

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

GABRIEL ROBERTO COSMA

Análise do Sequenciamento Job Shop no Gargalo Produtivo: Estudo de Caso em uma
Empresa do Setor Metalúrgico voltado à Indústria Papeleira

São Carlos
2025

GABRIEL ROBERTO COSMA

ANÁLISE DO SEQUENCIAMENTO JOB SHOP NO GARGALO PRODUTIVO: Estudo de
Caso em uma Empresa do Setor Metalúrgico voltado à Indústria Papeleira

Monografia apresentada ao Curso de
Engenharia de Produção da Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Orientador(a): Prof. Dr. Marcelo Seido Nagano

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos

2025

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

C834a Cosma, Gabriel Roberto
 Análise do Sequenciamento Job Shop no Gargalo
 Produtivo: Estudo de Caso em uma Empresa do Setor
 Metalúrgico voltado à Indústria Papeleira / Gabriel
 Roberto Cosma; orientador Marcelo Seido Nagano. São
 Carlos, 2025.

 Monografia (Graduação em Engenharia de
 Produção) -- Escola de Engenharia de São Carlos da
 Universidade de São Paulo, 2025.

 1. Job Shop. 2. Planejamento e Controle da
 Produção. 3. Gargalo Produtivo. 4. Unidade Padrão. 5.
 Eficiência Operacional. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Gabriel Roberto Cosma
Título do TCC: ANÁLISE DO SEQUENCIAMENTO JOB SHOP NO GARGALO PRODUTIVO: Estudo de Caso em uma Empresa do Setor Metalúrgico voltado à Indústria Papeleira
Data de defesa: 09/12/2025

Comissão Julgadora	Resultado
Professor Doutor Marcelo Seido Nagano (orientador)	Aprovado
Instituição: EESC - SEP	
Doutor Fernando Luis Rossi	Aprovado
Instituição: IFSP - Jundiai - Gestão	
Pesquisador Christian Eric Barrantes Briceño	Aprovado
Instituição: EESC - SEP	

Presidente da Banca: **Professor Doutor Marcelo Seido Nagano**

*Este trabalho é dedicado ao meu avô Claudine,
que me ensinou a ler e, mais do que isso, a enxergar
o mundo com curiosidade.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço profundamente aos meus pais, Fábio e Andreia, pelo apoio, incentivo e coragem que sempre depositaram em mim, tornando possível cada passo desta trajetória. Estendo meu agradecimento à minha madrastra, Meire, pelo cuidado e presença constante. Aos meus irmãos — Gabriele, Isabele, Beatriz e Daniel — agradeço pelas alegrias e pelo companheirismo que sempre iluminaram meu caminho. Às minhas avós, Antônia e Neuza, deixo meu carinho e reconhecimento pela sabedoria e pelo acolhimento de sempre.

Ao meu orientador, prof. Marcelo Seido Nagano, registro meu sincero agradecimento pela orientação, pela confiança e pela oportunidade de aprendizado. Estendo este agradecimento aos professores e colaboradores da Escola de Engenharia de São Carlos, que contribuíram diretamente para a minha formação acadêmica e pessoal.

Aos amigos que caminharam comigo durante a graduação, agradeço pelo suporte mútuo, pela convivência diária e pelas experiências que tornaram a jornada mais leve. Em especial, agradeço ao João, colega de sala e companheiro de República, cuja parceria marcou de forma significativa minha trajetória acadêmica. À República Coideloco, deixo meu reconhecimento por ter sido meu lar em São Carlos e por ter me proporcionado amizades que levarei para toda a vida.

Aos amigos da PCH Areosa, agradeço pelas vivências compartilhadas e por terem sido minha família em Portugal, construindo memórias que guardarei com enorme carinho. Em especial, agradeço ao Arthur, cuja amizade e parceria tornaram essa experiência ainda mais marcante.

Agradeço também aos colegas e gestores do meu ambiente profissional, que contribuíram com aprendizados importantes ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, deixo meu agradecimento especial à minha namorada, Larissa, pelo apoio incondicional, pela compreensão e pela paciência durante todos os momentos desta jornada. Sua presença tornou mais leves os desafios e mais significativas as conquistas.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho se concretizasse — com apoio, amizade, incentivo ou simples presença — deixo minha sincera gratidão.

