes e constantes, utilizados na formulação da própria função objetivo (Hillier *et al.*, 2013).

3 METODOLOGIA

A metodologia representa um conjunto estruturado de procedimentos utilizados na condução de uma pesquisa científica. Trata-se de uma área do conhecimento voltada à análise crítica dos métodos disponíveis, com o objetivo de identificar quais são os mais adequados para orientar a investigação proposta. Em seu aspecto prático, envolve a seleção e aplicação de técnicas específicas que permitem a coleta, a organização e a interpretação dos dados, contribuindo para a formulação de respostas a problemas ou hipóteses levantadas ao longo do trabalho acadêmico. Dessa forma, a metodologia é essencial para garantir a validade e a coerência dos resultados obtidos, servindo como base para a construção do conhecimento científico (Prodanov; Freitas, 2013).

3.1 MÉTODOS DE ABORDAGEM

O presente trabalho adotou a abordagem hipotético-dedutiva, uma vez que foram formuladas hipóteses para um problema previamente definido. Essa abordagem científica caracteriza-se por partir da delimitação objetiva de um problema a ser investigado e, a partir disso, desenvolver hipóteses, ou seja, ideias iniciais elaboradas com o propósito de explicar determinado fenômeno. Essas hipóteses são então submetidas a testes sistemáticos e confrontadas com dados empíricos, com o objetivo de avaliar sua validade (Prodanov; Freitas, 2013).

Juntamente com a abordagem hipotético-dedutiva, fez-se uso da abordagem quali-quantitativa, também conhecida como método misto. Esse método combina análises quantitativas, que buscam objetividade, reproduzibilidade e utilizam a estatística para validar seus resultados, com análises qualitativas, as quais são de natureza subjetiva e cujos resultados não podem ser traduzidos em números, oferecendo, em essência, percepções e interpretações do fenômeno estudado (Creswell, Creswell; 2021).

Neste estudo, a abordagem qualitativa foi utilizada para compreender os desafios e características do sequenciamento de ordens de produção, possibilitando uma análise exploratória do contexto operacional, bem como análise de entrevistas. Paralelamente, a pesquisa quantitativa foi fundamental para a adequação do algoritmo de otimização e do sistema desenvolvido para a geração de sequências otimizadas e sua validação por meio da análise dos dados provenientes das simulações. A

combinação dessas abordagens permitiu avaliar a eficácia do algoritmo dentro do contexto produtivo, oferecendo suporte para decisões mais assertivas no planejamento do sequenciamento.

3.2 QUANTO AOS OBJETIVOS

Para a realização deste estudo, foram adotados os métodos de pesquisa exploratória e descritiva. A pesquisa exploratória tem como objetivo proporcionar maior familiaridade do pesquisador com o problema, tornando-o mais claro e possibilitando a formulação de hipóteses (Gil, 2022). Nesse contexto, esse método foi aplicado para compreender o fluxo do processo de sequenciamento das ordens de produção, mapear os conceitos relacionados e identificar as variáveis envolvidas, além de reconhecer os dados necessários para a geração de sequências otimizadas.

Já a pesquisa descritiva é utilizada quando se busca caracterizar um fenômeno ou examinar as relações entre suas variáveis (Gil, 2022). Sua aplicação neste estudo justifica-se pela necessidade de descrever o funcionamento atual do processo de sequenciamento e analisar, com base nos dados coletados, como a aplicação *web* poderá atuar na otimização dessas ordens, permitindo uma compreensão mais aprofundada dos impactos da solução proposta.

3.3 MÉTODOS DE PROCEDIMENTOS

Neste estudo, empregou-se o método de pesquisa bibliográfica, caracterizado pela utilização de materiais previamente publicados (Gil, 2022), o que possibilita o acesso direto a conteúdos já produzidos sobre o tema investigado (Prodanov; Freitas, 2013). A principal vantagem dessa abordagem é a possibilidade de explorar uma variedade de fenômenos mais ampla do que seria viável por meio da observação direta (Gil, 2022), proporcionando, assim, maior embasamento à pesquisa.

Outro método utilizado foi o documental, que se baseia na análise de documentos elaborados com finalidades diversas (Gil, 2022). No presente trabalho, esses documentos concentram-se na área de PCP da empresa estudada, contendo informações relevantes sobre restrições entre modelos de produtos, ordens a serem sequenciadas, entre outros aspectos.

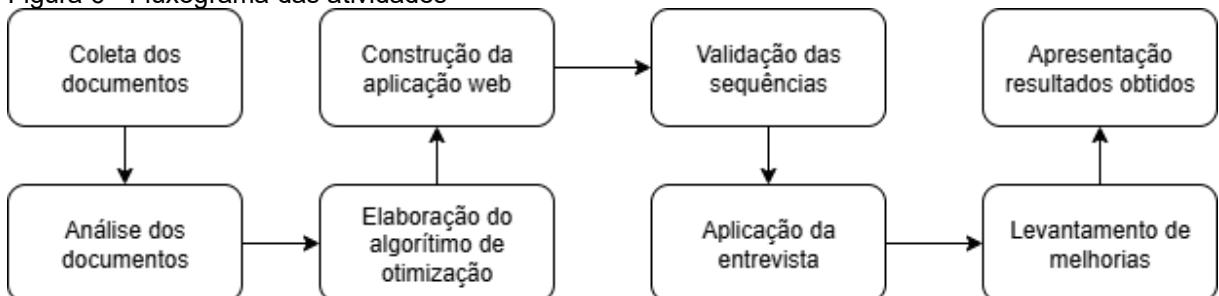
Adicionalmente, a pesquisa também pode ser caracterizada como uma pesquisa-ação, cuja finalidade é identificar e resolver problemas específicos em

contextos igualmente específicos, por meio de intervenções práticas (Gil, 2022). Essa abordagem se concretiza no desenvolvimento de uma aplicação *web* de um algoritmo de otimização e de suas respectivas integrações, com o objetivo de aprimorar o processo de sequenciamento das ordens de produção.

3.3.1 Etapas das atividades

O desenvolvimento deste estudo seguiu uma sequência estruturada de atividades, conforme esquematizado no fluxograma da Figura 6. Cada etapa foi conduzida de forma planejada, com o apoio dos analistas do setor de PCP da empresa estudada.

Figura 6 - Fluxograma das atividades



Fonte: Autor (2025).

Inicialmente foi realizada a coleta e organização de documentos técnicos internos, como planilhas de ordens de produção, restrições operacionais entre modelos de produtos e registros de sequenciamentos anteriores. Essa etapa foi fundamental para compreender o funcionamento atual do processo e mapear os parâmetros necessários para a construção do algoritmo de otimização.

Na sequência, foi realizada a análise técnica dos dados coletados, a fim de identificar padrões e requisitos que nortearam o desenvolvimento da lógica do algoritmo. Os dados foram organizados em categorias conforme a natureza das restrições utilizadas pelos analistas.

Com base nessas informações, foi iniciado o desenvolvimento do algoritmo de sequenciamento, com base na adaptação do algoritmo de Busca Tabu. A função objetivo, os critérios de parada e a estrutura da lista tabu foram definidos de acordo com o cenário da empresa.

A próxima etapa consistiu na construção da aplicação *web*, que funcionou como interface gráfica para os usuários. A aplicação foi hospedada em ambiente de

computação em nuvem e permitiu o cadastro de ordens de produção, a execução do algoritmo e a visualização do resultado sequenciado. Durante essa fase, foram considerados aspectos de usabilidade e clareza da interface.

Foram realizadas execuções, as quais foram validados em conjunto com os analistas de PCP, por meio da análise comparativa entre os sequenciamentos manuais e os gerados pela aplicação. Foram observados aspectos como o tempo de resposta do sistema e o número de restrições violadas.

Em seguida, foram conduzidas entrevistas não estruturadas com os analistas e demais envolvidos no processo de planejamento da produção. As entrevistas tiveram como objetivo captar percepções sobre a usabilidade da ferramenta, os benefícios percebidos, e eventuais ajustes necessários.

Por fim, foi realizado o levantamento das melhorias sugeridas durante a etapa de validação, seguido da sistematização dos resultados obtidos com a aplicação do algoritmo. As informações foram organizadas em tabelas comparativas, que subsidiaram a análise final do impacto da ferramenta sobre o processo produtivo.

3.4 TÉCNICA DE COLETA DE DADOS

Inicialmente, foi realizada a coleta de documentos internos do setor de PCP da empresa, incluindo planilhas de ordens, registros de restrições entre modelos e sequenciamentos históricos. Esses dados foram essenciais para o mapeamento técnico das necessidades do sistema e a definição dos parâmetros do algoritmo.

Em seguida, foi utilizada a observação participante, durante as rotinas do setor, com o objetivo de compreender os desafios enfrentados pelos analistas no processo de planejamento e replanejamento das ordens. Essa observação foi registrada por meio de anotações de campo, com foco nas falhas operacionais.

Também foram aplicadas entrevistas não estruturadas com os dois analistas . As entrevistas foram realizadas de forma *online*, através de um aplicativo de troca de mensagens, e foram coletadas durante o desenvolvimento da aplicação, seguindo assuntos sobre: a complexidade do sequenciamento manual, as limitações atuais do processo, e a percepção dos mesmos sobre os benefícios esperados com a aplicação proposta. As entrevistas foram transcritas e analisadas qualitativamente.

3.5 TÉCNICA DE ANÁLISE DE DADOS

Conforme aponta Lakatos (2021), a análise e interpretação dos resultados é uma etapa central da pesquisa, é nesse momento que os dados coletados fornecem respostas às investigações e possibilitam a verificação das hipóteses formuladas. Para este trabalho, a análise foi estruturada em duas abordagens complementares: quantitativa e qualitativa.