*“A mente que se abre a uma nova
ideia, jamais volta ao seu tamanho original”*
(Albert Einstein)

RESUMO

COSMA, G. R. **Análise do Sequenciamento Job Shop no Gargalo Produtivo**: Estudo de Caso em uma Empresa do Setor Metalúrgico voltado à Indústria Papeleira. 2025. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2025.

Este trabalho apresenta um estudo de caso desenvolvido em uma empresa do setor metalúrgico voltada à fabricação e reforma de componentes para máquinas de papel, cuja operação se caracteriza por um ambiente de produção do tipo Job Shop. O objetivo foi avaliar o impacto da padronização do sequenciamento no gargalo produtivo sobre a eficiência e a previsibilidade do planejamento, com foco na etapa de soldagem da linha de reparos de rotores. A metodologia envolveu a implementação de um modelo padronizado de programação do gargalo e a mensuração sistemática de indicadores de desempenho. Observou-se que a aderência ao plano aumentou de 61% para 89%, enquanto o volume de horas extras foi reduzido em aproximadamente 40%. Além desses resultados quantitativos, verificou-se uma melhoria qualitativa na organização do planejamento, na estabilidade do fluxo e na utilização da capacidade produtiva. O estudo demonstra o potencial da padronização do sequenciamento como ferramenta de melhoria contínua em ambientes de produção sob encomenda.

Palavras-Chaves: Job Shop; Planejamento e Controle da Produção; Gargalo Produtivo; Sequenciamento; Unidade Padrão; Eficiência Operacional.

ABSTRACT

COSMA, G. R. **Análise do Sequenciamento Job Shop no Gargalo Produtivo:** Estudo de Caso em uma Empresa do Setor Metalúrgico voltado à Indústria Papeleira. 2025. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2025.

This study presents a case study carried out in a metallurgical company dedicated to the manufacturing and refurbishment of components for paper machines, operating in a Job Shop production environment. The objective was to evaluate the impact of sequencing standardization at the production bottleneck on planning efficiency and predictability, with emphasis on the welding stage of the rotor repair line. The methodology involved the implementation of a standardized scheduling model for the bottleneck and the systematic measurement of performance indicators. Results showed that plan adherence increased from 61% to 89%, while overtime decreased by approximately 40%. In addition to these quantitative outcomes, qualitative improvements were observed in planning organization, production flow stability, and capacity utilization. The study demonstrates the potential of sequencing standardization as a continuous improvement tool in engineer-to-order manufacturing environments.

Keywords: Job Shop; Production Planning and Control; Bottleneck; Scheduling; Standard Unit; Operational Efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma simplificado do processo de reforma de rotores	37
Figura 2 - Mapa de Fluxo de Valor (VSM) simplificado do processo de reforma de rotores ..	38
Figura 3 - Aderência ao plano com destaque para o início da implementação da UP.....	47
Figura 4 - Aderência ao plano semanal antes da padronização (Semanas 38 a 49 de 2024)....	48
Figura 5 - Aderência ao plano – semanas W29.25 a W40.25 (período após implementação) .	48
Figura 6 - Horas extras antes da padronização (Semanas 28 a 40 de 2024).....	49
Figura 7 - Horas extras após a padronização (Semanas 28 a 40 de 2025)	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Aderência ao plano nas semanas iniciais de monitoramento (W38.24 a W49.24)..39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ETO	Engineer-to-Order
FIFO	First In, First Out
PCP	Planejamento e Controle da Produção
SFM	Shop Floor Management
SPT	Shortest Processing Time
EDD	Earliest Due Date
TOC	Theory of Constraints (Teoria das Restrições)
UP	Unidade Padrão
VSM	Value Stream Mapping (Mapa de Fluxo de Valor)
WIP	Work in Process (Trabalho em Processo)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
1.1 Contextualização	25
1.2 Problema de Pesquisa	27
1.3 Objetivos.....	27
1.4 Justificativa.....	28
1.5 Estrutura do Trabalho	29
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	30
2.1 Planejamento e Sequenciamento em Ambientes Job Shop	30
2.2 Gargalo e Teoria das Restrições	31
2.3 Unidade Padrão como Ferramenta de Normalização da Carga	32
2.4 Indicadores de Desempenho e Controle Produtivo	33
2.5 Referenciais Práticos e Estudos Aplicados	34
3 DETALHAMENTO DO PROBLEMA	36
3.1 Caracterização da Empresa e do Processo Produtivo	36
3.2 Situação Inicial e Impactos do Problema	38
4 METODOLOGIA.....	41
4.1 Tipo de Pesquisa	41
4.2 Coleta e Análise de Dados	42
4.3 Critérios de Avaliação.....	42
4.4 Definição e Aplicação da Unidade Padrão	43
5 APLICAÇÃO DA SOLUÇÃO E RESULTADOS	45
5.1 Mudanças Implementadas	45
5.2 Resultados Obtidos	47
5.3 Discussão dos Resultados.....	50
6 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES	52
6.1 Síntese dos Resultados	52
6.2 Recomendações e Perspectivas Futuras	53
6.3 Limitações do Estudo	54
REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