Na abordagem quantitativa, os resultados gerados pelas simulações do sistema foram exportados em formato de planilha eletrônica, *Excel*. Os dados referentes às violações de restrições operacionais foram tabulados para extrair os totais por tipo de restrição.

Posteriormente, esses totais foram comparados com os resultados do método manual vigente para calcular a porcentagem de redução de violações em cada categoria. Os principais indicadores de desempenho analisados foram, portanto, o número de restrições violadas.

A abordagem qualitativa, por sua vez, baseou-se nas entrevistas não estruturadas realizadas com os usuários. Os dados coletados foram transcritos e analisados com o objetivo de sintetizar as percepções dos colaboradores sobre a usabilidade, a confiabilidade e o impacto da nova ferramenta no processo de trabalho.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta etapa, apresenta-se a empresa na qual foi realizado o presente estudo, com destaque para seu contexto operacional focado no processo de sequenciamento das ordens de produção e as principais variáveis envolvidas. Em seguida, detalha-se o desenvolvimento do algoritmo de otimização e da aplicação web. Por fim, são apresentados os resultados obtidos com a implementação da solução proposta, bem como sugestões de melhorias para aprimorar o desempenho do sistema.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA

O presente estudo foi realizado em uma empresa multinacional, de grande porte localizada no noroeste do estado do Rio Grande do Sul, que emprega, em média, mais de 2.000 colaboradores. A planta industrial efetua diversos processos, como pintura, corte, dobra e soldagem, que possibilitam a manufatura de produtos e peças com aplicação no setor agrícola. Cabe salientar que por motivos de confidencialidade o nome da empresa não foi mencionado, bem como dados e informações sobre produtos foram mascarados.

O escopo de produção não se restringe a uma única família de produtos. Em suas instalações, são produzidas cinco famílias distintas: quatro delas são destinadas à comercialização, enquanto uma é de uso exclusivo interno, atuando como componente para outras unidades. Para este trabalho, a análise se concentrou apenas nas quatro famílias de produtos voltadas ao mercado.

Cada família de produto possui sua própria linha de produção, embora existam processos compartilhados entre elas. O *layout* da planta adota uma estrutura de linha de produção mista, que combina o fluxo sequencial com células de produção dedicadas. Estas células são responsáveis por peças que, posteriormente, são integradas à linha de produção final de cada produto.

As famílias de produtos possuem modelos diversos, que são variações do produto base. Além disso, é possível a adição de opcionais que agregam funcionalidades aos produtos finais. Para este trabalho, as famílias de produtos são representadas pelas letras Z, X, Y e W.

Conforme o Quadro 1, a família Z é composta por 7 produtos diferentes. Para cada produto, existem classes que definem variações no modelo base. A presença das letras "S" ou "R" na classe, por exemplo, indica a consideração dessa modificação

como um modelo distinto para a produção em linha, resultando em um total de 19 modelos possíveis para essa família. Cada um desses modelos pode receber um ou mais opcionais dentre os 4 disponíveis atualmente.

Quadro 1 - Produtos da família Z

| Produto | Classe | Família | Sigla |
|---------|--------|---------|-------|
| 1 | A | Z | 1AZ |
| 1 | AR | Z | 1ARZ |
| 2 | A | Z | 2AZ |
| 2 | AR | Z | 2ARZ |
| 2 | AS | Z | 2ASZ |
| 2 | ARS | Z | 2ARSZ |
| 3 | A | Z | 3AZ |
| 3 | AR | Z | 3ARZ |
| 3 | AS | Z | 3ASZ |
| 4 | A | Z | 4AZ |
| 4 | AR | Z | 4ARZ |
| 4 | AS | Z | 4ASZ |
| 4 | ARS | Z | 4ARSZ |
| 5 | A | Z | 5AZ |
| 5 | AS | Z | 5ASZ |
| 6 | A | Z | 6AZ |
| 6 | AS | Z | 6ASZ |
| 7 | A | Z | 7AZ |
| 7 | AS | Z | 7ASZ |

Fonte: Autor (2025).

A diversidade de modelos da família Z, detalhada no Quadro 1, permite uma adaptação precisa às necessidades do mercado. Além dessa variedade estrutural, a personalização do produto final é ampliada por meio de um conjunto de opcionais. O Quadro 2 apresenta os itens disponíveis que podem ser agregados a qualquer um dos 19 modelos, conferindo funcionalidades extras e maior valor agregado.

Quadro 2 - Opcionais disponíveis para produtos da família Z

| Opcional | Família |
|----------|---------|
| 1O | Z |
| 2O | Z |
| 3O | Z |
| 4O | Z |

Fonte: Autor (2025).

A família Y oferece 15 produtos, diferenciados por 3 classes, conforme apresentado no Quadro 3. O que a distingue das outras famílias é seu grande número de opcionais.

Quadro 3 - Produtos da família Y

| Produto | Classe | Família | Sigla |
|---------|--------|---------|-------|
| 1 | F | Y | 1FY |
| 2 | F | Y | 2FY |
| 3 | F | Y | 3FY |
| 4 | F | Y | 4FY |
| 5 | F | Y | 5FY |
| 6 | F | Y | 6FY |
| 7 | F | Y | 7FY |
| 8 | F | Y | 8FY |
| 9 | G | Y | 9GY |
| 10 | G | Y | 10GY |
| 11 | G | Y | 11GY |
| 12 | H | Y | 12HY |
| 13 | H | Y | 13HY |
| 14 | H | Y | 14HY |
| 15 | H | Y | 15HY |

Fonte: Autor (2025).

Ao total a família Y apresenta 8 opcionais disponíveis, embora a seleção de um deles possa restringir a escolha de outros. Os opcionais são detalhados no Quadro 4.

Quadro 4 - Opcionais disponíveis para produtos da família Y

| Opcional | Família |
|----------|---------|
| 1O | Y |
| 2O | Y |
| 3O | Y |
| 4O | Y |
| 5O | Y |
| 6O | Y |
| 7O | Y |
| 8O | Y |

Fonte: Autor (2025)

A família X é a que apresenta o menor número de produtos, com apenas 4 itens ofertados, conforme o Quadro 5. Estes produtos são maiores e voltados para grandes extensões de terra, planas onde a transportabilidade não é um desafio, sendo possível escolher entre 3 modelos de uma classe e apenas um de outra.

Quadro 5 - Produtos da família X

| Produto | Classe | Família | Sigla |
|---------|--------|---------|-------|
| 1 | J | X | 1JX |
| 2 | J | X | 2JX |
| 3 | J | X | 3JX |
| 4 | K | X | 4KX |

Fonte: Autor (2025).

Por se tratar de produtos de nicho, são os que oferecem a menor quantidade de opcionais, com apenas 2 opções disponíveis, apresentadas no Quadro 6.

Quadro 6 - Opcionais disponíveis para produtos da família X

| Opcional | Família |
|----------|---------|
| 1O | X |
| 2O | X |

Fonte: Autor (2025).

Finalmente, a família W é a maior entre as analisadas, com a possibilidade de produzir 26 modelos diferentes, conforme a Quadro 7. A presença das letras "S" e "C" nas classes indica variações na produção do produto base, e assim como na família Z, isso é tratado como um novo produto na linha de produção.

Quadro 7 - Produtos da família W

| Produto | Classe | Família | Sigla |
|---------|--------|---------|-------|
| 1 | L | W | 1LW |
| 2 | L | W | 2LW |
| 3 | L | W | 3LW |
| 4 | L | W | 4LW |
| 5 | L | W | 5LW |
| 6 | L | W | 6LW |
| 7 | L | W | 7LW |
| 8 | L | W | 8LW |
| 9 | L | W | 9LW |
| 10 | L | W | 10LW |
| 11 | L | W | 11LW |
| 12 | L | W | 12LW |
| 13 | L | W | 13LW |
| 14 | L | W | 14LW |
| 15 | L | W | 15LW |
| 16 | N | W | 16NW |
| 17 | N | W | 17NW |
| 18 | N | W | 18NW |
| 19 | N | W | 19NW |
| 20 | N | W | 20NW |

| | | | |
|----|----|---|-------|
| 21 | N | W | 21NW |
| 21 | NC | W | 21NCW |
| 21 | NS | W | 21NSW |
| 22 | N | W | 22NW |
| 22 | NC | W | 22NCW |
| 22 | NS | W | 22NSW |
| 23 | M | W | 23MW |
| 23 | MC | W | 23MCW |
| 24 | M | W | 24MW |
| 24 | MC | W | 24MCW |
| 25 | M | W | 25MW |
| 25 | MC | W | 25MCW |
| 26 | M | W | 26MW |
| 26 | MS | W | 26MSW |

Fonte: Autor (2025).

Porém, apesar do grande número de modelos, os opcionais se restringem a apenas 3 opções, conforme a Quadro 8.

Quadro 8 - Opcionais disponíveis para produtos da família W

| Opcional | Família |
|----------|---------|
| 1O | W |
| 2O | W |
| 3O | W |

Fonte: Autor (2025).

A caracterização das famílias de produtos Z, Y, X e W evidencia a alta complexidade e a significativa variedade do portfólio da empresa. A combinação de múltiplos modelos-base, variações dimensionadas por classes e a adição de opcionais específicos para cada família resulta em um amplo espectro de configurações de produtos finais. Essa diversidade reflete a capacidade da planta industrial de atender a demandas específicas do mercado agrícola, gerenciando, ao mesmo tempo, processos produtivos distintos e compartilhados para otimizar sua manufatura.

4.2 PROCESSAMENTO DAS ORDENS DE PRODUÇÃO

O planejamento e o sequenciamento da produção para as quatro famílias de produtos da empresa são de responsabilidade de dois analistas do setor de PCP. O processo é estruturado em etapas distintas, ilustrada na Figura 7, que se iniciam com a definição da demanda e culminam na elaboração da sequência produtiva.

Figura 7 - Fluxo das atividades do sequenciamento de produção



Fonte: Autor (2025).

A primeira etapa consiste no recebimento das necessidades de produção. Geralmente às quintas-feiras, os analistas recebem, via *e-mail*, a demanda da semana subsequente, enviada pelo setor de gestão de pedidos. Este informativo detalha a quantidade de itens a serem fabricados para cada família de produtos.

Na segunda etapa, realiza-se a validação e o detalhamento do plano. Os analistas consultam o plano de produção para verificar se a alocação de máquinas e a capacidade produtiva estão alinhadas com as projeções da unidade fabril. Neste mesmo plano, são definidas as metas de produção diária. É imprescindível que as quantidades especificadas no plano de produção e na solicitação de pedidos sejam coincidentes para que o processo avance.

A terceira etapa envolve a extração e a organização dos dados. Após a validação das quantidades, os analistas exportam as ordens de produção do sistema integrado de gestão para uma planilha eletrônica (*Excel*). Este arquivo consolida informações cruciais para o sequenciamento, como as especificações técnicas de cada produto, seus componentes opcionais, o cliente destinatário e o prazo de entrega, entre outros.

Por fim, na quarta e última etapa, ocorre o sequenciamento manual da produção. Com base nos dados compilados, os analistas organizam a ordem em que os produtos serão fabricados. Para que o sequenciamento seja validado e liberado para a fábrica, ele deve atender a um conjunto de restrições produtivas específicas para cada família de produtos.

4.2.1 Restrições de fábrica

A complexidade do processo de sequenciamento reside na multiplicidade de regras que devem ser simultaneamente atendidas. Tais restrições, levantadas junto à equipe de PCP e produção, visam otimizar o fluxo de materiais, evitar gargalos operacionais e garantir a eficiência dos processos de soldagem, montagem e uso de equipamentos. A seguir, são detalhadas as principais restrições para cada família de produtos (Z, Y, X e W).

A família Z possui regras de sequenciamento focadas principalmente em processos de soldagem e montagem, além de um controle de volume para modelos específicos. As principais diretrizes são:

- Produtos das classes S e R não devem ser produzidos consecutivamente, devido a limitações no setor de solda;
- Para evitar interrupções na linha de montagem, produtos que contêm os opcionais 1O e 2O não podem ser alocados em sequência. De forma similar, itens com o opcional 3O devem ser intercalados na produção;
- A produção sequencial dos modelos 4, 5, 6 e 7 (independentemente da classe) deve ser evitada. A montagem de uma peça específica nestes modelos demanda um tempo superior, e o sequenciamento deles gera um gargalo produtivo. A mesma restrição de não sequenciamento se aplica aos modelos 1, 2, 6 e 7;
- O produto modelo 2 possui uma restrição de capacidade produtiva, limitada a 5 unidades por dia em um turno de produção, ou 8 unidades caso a fábrica opere em dois turnos.

Para a família Y, as restrições concentram-se no balanceamento da produção ao longo da semana e na combinação estratégica de modelos e opcionais:

- Os opcionais 2O, 3O e 5O devem ter sua produção distribuída uniformemente ao longo da semana, evitando a concentração em dias específicos. Recomenda-se também a intercalação entre as três diferentes classes de produtos que compõem a família;
- Os modelos 15HY e 11GY não devem ser posicionados em sequência. A prática recomendada é alocar um produto de modelo menor ou igual a 4 como intermediário;
- De forma análoga a outras famílias, produtos com os opcionais 1O ou 6O não devem ser produzidos consecutivamente;
- Há um limite de capacidade para os modelos menores ou iguais a 4, fixado em 7 unidades por dia para um turno e 14 unidades para dois turnos;
- Para gerenciar o fluxo de itens com o opcional 4O, estes devem ser intercalados por um conjunto específico de produtos: ou três produtos de modelo inferior a 12, ou uma combinação de um produto maior que 12 e um menor que 12.

A família X é caracterizada por severas restrições de capacidade, volume e uso de recursos, exigindo um planejamento de turnos mais complexo:

- A produção é limitada a um máximo de 2 unidades por turno. Especificamente, o modelo 4KX não pode exceder 1 unidade por dia, e o modelo 3JX está sujeito a um teto de produção de 5 unidades semanais;
- Os modelos 1JX, 2JX e 3JX devem ser intercalados. Além disso, a inclusão de produtos com o opcional 1O é restrita a uma unidade por turno;
- A produção combinada do modelo 4KX com qualquer modelo da série JX (1JX, 2JX ou 3JX) em um mesmo dia torna obrigatória a operação em um segundo turno, devido a limitações de espaço físico na área de produção;
- A combinação específica dos modelos 4KX e 3JX gera um conflito no uso de um equipamento crítico, exigindo a extensão do turno de trabalho para sua execução;
- A alocação de 3 ou mais produtos da família X no mesmo dia sobrecarrega os equipamentos disponíveis, também demandando a ativação de um segundo turno.

As diretrizes para a família W visam principalmente o balanceamento do *mix* de produção, com atenção especial aos produtos de grande porte:

- Busca-se manter uma produção diária constante de produtos da classe L. Em dias de baixo *mix*, estes devem ser posicionados entre itens das classes M e N. Se dois produtos da classe L forem produzidos, um deles deve ser, obrigatoriamente, de modelo menor ou igual a 7;
- A produção diária de produtos maiores ou igual a 23 deve ser similar ao longo dos dias e está limitada a 10 unidades por dia devido à restrição de disponibilidade de materiais;
- Deve-se evitar o sequenciamento de produtos maiores que 11 imediatamente antes ou depois desses modelos de grande porte;
- Entre a produção de dois modelos maiores que 23, é obrigatória a inserção de um produto de modelo entre 16 e 20;
- Deve-se evitar a produção sequencial dos modelos 25 e 26, ou 26 e 24. Essa restrição é anulada caso um dos produtos do modelo 26 pertença também à classe S;

- A capacidade máxima de produção para esta família é de 15 produtos por dia em um turno.

Adicionalmente às regras específicas de cada família, o planejamento é governado por um conjunto de diretrizes sistêmicas e prioridades dinâmicas que afetam a organização geral da produção:

1. Sincronização de pedidos entre famílias: Existe uma dependência logística entre as famílias Z e W. Recomenda-se que, caso produtos de ambas as famílias se destinem a um mesmo cliente final, suas respectivas produções sejam sincronizadas para ocorrerem no mesmo dia. Esta prática visa otimizar a consolidação de cargas e a eficiência logística na expedição;
2. Prioridades definidas pelo setor de pedidos: O sequenciamento está sujeito a intervenções externas do setor responsável pela gestão de ordens. Quando um produto específico é designado como "prioritário", sua produção deve ser, impreterivelmente, alocada na segunda-feira da semana de planejamento, sobrepondo-se a outras regras de sequenciamento;
3. Priorização dinâmica por fatores de entrega: A ordem de produção não é estática e pode ser reavaliada com base em fatores conjunturais. Atrasos na produção, urgências logísticas ou o destino do produto são variáveis que influenciam a fila de produção. Tipicamente, ordens destinadas à exportação recebem um nível de prioridade mais elevado em comparação com as vendas para o mercado interno, a fim de cumprir prazos de embarque e contratos internacionais.

A complexidade e a interdependência destas regras tornam o sequenciamento manual uma atividade crítica e desafiadora, demandando alta atenção dos analistas, que em média utilizam 6 horas para a realização da tarefa, para evitar a geração de gargalos, paradas de linha e atrasos na entrega.

A aplicação conjunta de todas essas restrições sistêmicas e específicas por família permite que os analistas estruturem a sequência final de produção. Uma vez que a ordem dos produtos é definida e validada manualmente na planilha eletrônica, ela é transferida para o ERP da empresa. É nesta etapa final do planejamento que a sequência é oficialmente fixada, momento em que o sistema gera a numeração definitiva para cada produto, consolidando a sequência de produção que será executada pela fábrica.

4.3 OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO

Para otimizar o processo de sequenciamento de ordens de produção, desenvolveu-se uma aplicação web. O sistema foi estruturado em três componentes principais: uma interface para gestão de regras, uma interface de execução e um algoritmo de otimização. Este capítulo detalha a arquitetura dos componentes desse sistema.