A gestão da produção em ambientes sob encomenda apresenta desafios significativos ao planejamento, sequenciamento e o controle das ordens, especialmente em sistema do tipo Job Shop, marcados por elevada variabilidade e restrições de capacidade. Nesse contexto, este estudo analisa um caso em uma empresa do setor metalúrgico voltada à reforma e fabricação sob encomenda de componentes de máquinas de papel, com ênfase na linha de rotores. Identificou-se, nesse contexto, que o processo de soldagem constitui o principal gargalo produtivo, impactando diretamente a previsibilidade do planejamento, o cumprimento de prazos e a utilização da capacidade instalada.

Diante de um cenário inicial caracterizado por sequenciamento manual, baixa aderência ao plano e elevado volume de horas extras, propôs-se a padronização da programação no gargalo, utilizando o conceito de Unidade Padrão (UP) em associação ao Takt Time. A estrutura da pesquisa contempla: (i) contextualização do problema, (ii) revisão dos conceitos relacionados ao sequenciamento em ambientes Job Shop, à Teoria das Restrições (TOC) e aos princípios do pensamento Lean, (iii) descrição da metodologia adotada e (iv) análise comparativa de indicadores antes e após a padronização (aderência, lead time e horas extras). Com isso, busca-se demonstrar de forma aplicada como a padronização no gargalo pode ampliar a eficiência e previsibilidade do planejamento em sistemas produtivos sob encomenda.

1.1 Contextualização

A empresa foco deste estudo opera no setor metalúrgico, com especialização na fabricação e manutenção de equipamentos industriais utilizados em máquinas de papel. Sua atuação está inserida em um ambiente Engineer-to-Order (ETO), em que a produção ocorre sob demanda específica de clientes. Essa configuração acarreta uma elevada diversidade de produtos e rotas de fabricação, dificultando a padronização operacional e o planejamento da capacidade produtiva.

O fluxo de produção da planta abrange diferentes etapas, como usinagem, soldagem e montagem. Dentre elas, a soldagem se destaca como o principal gargalo, especialmente na linha de rotores — componente com maior peso no portfólio da empresa. O setor conta com seis posicionadores de solda, sendo três são dedicados exclusivamente à linha de rotores, e dispõe de uma equipe distribuída em dois turnos.

A principal limitação do setor reside nos longos tempos de processamento, associados à natureza do serviço de reforma, que frequentemente exige recuperação de material e correção de imperfeições. Essa variabilidade amplia o tempo de ciclo das operações e compromete a capacidade efetiva do recurso.

Antes da implementação da proposta de padronização, o sequenciamento das ordens era feito manualmente, com base na experiência dos líderes de produção e nas discussões realizadas nas reuniões diárias. As decisões eram guiadas por prazos de entrega, demandas emergenciais e especificidades dos clientes, resultando em um ambiente pouco previsível, com baixa aderência ao plano, elevada necessidade de replanejamentos e acúmulo de horas extras.