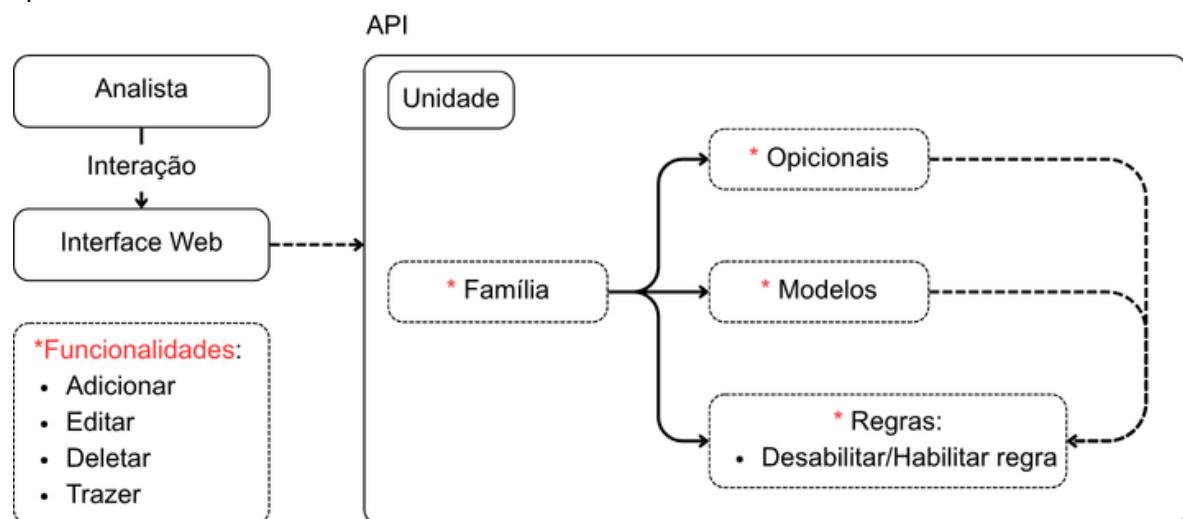
4.3.1 Interface de regras

O sequenciamento da produção é um processo sujeito a múltiplas restrições operacionais. Para gerenciar essa complexidade, desenvolveu-se uma interface dedicada ao cadastro e armazenamento das regras de produção associadas a cada modelo de produto. A plataforma permite a consulta e a inclusão de novas famílias de produtos, modelos, opcionais e as regras específicas que regem suas combinações.

Essa abordagem garante que a ferramenta se mantenha dinâmica e adaptável. Reconhecendo a natureza variável do planejamento de produção, o sistema inclui a funcionalidade de habilitar e desabilitar regras de forma temporária. Tal recurso confere a flexibilidade necessária para ajustar o sequenciamento a cenários específicos, sem a necessidade de exclusão permanente das restrições.

A arquitetura do sistema, detalhada na Figura 8, ilustra a interação entre o usuário e os principais módulos da aplicação. A estrutura foi projetada para suportar o gerenciamento das restrições de produção de forma modular.

Figura 8 - Fluxograma dos módulos de regras de distribuição de opcionais, modelos e suas dependências



Fonte: Autor (2025).

A arquitetura é composta por três elementos centrais. O ator denominado analista representa o usuário final do sistema, responsável pelo planejamento e gestão das informações. A interação com o sistema ocorre por meio da interface *web*, que funciona como cliente e oferece os recursos visuais para a manipulação dos dados.

O terceiro componente é a interface de programação de aplicação (API), que centraliza a lógica de negócio. A API organiza as regras em módulos que representam as entidades do processo produtivo:

- Família: Agrupa produtos com características semelhantes;
- Modelos: Representa os produtos específicos dentro de cada família;
- Opcionais: Corresponde às variações e configurações de cada modelo.

O diagrama define a dependência hierárquica entre esses módulos, onde uma família pode conter vários modelos, e um modelo pode estar associado a múltiplos opcionais. Para administrar as inter-relações, o módulo de regras permite a criação de restrições operacionais que governam as combinações válidas entre as demais entidades. Neste módulo, destaca-se a funcionalidade de desabilitar/habilitar regra, que permite a flexibilidade necessária ao planejamento.

Por fim, o componente unidade representa o elemento centralizador da planta fabril à qual todas as configurações e regras se aplicam. Dessa forma, a arquitetura proposta estrutura os dados de maneira lógica e reflete o fluxo de trabalho do analista, facilitando a gestão dinâmica e adaptável das restrições de sequenciamento da produção.

4.3.2 Interface de execução

A execução do algoritmo de otimização requer dados de entrada que definem tanto os produtos a serem sequenciados quanto às metas de produção diárias. Para gerenciar o fornecimento dessas informações e manter a compatibilidade com o fluxo de trabalho preeexistente, desenvolveu-se uma interface gráfica que permite ao usuário submeter os dados necessários.

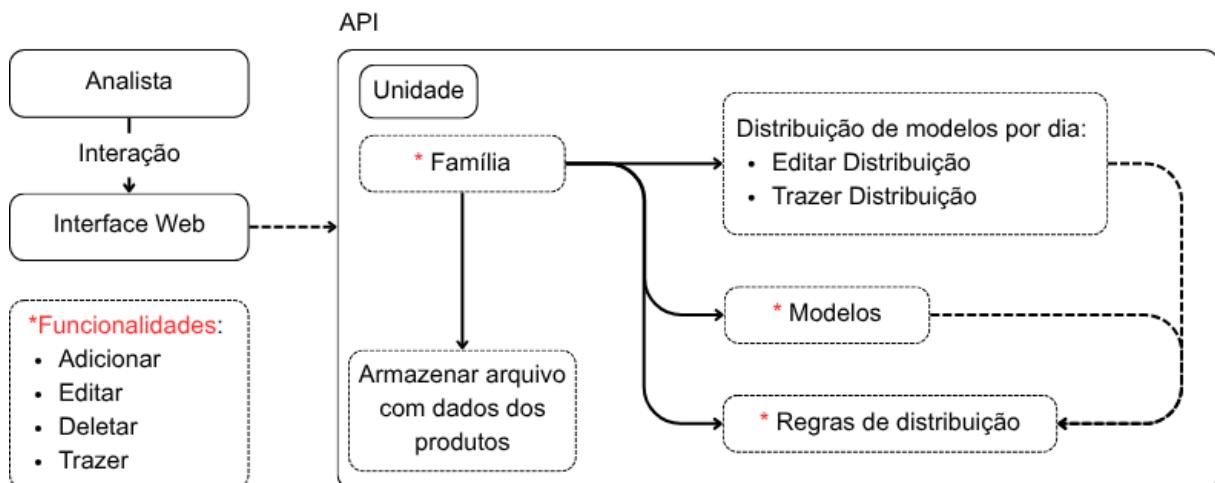
Antes de iniciar o processo de otimização, é necessário que o usuário administrador forneça ao sistema os seguintes insumos:

1. Arquivo de Produção: Um arquivo digital em formato *Excel* contendo os detalhes de cada ordem de produção, incluindo atributos como: código do produto, modelo e seus respectivos opcionais;
2. Metas de Produção Diárias: A quantidade de produtos que devem ser sequenciados em cada dia do período de planejamento (por exemplo, de segunda-feira a sábado).

Adicionalmente, o sistema oferece uma funcionalidade avançada que permite um controle mais granular do sequenciamento: a definição de metas de produção diárias por modelo específico. Dessa forma, além de informar a meta de produção total para um dia, o planejador pode estipular cotas específicas para cada modelo a ser produzido naquele período.

Esta funcionalidade concede maior autonomia e precisão ao planejador. A capacidade de distribuir modelos de forma estratégica ao longo da semana pode ser utilizada para diminuir o acúmulo de restrições em dias específicos, promovendo um *mix* de produção mais uniforme e balanceado na linha de montagem.

Figura 9 - Fluxograma dos módulos de regras de distribuição de modelos por dia



Fonte: Autor (2025).

Conforme ilustrado na Figura 9, a arquitetura mantém a interação do analista com a interface *web* e a API. O módulo armazenar arquivos com dados dos produtos é o componente responsável por receber e processar o arquivo *Excel*, extraiendo as informações das ordens de produção. Esses dados são mantidos até que o usuário resolva executar a otimização.

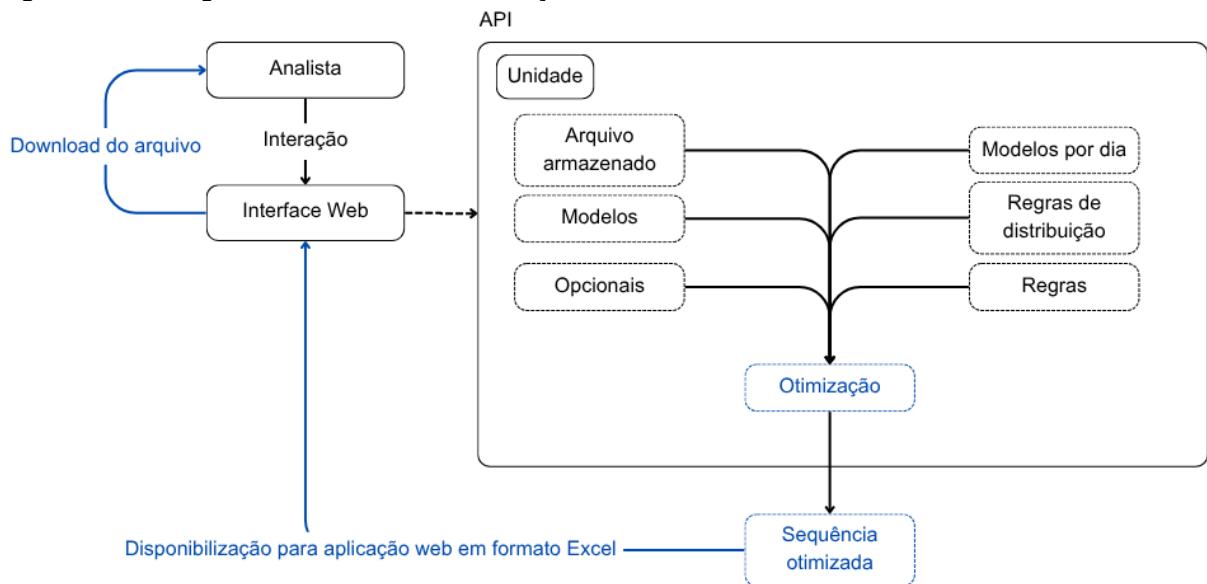
O módulo de distribuição de modelos por dia corresponde à funcionalidade que permite ao usuário definir as metas de produção diárias, tanto totais quanto específicas por modelo. As configurações estabelecidas nesta etapa são gerenciadas pelo módulo regras de distribuição, que armazena e aplica essas diretrizes durante a execução do algoritmo. A estrutura interrelacionada destes componentes garante que os dados de entrada sejam corretamente processados e que as metas de produção definidas pelo planejador sejam consideradas no sequenciamento final.