A partir do monitoramento sistemático da execução no gargalo, evidenciou-se a necessidade de padronizar o sequenciamento no setor de soldagem. Com isso, foi introduzido o conceito de Unidade Padrão, estabelecido a partir do menor tempo de processamento observado em operações de solda em rotores, servindo como referência para nivelar e organizar a carga de trabalho.

A adoção da UP, aliada ao Takt Time da linha, possibilitou maior controle do ritmo operacional e o balanceamento das ordens de fabricação, reduzindo o tempo dedicado ao replanejamento semanal e elevando a aderência ao plano. Inicialmente aplicada à linha de rotores, a metodologia demonstrou potencial de replicação para outras famílias de produtos, contribuindo para uma gestão mais estruturada e orientada ao desempenho do recurso restritivo.

Contudo, observou-se que a aplicação de heurísticas tradicionais de sequenciamento — como FIFO, SPT ou EDD — não se mostrava adequada ao contexto da empresa, uma vez que essas abordagens pressupõem estabilidade nos tempos de processamento, roteiros padronizados e possibilidade de alocação flexível entre recursos, condições que não se verificam em um ambiente Job Shop de reparos. No caso específico da linha de rotores, a operação de solda caracteriza-se por processamento contínuo e indivisível, o que impede o fracionamento das peças entre posicionadores e limita a eficácia de métodos convencionais. Essa particularidade reforça a necessidade de um modelo simples, padronizado e alinhado à restrição física do sistema, capaz de oferecer previsibilidade ao planejamento sem depender de algoritmos complexos ou de dados altamente confiáveis.

1.2 Problema de Pesquisa

O sistema produtivo analisado caracteriza-se por um modelo Job Shop, no qual diferentes produtos seguem rotas distintas conforme suas especificações. Essa condição impõe desafios substanciais ao planejamento e sequenciamento da produção, sobretudo em ambientes com recursos compartilhados e gargalos bem definidos, como ocorre na etapa de solda da empresa em estudo.

Antes da padronização, a programação era conduzida de maneira empírica, via planilhas atualizadas semanalmente e orientadas pelo julgamento da equipe de Planejamento e Controle da Produção (PCP). As prioridades eram ajustadas rotineiramente nas reuniões de acompanhamento (SFM), com base em prazos, urgências e demandas específicas, o que resultava em baixa aderência ao plano — em torno de 60% — e elevada interferência da supervisão, exigindo replanejamentos constantes.

Essa instabilidade impactava diretamente os custos operacionais, o lead time dos pedidos e a previsibilidade do fluxo. No caso dos rotores, os prazos de entrega variavam entre oito e dez semanas, e as operações de soldagem apresentavam ampla variação de tempo de execução, reflexo da diversidade de modelos e tipos de reparo existentes na linha.

Nesse contexto, identificou-se como problema central a ausência de um modelo padronizado de sequenciamento no gargalo de solda, comprometendo a previsibilidade do sistema e a eficácia do planejamento. Assim, a pesquisa propõe analisar de que forma a padronização baseada no conceito de Unidade Padrão, integrada ao Takt Time, pode contribuir para aumentar a aderência ao plano, reduzir a variabilidade do lead time e diminuir o volume de horas extras em um ambiente Job Shop.

1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho é avaliar o impacto da padronização do sequenciamento no gargalo produtivo sobre a eficiência e a previsibilidade do planejamento em um ambiente de manufatura sob encomenda, configurado como Job Shop. O estudo busca compreender como a aplicação da UP, associada ao Takt Time, contribui para melhorar o desempenho operacional e estabilizar o fluxo produtivo.

Para alcançar tal objetivo, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Analisar o cenário inicial do planejamento e sequenciamento, identificando os principais pontos de variabilidade e ausência de padronização na etapa de soldagem;
- Implementar a metodologia de sequenciamento baseada em Unidades Padrão, estruturando a programação do gargalo de acordo com o ritmo definido pelo Takt Time;
- Avaliar o impacto da padronização nos principais indicadores de desempenho, com foco na aderência ao plano, no lead time e na redução de horas extras;
- Comparar os resultados obtidos antes e após a implementação, verificando a efetividade da proposta na melhoria da gestão do sistema produtivo.