4.3.3 Algoritmo de otimização

O núcleo do sistema desenvolvido para o sequenciamento da produção é o seu algoritmo de otimização. Este componente é responsável por processar as ordens de produção, as quantidades diárias e o conjunto de regras e restrições configuradas, com o objetivo de gerar uma sequência que seja não apenas viável, mas otimizada. A otimização, neste contexto, consiste em minimizar as penalizações associadas à violação de regras operacionais.

Para solucionar este problema de sequenciamento, foi realizado a modificação do algoritmo de Busca Tabu. A busca por uma solução ótima exata, que avaliaria todas as permutações possíveis de sequências, é computacionalmente inviável para problemas de escala industrial devido ao crescimento exponencial do tempo de processamento. Portanto, a metodologia empregada é uma adaptação do algoritmo de Busca Tabu, projetada para explorar o espaço de soluções de forma inteligente e encontrar soluções de alta qualidade em um tempo de execução razoável. A arquitetura geral do processo de otimização, desde a entrada de dados pelo analista até a disponibilização da sequência otimizada, é apresentada na Figura 10.

Figura 10 - Fluxograma do módulo de otimização



Fonte: Autor (2025).

Conforme ilustrado na Figura 10, o analista inicia o processo submetendo um arquivo em formato *Excel* contendo as necessidades de produção através da interface *web*. A API recebe estes dados e os armazena temporariamente. Ao acionar a otimização, o algoritmo central acessa as informações do arquivo (modelos e opcionais), bem como as regras de distribuição e as quantidades diárias previamente cadastradas no sistema. Após o processamento, o resultado, denominado "Sequência otimizada", é retornado e disponibilizado ao analista via arquivo *Excel*.

Para compreender o funcionamento do algoritmo, é fundamental detalhar seus dois pilares: a Função Objetivo, que quantifica a qualidade de uma sequência, e o Mecanismo de Busca, que explora sistematicamente as possíveis soluções.

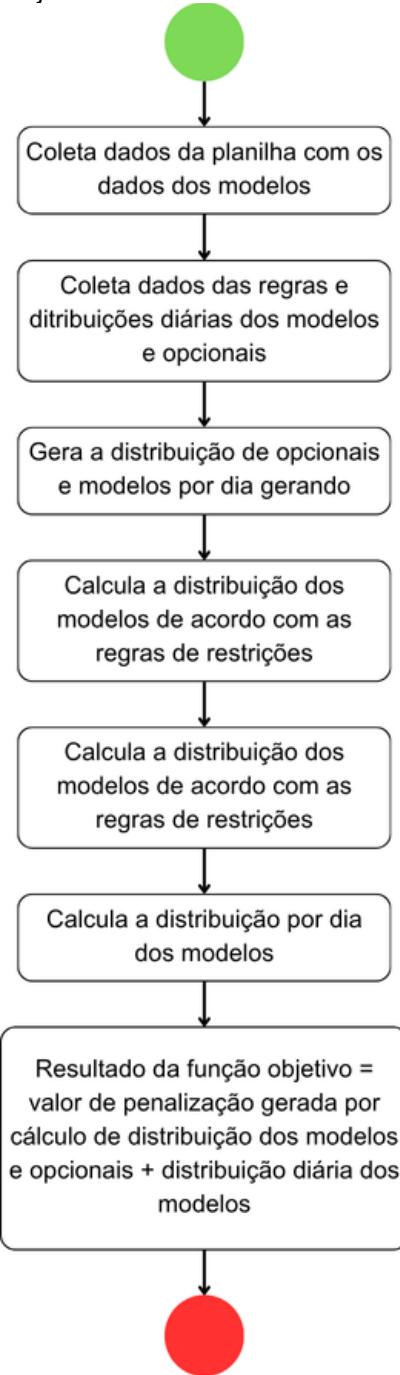
4.3.3.1 A Função Objetivo

O primeiro passo para a otimização é definir um critério quantitativo para avaliar a quanto “boa” ou “ruim” é uma determinada sequência de produção. Este critério é materializado pela Função Objetivo. No presente trabalho, a função objetivo foi modelada como um somatório de penalizações. A lógica funciona da seguinte maneira: cada vez que uma regra de produção é violada na sequência em análise, um valor de penalidade é somado a um contador.

O objetivo do algoritmo é, portanto, encontrar uma sequência que minimize o valor total deste contador, que representaria uma sequência sem nenhuma violação

de regras. O fluxo de cálculo da função objetivo para uma dada sequência é detalhado na Figura 11.

Figura 11 - Fluxograma da função objetivo



Fonte: Autor (2025).

Conforme a Figura 11, o processo de avaliação de uma sequência candidata inicia-se com a agregação de todas as informações pertinentes. Primeiramente, o algoritmo realiza a leitura dos dados de entrada, que compreendem a lista detalhada de todos os produtos a serem produzidos, incluindo seus respectivos modelos e

opcionais. Em paralelo, o sistema carrega o conjunto de todas as regras e distribuições que estão ativas no momento da execução. Este conjunto de restrições é multifacetado, englobando tanto as regras de sequenciamento de opcionais, quanto às quantidades de produção diárias estipuladas para modelos específicos, como "produzir 20 unidades do Modelo A na segunda-feira".

Uma vez que os dados dos produtos e as restrições operacionais são carregados, o algoritmo dá início à sua análise. Ele percorre a sequência, verificando a conformidade de cada posição e de subconjuntos de posições com as regras estabelecidas. Durante esta verificação, para cada violação identificada, um valor de penalidade é atribuído. Da mesma forma, se a quantidade diária de produção para um determinado modelo não for atingida naquela configuração, gera outra penalidade.

Ao final da verificação completa da sequência, o valor final da função objetivo é consolidado pela soma de todas as penalidades individuais acumuladas. Quanto maior o valor final, mais distante a sequência está de cumprir os critérios operacionais da planta. Este resultado numérico é, portanto, a única e decisiva métrica que o algoritmo de busca utiliza para julgar a qualidade relativa entre duas sequências distintas, permitindo-lhe decidir, de forma objetiva, se uma nova configuração representa uma melhoria em relação à anterior.

4.3.3.2 O Algoritmo de Busca

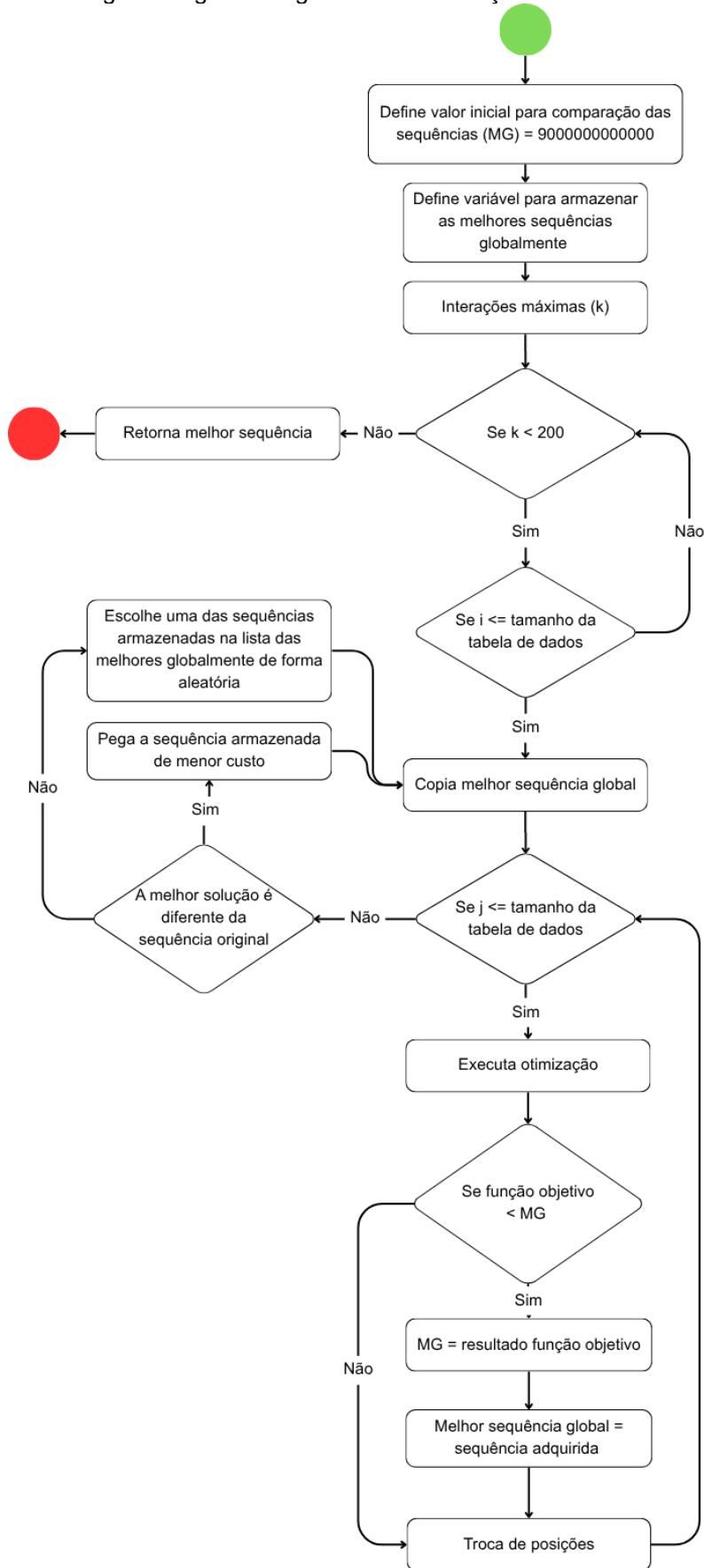
Uma vez estabelecida a capacidade de medir a qualidade de qualquer sequência, o desafio passa a ser como encontrar a melhor sequência possível. Conforme mencionado, o algoritmo implementado é uma adaptação da Busca Tabu. A Busca Tabu clássica é um método de busca local que explora o espaço de soluções movendo-se de uma solução para a melhor solução em sua "vizinhança".