1.4 Justificativa

A relevância deste estudo reside na aplicabilidade prática de suas contribuições para o planejamento e controle da produção em ambientes Job Shop, caracterizados por alta variabilidade e complexidade. A ausência de padronização no sequenciamento, recorrente nesse tipo de sistema, gera instabilidade operacional, aumento de custos e comprometimento da previsibilidade — especialmente em empresas do setor metalúrgico que operam sob encomenda.

No caso analisado, a padronização do sequenciamento com base na Unidade Padrão demonstrou-se eficaz na estabilização do fluxo e na melhoria do desempenho no gargalo produtivo. Os resultados obtidos, como o aumento da aderência ao plano, a redução de horas extras e a diminuição da variabilidade nos prazos, refletem ganhos operacionais concretos e reforçam a importância de metodologias simples e mensuráveis para apoiar a tomada de decisão no PCP.

Sob a ótica acadêmica, a pesquisa se destaca pela integração entre os fundamentos da Teoria das Restrições, da Produção Enxuta (Lean) e do Job Shop Scheduling, aplicados de forma prática a um ambiente real. Conceitos como Takt Time, WIP e lead time são operacionalizados em um estudo que alia teoria e prática, contribuindo para o debate sobre gestão de gargalos e melhoria contínua em sistemas sob demanda.

Dessa forma, o trabalho oferece uma contribuição valiosa tanto para profissionais da área quanto para pesquisadores, ao apresentar uma alternativa viável de padronização e controle em contextos produtivos com baixa previsibilidade.

1.5 Estrutura do Trabalho

A estrutura deste trabalho foi organizada de maneira a proporcionar uma leitura lógica, fluida e alinhada aos objetivos da pesquisa, combinando referencial teórico, desenvolvimento prático e análise crítica dos resultados.

O Capítulo 1 apresenta a introdução ao tema, contextualizando o problema, explicitando os objetivos da pesquisa, sua justificativa e a estrutura do trabalho.

O Capítulo 2 reúne os principais fundamentos teóricos, abordando conceitos de Job Shop Scheduling, Teoria das Restrições, Produção Enxuta e os indicadores utilizados na análise.

O Capítulo 3 detalha o ambiente produtivo da empresa, o processo de fabricação dos rotores, os desafios enfrentados no planejamento inicial e os impactos da ausência de padronização no gargalo.

O Capítulo 4 descreve a metodologia empregada, incluindo o tipo de pesquisa, os métodos de coleta e análise dos dados, os critérios de avaliação e as limitações do estudo.

O Capítulo 5 apresenta as ações implementadas, os resultados obtidos e a comparação entre o desempenho antes e após a aplicação da metodologia de padronização do sequenciamento.

Por fim, o Capítulo 6 traz as conclusões da pesquisa, recomendações para aplicação futura da metodologia e reflexões sobre os limites e possibilidades do estudo.

Essa organização visa assegurar coerência entre os capítulos, fortalecer o vínculo entre teoria e prática, e facilitar a compreensão dos impactos da padronização no desempenho de sistemas produtivos Job Shop.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos que sustentam a pesquisa. Inicialmente, abordam-se os conceitos de Planejamento e Controle da Produção e o sequenciamento em ambientes de manufatura do tipo Job Shop. Em seguida, exploram-se os princípios da Teoria das Restrições, bem como elementos da Produção Enxuta que favorecem a estabilização do fluxo produtivo, como Takt Time e WIP. Também é detalhado o conceito de UP, fundamental para a proposta desenvolvida. Por fim, são discutidos os principais indicadores de desempenho utilizados no estudo, bem como referências práticas que conectam os conceitos abordados ao contexto empírico analisado.

2.1 Planejamento e Sequenciamento em Ambientes Job Shop

O Planejamento e Controle da Produção representa um conjunto estruturado de atividades que visa coordenar os recursos disponíveis para atender à demanda de maneira eficaz, conciliando prazos, capacidade produtiva e custos operacionais. Segundo Corrêa e Corrêa (2022), o PCP envolve a tomada de decisões em diferentes níveis — estratégico, tático e operacional — com o intuito de sincronizar o fluxo de materiais e informações ao longo do processo produtivo.