Para evitar ciclos, que consistem em retornar a soluções já visitadas, e escapar de ótimos locais, soluções que são boas, mas não as melhores globalmente, ela utiliza uma "lista tabu" que proíbe temporariamente certos movimentos. Porém, para este projeto, a lista tabu se torna uma lista de melhores soluções, armazenando o melhor resultado e sendo inicializada a partir deste melhor resultado nas interações posteriores.

A adaptação desenvolvida neste trabalho adota a filosofia central da Busca Tabu de uma exploração estruturada e extensa da vizinhança, porém, em vez de uma lista tabu explícita, implementa um controle rigoroso por meio de um número pré-

definido de iterações e uma busca sistemática, garantindo uma ampla cobertura do espaço de soluções. O fluxograma do algoritmo de busca é apresentado na Figura 12.

Figura 12 - Fluxograma lógico do algoritmo de otimização



Fonte: Autor (2025).

Observando a Figura 12, o funcionamento do algoritmo inicia-se com uma etapa de preparação. É definido um "valor inicial para comparação" extremamente alto (90000000000) para a variável que armazenará o melhor resultado da função objetivo. Ao inicializá-la com um número tão grande, garante-se que a primeira sequência válida avaliada terá um custo inherentemente menor, tornando-se assim a primeira "melhor sequência" e estabelecendo o primeiro ponto de referência para a otimização.

Em seguida, o algoritmo entra em seu laço de controle principal, definido pela variável k , que estabelece um número máximo de 200 interações. Este laço externo desempenha um papel crucial na diversificação da busca, pois a cada nova iteração de k , o processo pode ser reiniciado a partir de uma nova sequência inicial, o que aumenta significativamente a probabilidade de não ficar retido em uma região de ótimo local e permite explorar diferentes áreas do espaço de soluções.

Dentro de cada grande iteração k , o coração da busca local acontece através da geração e avaliação da vizinhança da solução corrente. O algoritmo toma a melhor sequência encontrada até o momento e começa a gerar sistematicamente suas "vizinhas", sequências muito similares, mas com uma pequena modificação. Neste algoritmo, a modificação consiste na troca de posições entre dois itens da sequência. Por meio de laços aninhados, controlados pelas variáveis i e j , essa lógica é implementada de forma exaustiva, garantindo que todas as trocas possíveis de dois elementos sejam avaliadas. Para cada par (i, j) , uma nova sequência candidata é gerada e imediatamente submetida ao procedimento de cálculo da função objetivo, resultando em um valor de penalização que quantifica sua qualidade.

O passo seguinte é o de comparação e atualização, que constitui o mecanismo de decisão do algoritmo. O valor objetivo da nova sequência vizinha é comparado com o melhor valor objetivo armazenado. Se a nova sequência se mostrar melhor, ou seja, possuir um valor de função objetivo menor, ela substitui a melhor sequência anterior e seu valor de penalização atualiza a variável melhor valor objetivo. Caso contrário, a sequência vizinha é descartada. Este ciclo de geração, avaliação e comparação prossegue até que todas as permutações de troca de dois elementos tenham sido exploradas.

Ao final dos laços i e j , o sistema terá identificado a melhor solução dentro daquela vizinhança expandida. O processo então retorna ao laço principal k para iniciar uma nova grande iteração. Após a conclusão de todas as 200 iterações, a

melhor sequência encontrada globalmente durante todo o processo é retornada como a solução otimizada final.

4.4 RESULTADOS OBTIDOS

Nesta etapa, são apresentados e analisados os resultados obtidos pela ferramenta. O objetivo é evidenciar os efeitos da implementação do sistema proposto em comparação com o processo de sequenciamento manual vigente. Para uma melhor compreensão, a apresentação dos dados foi organizada em duas subseções principais: a primeira dedicada à análise quantitativa, focando na redução das violações de restrições e a segunda abordando uma análise qualitativa, detalhando as percepções dos usuários sobre a ferramenta e melhorias operacionais.

4.4.1 Restrições violadas

Para a validação do sistema proposto e a quantificação da sua eficácia na redução de violações de restrições operacionais, realizou-se uma análise comparativa com os dados históricos da empresa. Foram extraídos do sistema de gestão os sequenciamentos de produção executados manualmente pelos analistas durante o ano fiscal de 2024, período que compreende de outubro de 2023 a outubro de 2024, garantindo assim uma base de dados que representa um ciclo anual completo, representado por 46 semanas de produção.

Por solicitação da equipe de PCP, o escopo da análise foi direcionado para as famílias de produtos Z e W. Esta decisão foi tomada pois as famílias Y e X passaram por recentes modificações em seus produtos, o que tornaria a análise de seus dados históricos incoerente com o cenário produtivo futuro no qual a ferramenta será aplicada.

Para a família Z são apresentados os dados referentes às violações cometidas no método manual e os resultados gerados pelo sistema proposto, comparando-os resultados e trazendo a redução percentual. A Tabela 1 consolida o número de violações de restrições operacionais para a família Z, com base nos sequenciamentos realizados ao longo do período analisado.

Tabela 1 - Número de restrições violadas da família Z

| Restrições | Violações (Manuais) | Violações (Sistema) | Redução de violações (%) |
|----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|
| PRODUTO 6 / 7 | 2 | 0 | 100% |
| PRODUTO 1 - 2 / 6 -7 | 40 | 37 | 7,5% |
| CLASSE COM S | 21 | 0 | 100% |
| OPCIONAL 1 | 115 | 35 | 69,57% |
| OPCIONAL 2 | 57 | 0 | 100% |
| OPCIONAL 3 | 122 | 143 | -17,21% |
| OPCIONAL 4 | 0 | 0 | 0,0% |
| Total | 357 | 215 | 39,78% |

Fonte: Autor (2025).

Conforme a Tabela 1, o método manual resultou em um total de 357 violações para a família Z no período. Destacam-se as restrições "OPCIONAL 3" e "OPCIONAL 1" como as mais infringidas, com 122 e 115 ocorrências, respectivamente, representando juntas mais de 66% do total de violações. Ao submeter as mesmas demandas ao sistema desenvolvido, o número total de infrações foi reduzido para 215. Ao confrontar os resultados do método manual com os do sistema, observa-se uma redução total de 142 violações, o que representa uma melhora de 39,78% na aderência às restrições operacionais para a família Z.

O sistema foi capaz de eliminar completamente as violações das restrições "PRODUTO 6 / 7", "CLASSE COM S" e "OPCIONAL 2". Além disso, a restrição "OPCIONAL 1" teve seu número de violações reduzido de 115 para 35, uma queda de aproximadamente 69,57%. Por outro lado, é notável que a restrição "OPCIONAL 3" apresentou um aumento no número de violações, passando de 122 para 143. Este comportamento sugere que o algoritmo de otimização pode ter priorizado a resolução de outras restrições em detrimento desta. A restrição "PRODUTO 1 - 2 / 6 - 7" apresentou uma leve melhora, com uma redução de 40 para 37 violações.

Para a família W foram acumuladas um total de 280 violações no método manual. A análise dos dados evidencia que a restrição "CLASSE M" é o ponto crítico deste processo, sendo responsável por 218 ocorrências, o que representa aproximadamente 78% do total de violações desta família. As demais infrações manuais se distribuem entre "PRODUTO 25 / 26" e "CLASSE M / CLASSE L". Os dados comparativos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Número de restrições violadas da família W

| Restrições | Violações (Manuais) | Violações (Sistema) | Redução de violações (%) |
|---------------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|
| PRODUTO 25 / 26 | 22 | 0 | 100% |
| CLASSE M | 218 | 79 | 63,76% |
| CLASSE M / CLASSE L | 40 | 0 | 100% |
| CLASSE L | 0 | 11 | 0,0% |
| OPCIONAIS | 0 | 0 | 0,0% |
| Total | 280 | 90 | 67,86% |

Fonte: Autor (2025).

Ao aplicar o sequenciamento automatizado, o total de violações para a família W foi reduzido para 90. A comparação direta entre os métodos revela uma redução de 190 violações, equivalente a uma melhora de 67,86% no cumprimento das restrições para esta família.

A análise detalhada dos resultados para a família W mostra que o sistema eliminou por completo as violações das restrições "PRODUTO 25 / 26" e "CLASSE M / CLASSE L". Adicionalmente, a restrição "CLASSE M", a que se apresentou como detentora de maiores restrições violadas pelos analistas, teve seu número de violações reduzido de 218 para 79, uma melhora de 63,76%.

4.4.2 Melhoria do processo

A adoção efetiva da aplicação pelos analistas foi consolidada no período entre maio e junho de 2025. Desde essa implementação, o processo tem sido conduzido predominantemente pelo sistema, demandando dos analistas responsáveis apenas pequenos ajustes manuais pontuais, o que confirma a alta taxa de automação e a estabilidade da ferramenta desenvolvida.

A eficiência da ferramenta teve um impacto imediato na estrutura da equipe. Juntamente com a entrada em operação do sistema, observou-se uma reestruturação de responsabilidades dentro do setor. Atualmente, o processo é executado por apenas um profissional, notavelmente um colaborador recém-contratado e sem experiência prévia na atividade. A ferramenta, neste contexto, agiu como um facilitador para o aprendizado das regras de negócio, permitindo que o novo colaborador atingisse a autonomia na execução do processo em um curto espaço de tempo. Este sucesso resultou diretamente na redução de um funcionário dedicado exclusivamente à execução do processo na planta brasileira.

A agilidade de processamento da ferramenta é um fundamental para essa melhoria de desempenho, estabelecendo um contraste significativo com o método anterior. Enquanto o processo manual exigia cerca de 6 horas semanais de trabalho dos analistas de PCP para sequenciar todos os produtos, o sistema proposto realiza cada execução de sequenciamento em um intervalo de 1 a 3 minutos. Esta rapidez computacional permite que múltiplas simulações e correções sejam feitas em uma fração do tempo, possibilitando a verificação imediata de eventuais erros e minimizando o tempo total gasto com o processo, garantindo assim a eficiência contínua da operação.

Diante da eficiência e do sucesso demonstrados na unidade brasileira, o projeto foi escalado e replicado em uma unidade da empresa na Alemanha, onde o processo era realizado de forma totalmente manual por um único funcionário. O profissional local reportou que o sistema eliminou 80% do tempo antes dedicado à atividade, validando a escalabilidade da solução e o impacto positivo em diferentes contextos operacionais.

CONCLUSÃO

O processo de sequenciamento da produção, quando realizado manualmente, pode ser um grande consumidor de tempo e um ponto de ineficiência, gerando violações das restrições de fábrica que impactam a produtividade. Sendo assim, este trabalho foi desenvolvido com base no problema de pesquisa: Como otimizar o sequenciamento de ordens de produção para reduzir tempo de planejamento e minimizar violações de restrições?

Através do desenvolvimento e da implementação de uma aplicação *web* foi possível constatar que a ferramenta não apenas automatizou uma tarefa antes manual e demorada, mas também proporcionou uma melhoria substancial na qualidade do sequenciamento. Como apresentado no Capítulo 4, os resultados demonstraram uma redução tanto no tempo de planejamento quanto no número de violações, validando a eficácia da solução proposta.

Em relação às hipóteses apresentadas no item 1.4, a primeira destacou que a implementação da aplicação *web* permitiria uma redução de, no mínimo, 70% no tempo despendido pelos analistas nesta atividade. Esta hipótese foi confirmada e superada. O tempo para a geração da sequência de produção foi reduzido de horas de trabalho para poucos minutos e, segundo a percepção do analista envolvido, para a planta da Alemanha, a ferramenta proporcionou uma redução de aproximadamente 80% no tempo total dedicado à tarefa. Além disso, o processo que antes exigia a atuação de dois funcionários, na planta brasileira, passou a ser gerenciado por apenas um.

A segunda hipótese ressaltava que a utilização da aplicação *web* resultaria em uma diminuição de, pelo menos, 45% nas violações de restrições de fábrica. Esta hipótese foi parcialmente confirmada, com a ferramenta demonstrando resultados positivos, porém, distintos para cada linha de produto. Para a família de produtos W, a meta foi superada com sucesso, alcançando uma redução de 67,9% nas violações. Já para a família Z, o resultado foi uma diminuição de 39,7%, que, embora tenha ficado um pouco abaixo da meta estipulada, ainda assim representa uma melhoria substancial em comparação ao processo manual. Portanto, conclui-se que a aplicação foi eficaz na melhoria da qualidade do sequenciamento para ambas as famílias testadas.

Quanto ao objetivo geral, que tratava de desenvolver uma aplicação *web* para otimizar o sequenciamento de ordens de produção, é possível concluir que foi plenamente alcançado. A ferramenta desenvolvida não só se mostrou funcional, como também gerou os impactos positivos esperados na redução do tempo de planejamento e na minimização de violações, conforme detalhado ao longo do Capítulo 4.

No que se refere aos objetivos específicos, as primeiras etapas da pesquisa foram devidamente cumpridas. O primeiro objetivo, coletar informações sobre as restrições da linha de produção, foi concluído com o detalhamento das características da empresa estudada, apresentado no item 4.1. Na sequência, o segundo objetivo, desenvolver o algoritmo de otimização, também foi alcançado, tendo sua lógica de funcionamento detalhadamente explicada, conforme o item 4.3.3.

Posteriormente, o trabalho focou no desenvolvimento da aplicação. O terceiro objetivo, criar uma interface para cadastro e edição de regras de sequenciamento foi concretizado e descrito no item 4.3.1, onde, apresenta-se o detalhamento da interface de gerenciamento das restrições operacionais. Da mesma forma, o quarto objetivo, desenvolver interface para execução do sequenciamento, foi atingido com a implementação de uma interface gráfica para submissão de dados, conforme explicado no item 4.3.2.

Por fim, a fase de validação da ferramenta também foi concluída. O quinto objetivo, comparar as restrições geradas pelos sequenciamentos manuais com os gerados pela aplicação, foi realizado, expondo resultados que comprovam a melhoria no atendimento às restrições conforme apresentado no item 4.4. O sexto e último objetivo, mensurar o tempo de processamento do sistema para compará-los com o tempo médio despendido pelos analistas, também foi atingido, com a análise comparativa apresentada no mesmo item, que validou a expressiva economia de tempo. Com isso, conclui-se que todos os objetivos estabelecidos para esta pesquisa foram cumpridos, contribuindo para o fechamento adequado do objetivo geral.

Dessa forma, a adoção da aplicação *web* se apresenta como uma solução eficaz para os desafios de sequenciamento da empresa estudada, permitindo que a organização otimize seus recursos e melhore a eficiência operacional em processos complexos e essenciais. A implementação de tecnologias como esta, se torna uma estratégia indispensável para aprimorar os processos produtivos e garantir a sustentabilidade operacional.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se a evolução da ferramenta através da integração com Grande Modelos de linguagem (LLMs). Essa integração poderia permitir que os analistas de PCP interagissem com o sistema de otimização por meio de linguagem natural, solicitando sequenciamentos, realizando simulações de cenários e recebendo justificativas claras sobre as decisões do algoritmo. Além disso, um LLM poderia ser treinado para interpretar novas restrições de produção a partir de documentos técnicos ou *e-mails*, automatizando o cadastro de regras e tornando a aplicação ainda mais dinâmica e inteligente.

REFERÊNCIAS

- AGUILAR, L. J. **Programação em C ++**. 2. ed. Porto Alegre: AMGH, 2008. Disponível em: < <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788580550269/> >. Acesso em: 18 Mar. 2025.
- ALVES, W. P. **Java para Web - Desenvolvimento de Aplicações**. E-book. Rio de Janeiro: Érica, 2015. Disponível em: < <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788536519357/> >. Acesso em: 18 Mar. 2025.
- ARUNDEL, J.; DOMINGUS, J. **Cloud Native DevOps with Kubernetes**. 1. ed. Sebastopol: O'Reilly Media, 2019.
- CORMEN, T. H.; et al. **Algoritmos**. 4. ed. Rio de Janeiro: GEN LTC, 2024. Disponível em: < <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788595159914/> >. Acesso em: 11 Mar. 2025.
- CRESWELL, J. W.; CRESWELL, J. D. **Projeto de pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto**. 5 ed. Porto Alegre: Penso, 2021. Disponível em: < <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9786581334192/> >. Acesso em: 21 jun. 2025.
- DATABRICKS. **Compact Guide to Large Language Models**. E-book. 2024. Disponível em: < <https://www.databricks.com/resources/ebook/tap-full-potential-lm> >. Acesso em: 5 Abr. 2025
- DATABRICKS. **What is Databricks? Databricks Documentation**, 2025. Disponível em: < <https://docs.databricks.com/aws/en/introduction/> >. Acesso em: 29 de Mar. de 2025.
- DEO, R. C. *Machine learning in medicine. Circulation*, Dallas, 2015, v. 132, n. 20, 17 novembro de 2015. **Basic Science for Clinicians**, p. 1920-1930.
- GENDREAU, M.; POTVIN, J. **Tabu Search**. In: BURKE, E. K.; KENDALL, G. (Ed.). *Search Methodologies: Introductory Tutorials in Optimization and Decision Support Techniques*. New York: Springer, 2005.
- GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 7 ed. Rio de Janeiro: Atlas, 2022. ISBN 9786559771653. Disponível em: < <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9786559771653/> >. Acesso em: 16 nov. 2024.
- GIROTTI, L. J.; NISHIMURA V. S.; MESQUITA M. A. **Simulação em planilhas para programação de ordens de produção em sistemas job shop**. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 31, 2011, Belo Horizonte, Anais...Minas Gerais: ENEGEP, 2011.
- HILLIER, FREDERICK S.; LIEBERMAN, GERALD J. **Introdução à pesquisa operacional**. 9. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. E-book. p.32. ISBN 9788580551198. Disponível em: <

<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788580551198/>.> Acesso em: 03 Nov. 2025.