Em ambientes industriais complexos, especialmente aqueles com produção sob encomenda, a previsibilidade e a estabilidade do sistema tornam-se elementos críticos. Esse é o caso dos sistemas do tipo Job Shop, nos quais se observa alta diversidade de produtos e rotas de fabricação distintas. Cada item pode seguir um percurso específico entre os recursos produtivos, exigindo decisões frequentes de priorização e reprogramação (Tubino, 2017). Em contrapartida, sistemas como Flow Shop, com fluxos contínuos e padronizados, oferecem maior previsibilidade e facilitam o controle da capacidade.

No ambiente ETO, como o da empresa estudada, a complexidade aumenta, pois a produção se ajusta às especificações individuais de cada cliente. Isso impõe desafios adicionais ao PCP, cujo papel se amplia para além da execução, assumindo caráter estratégico no controle das variabilidades do sistema.

O sequenciamento da produção — ou scheduling — consiste na definição da ordem de execução das operações, considerando critérios como prazos, tempos de processamento, prioridades de entrega e disponibilidade de recursos. De acordo com Pacheco e Santoro (1999),

trata-se de um dos problemas mais complexos da Engenharia de Produção, especialmente em sistemas Job Shop, dada a multiplicidade de variáveis e restrições simultâneas.

Para lidar com tal complexidade, são frequentemente empregadas heurísticas clássicas de priorização, como SPT (Shortest Processing Time), EDD (Earliest Due Date) e FIFO (First In, First Out). Embora úteis em muitos contextos, essas heurísticas apresentam limitações importantes em ambientes sob encomenda:

- **SPT** favorece peças mais rápidas, prejudicando itens urgentes;
- **EDD** funciona bem quando prazos são estáveis, o que não ocorre em reparos industriais;
- **FIFO** tende a falhar quando a variabilidade de tempos de processamento é muito alta ou quando há necessidade frequente de reprogramação comercial.

No caso específico deste estudo, a empresa adotava uma lógica próxima à FIFO, embora, na prática, as prioridades fossem alteradas frequentemente, conforme urgências e intervenções gerenciais. Esse comportamento refletia a ausência de um sistema de sequenciamento formal, comprometendo a previsibilidade e exigindo grande esforço do PCP com replanejamentos constantes. A busca por estabilidade e previsibilidade, mesmo em meio à variabilidade, reforça a necessidade de modelos de sequenciamento minimamente padronizados, que permitam alinhar planejamento e execução, especialmente em etapas críticas como o gargalo produtivo.

2.2 Gargalo e Teoria das Restrições

O desempenho de qualquer sistema produtivo está diretamente condicionado ao seu recurso restritivo, ou seja, aquele que limita a vazão total do processo. Esse ponto crítico, comumente chamado de gargalo, define o ritmo máximo de produção, sendo o principal foco de controle para melhoria do desempenho sistêmico.

Segundo Corrêa e Corrêa (2022), o gargalo pode assumir natureza física — relacionada à capacidade dos recursos — ou gerencial — decorrente de políticas, regras ou práticas inadequadas de planejamento. No contexto da empresa estudada, a restrição é física e está localizada no processo de soldagem da linha de rotores, etapa cujos tempos de ciclo são substancialmente maiores em relação aos demais processos, como usinagem e montagem. Além disso, a operação contínua e a impossibilidade de dividir um mesmo rotor entre diferentes máquinas agravam a rigidez da restrição.

A Teoria das Restrições, proposta por Goldratt e Cox (2007), parte do princípio de que todo sistema possui pelo menos uma limitação que determina seu desempenho global. A gestão eficaz, portanto, deve identificar essa restrição, subordinando os demais recursos ao seu ritmo e buscando operá-la de forma contínua, estável e sem interrupções. A TOC enfatiza o aumento do throughput — ou geração de valor — por meio do uso otimizado da restrição, evitando esforços dispersos em melhorias locais que não impactam o desempenho do sistema como um todo.