HUYEN, C. **Designing Machine Learning Systems: An Iterative Process for Production-Ready Applications**. Sebastopol: O'Reilly Media, 2022.

KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. **Redes de computadores e a internet: uma abordagem top-down**. 6. ed. Pearson, 2013.

LAKATOS, E. M. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 9. ed. Rio de Janeiro: Atlas, 2021. ISBN 9788597026580. Disponível em: <<https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788597026580/>>. Acesso em: 21 Out. 2025.

MORALES, D. R.; ROMEIJN, H. E. **The Generalized Assignment Problem and Extensions**. In: DU, Ding-Zhu; PARDALOS, Panos M. (Ed.). *Handbook of Combinatorial Optimization* (Vol. 5). Norwell, MA: Kluwer Academic Publishers, 2004.

OKAMURA, K.; YAMASHINA, H. *A heuristic algorithm for the assembly line model-mix sequencing problem to minimize the risk of stopping the conveyor*. **International Journal of Production Research**, Londres, v. 17, n. 3, 1979. p. 233-247.

PIVA JR., D.; ENGELBRECHT, A. de M.; NAKAMITI, G. S.; BIANCHI. **Algoritmos e Programação de Computadores**. E-book. 2. ed. Rio de Janeiro: GEN LTC, 2019. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788595150508/>>. Acesso em: 11 Mar. 2025.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. de. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

RIBEIRO, V.; CORDEIRO, N. H. Marques. Sequenciamento da produção: uma proposta para o sistema *make to order*. **Produção Online**, Florianópolis, SC, v. 20, n. 2, p. 720-746, 2020.

RUSSELL, S.; NORVIG, P. **Artificial Intelligence: A Modern Approach**. 3 ed. Pearson, 2009.

RUSSOMANO, V. H. **Planejamento e controle da produção**. 6. ed. rev. São Paulo: Pioneira, 2000.

SANTOS, M. G.; SARAIVA, M. O.; FÁTIMA, P. G. **Linguagem de programação**. E-book. Porto Alegre: SAGAH, 2018. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788595024984/>>. Acesso em: 18 Mar. 2025.

SILVA, F. M.; et al. **Inteligência artificial**. E-book. Porto Alegre: SAGAH, 2018. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788595029392/>>. Acesso em: 5 Abr. 2025.

SLACK, N.; BRANDON-JONES, A.; BURGESS, N. **Administração da Produção.** E-book. 10. ed. Rio de Janeiro: Atlas, 2023. Disponível em: <<https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9786559775187/>>. Acesso em: 24 Mai. 2025.

TUBINO, D. F. **Planejamento e Controle da Produção:** Teoria e Prática. 3 ed. Rio de Janeiro: Atlas, 2017.

VISCARDI FILHO, M.; et al. **Better fit e busca tabu:** Uma otimização para o apoio ao combate. Anais do Congresso de Iniciação Científica do ITA, São José dos Campos, 2023. p. 007-012. ISSN 1983-7402.

WATANABE, M.; IDA, K.; GEN, M. *A genetic algorithm with modified crossover operator and search area adaptation for the job-shop scheduling problem.* **Computer e Industrial Engineering**, n.48 p. 743-752, 2005.

YANO, C. A.; RACHAMADUGU, R. *Sequencing to minimize work overload in assembly lines with product options.* **Management Science**, Maryland, v. 37, n. 5, maio de 1991. p. 572-586.

**APÊNDICE A - RESTRIÇÕES POR SEMANA DE PRODUÇÃO PARA FAMÍLIA Z
(EXECUÇÃO MANUAL)**

| SEMANA DE PRODUÇÃO | PRODUTO 6 / 7 | PRODUTO 1 - 2 / 6 - 7 | CLASSE COM S | O1 | O2 | O3 | O4 |
|--------------------|---------------|-----------------------|--------------|----|----|----|----|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 1 | 6 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 3 | 3 | 1 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 1 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 12 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 | 2 | 0 |
| 21 | 0 | 0 | 0 | 4 | 2 | 10 | 0 |
| 22 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 4 | 0 |
| 23 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 4 | 0 |
| 24 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 3 | 0 |
| 25 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 26 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 27 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| 28 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 29 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| 30 | 0 | 0 | 1 | 5 | 0 | 4 | 0 |
| 31 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 |
| 32 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 33 | 0 | 1 | 3 | 2 | 1 | 5 | 0 |
| 34 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 35 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 36 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 | 5 | 0 |
| 37 | 2 | 8 | 0 | 6 | 9 | 6 | 0 |
| 38 | 0 | 5 | 0 | 6 | 1 | 9 | 0 |
| 39 | 0 | 14 | 0 | 0 | 1 | 9 | 0 |
| 40 | 0 | 0 | 1 | 15 | 2 | 13 | 0 |
| 41 | 0 | 2 | 0 | 7 | 0 | 11 | 0 |
| 42 | 0 | 1 | 4 | 5 | 7 | 18 | 0 |
| 43 | 0 | 4 | 2 | 2 | 9 | 13 | 0 |
| 44 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 45 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 0 | 0 |

| | | | | | | | |
|----|---|---|---|---|---|---|---|
| 46 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 47 | 0 | 0 | 1 | 2 | 2 | 0 | 0 |
| 48 | 0 | 0 | 1 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| 49 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| 50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 51 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 |

Fonte: Autor (2025).

APÊNDICE B - RESTRIÇÕES POR SEMANA DE PRODUÇÃO PARA FAMÍLIA Z (RESULTADO DO SISTEMA)

| SEMANA DE PRODUÇÃO | PRODUTO 6 / 7 | PRODUTO 1 - 2 / 6 - 7 | CLASSE COM S | O1 | O2 | O3 | O4 |
|--------------------|---------------|-----------------------|--------------|----|----|----|----|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| 21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 0 |
| 22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 0 |
| 23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 0 |
| 24 | 0 | 0 | 0 | 6 | 0 | 7 | 0 |
| 25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| 26 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 27 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 0 |
| 28 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 |
| 29 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 |
| 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 0 |
| 31 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| 32 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 |
| 33 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 9 | 0 |
| 34 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 |
| 35 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 |
| 36 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 |
| 37 | 0 | 3 | 0 | 3 | 0 | 3 | 0 |
| 38 | 0 | 8 | 0 | 6 | 0 | 10 | 0 |
| 39 | 0 | 11 | 0 | 0 | 0 | 10 | 0 |
| 40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| 41 | 0 | 0 | 0 | 8 | 0 | 12 | 0 |
| 42 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 15 | 0 |
| 43 | 0 | 5 | 0 | 2 | 0 | 12 | 0 |
| 44 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 45 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| | | | | | | | |
|----|---|---|---|---|---|---|---|
| 46 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 47 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 48 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 49 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 51 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Fonte: Autor (2025)

**APÊNDICE C - RESTRIÇÕES POR SEMANA DE PRODUÇÃO PARA FAMÍLIA
W (EXECUÇÃO MANUAL)**

| SEMANA DE PRODUÇÃO | PRODUTO 25 / 26 | CLASSE M | CLASSE M / CLASSE L | CLASSE L | OPCIONAIS |
|--------------------|-----------------|----------|---------------------|----------|-----------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 11 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 0 | 3 | 3 | 0 | 0 |
| 21 | 0 | 13 | 3 | 0 | 0 |
| 22 | 5 | 14 | 9 | 0 | 0 |
| 23 | 0 | 17 | 3 | 0 | 0 |
| 24 | 0 | 2 | 2 | 0 | 0 |
| 25 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 |
| 26 | 1 | 22 | 3 | 0 | 0 |
| 27 | 0 | 19 | 0 | 0 | 0 |
| 28 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| 29 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| 30 | 0 | 6 | 0 | 0 | 0 |
| 31 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 32 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| 33 | 1 | 2 | 1 | 0 | 0 |
| 34 | 0 | 6 | 0 | 0 | 0 |
| 35 | 0 | 6 | 2 | 0 | 0 |
| 36 | 1 | 3 | 1 | 0 | 0 |
| 37 | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 |
| 38 | 0 | 11 | 2 | 0 | 0 |
| 39 | 3 | 7 | 3 | 0 | 0 |
| 40 | 1 | 14 | 1 | 0 | 0 |
| 41 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 42 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| 43 | 4 | 5 | 4 | 0 | 0 |
| 44 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| | | | | | |
|----|---|---|---|---|---|
| 45 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 46 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 47 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 48 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 49 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 50 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| 51 | 5 | 9 | 0 | 0 | 0 |

Fonte: Autor (2025)

**APÊNDICE D - RESTRIÇÕES POR SEMANA DE PRODUÇÃO PARA FAMÍLIA
W (RESULTADO DO SISTEMA)**

| SEMANA DE PRODUÇÃO | PRODUTO 25 / 26 | CLASSE M | CLASSE M / CLASSE L | CLASSE L | OPCIONAIS |
|--------------------|-----------------|----------|---------------------|----------|-----------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 21 | 0 | 7 | 0 | 0 | 0 |
| 22 | 0 | 5 | 0 | 8 | 0 |
| 23 | 0 | 14 | 0 | 1 | 0 |
| 24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 26 | 0 | 16 | 0 | 2 | 0 |
| 27 | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 |
| 28 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 29 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 31 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 32 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 33 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 34 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 35 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 36 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 37 | 0 | 9 | 0 | 0 | 0 |
| 38 | 0 | 11 | 0 | 0 | 0 |
| 39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 41 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 42 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 43 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| | | | | | |
|----|---|---|---|---|---|
| 44 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 45 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 46 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 47 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 48 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 49 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 51 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 |

Fonte: Autor (2025)