Em ambientes como o Job Shop, onde a variabilidade de roteiros e tempos de processamento é elevada, o controle do gargalo torna-se ainda mais crítico. A integração entre os princípios da TOC e da Produção Enxuta oferece uma abordagem complementar: enquanto a TOC direciona o foco para o gargalo, o Lean propõe a eliminação de desperdícios e o nivelamento do fluxo. Essa sinergia é especialmente poderosa quando aplicada a recursos restritivos, permitindo controlar o ritmo do sistema com base no Takt Time e reduzir estoques intermediários, aumentando a previsibilidade do planejamento (Womack; Jones, 2004).

Na empresa estudada, a adoção de uma lógica de programação baseada na restrição, aliada à padronização do sequenciamento, foi determinante para estabilizar o fluxo da linha de rotores, reafirmando a centralidade do gargalo na gestão operacional eficiente.

2.3 Unidade Padrão como Ferramenta de Normalização da Carga

A Unidade Padrão adotada neste estudo fundamenta-se na proposição de Votto e Fernandes (2014), que defendem a padronização da carga no gargalo como mecanismo central para estabilizar o fluxo em ambientes Engineer-to-Order. Diferentemente do tempo padrão tradicional da cronoanálise — que descreve tempos elementares de operação — a UP atua como uma unidade agregada, representando um bloco mínimo de capacidade do recurso crítico.

No caso da empresa analisada, a UP foi definida como 16 horas, equivalentes ao menor tempo de processamento observado na solda de rotores. Essa padronização permitiu converter tempos muito distintos de soldagem em unidades equivalentes, facilitando o nivelamento semanal e fortalecendo o uso de heurísticas simples como FIFO. Com isso, tornou-se possível estabelecer uma carga semanal objetiva para o gargalo, reduzindo interferências e proporcionando maior previsibilidade ao sequenciamento.

A UP, portanto, é um elemento estruturante da metodologia, pois normaliza a variabilidade dos tempos de soldagem, simplifica o processo de planejamento, permite alinhar a carga ao Takt Time definido para a linha de rotores, reduz a subjetividade presente nas decisões de sequenciamento e fortalece a disciplina de execução no recurso restritivo.

2.4 Indicadores de Desempenho e Controle Produtivo

A utilização de indicadores de desempenho é fundamental para o controle e a melhoria contínua dos processos produtivos. Em ambientes sob encomenda, nos quais a variabilidade é elevada, os indicadores tornam-se ferramentas essenciais para diagnosticar desvios, orientar ações corretivas e embasar decisões de planejamento.

Entre os indicadores mais relevantes estão:

Lead Time: Representa o tempo total decorrido entre o início e o fim de um processo produtivo. Em ambientes instáveis, como o estudado, o lead time sofre grande influência da variabilidade no gargalo. No caso da linha de rotores, esse tempo oscilava entre oito e dez semanas, comprometendo a confiabilidade dos prazos informados ao cliente.

Work in Process (WIP): Mede a quantidade de ordens em execução no sistema em determinado momento. Conforme Slack, Brandon-Jones e Burgess (2023), altos volumes de WIP indicam acúmulo e desbalanceamento, enquanto níveis muito baixos podem revelar subutilização de recursos. A estabilização do WIP após a padronização refletiu um controle mais eficaz do fluxo.

Aderência ao Plano: Avalia o quanto a produção realizada se aproxima do planejamento proposto. Trata-se de um indicador direto da qualidade do planejamento e da estabilidade do sistema. Na empresa em estudo, esse indicador foi adotado como principal métrica de desempenho do PCP, permitindo mensurar de forma objetiva os ganhos com a padronização.

Horas Extras: Funcionam como um indicativo indireto de instabilidade. Um sistema previsível tende a operar com menos necessidade de ajustes emergenciais. A redução expressiva nas horas extras após a implantação do novo modelo de sequenciamento reforça sua efetividade.

O monitoramento desses indicadores, de forma integrada, oferece uma visão ampla da performance do sistema produtivo. No presente estudo, sua análise comparativa — antes e após

a implementação da metodologia — foi essencial para demonstrar os benefícios da padronização no gargalo.

2.5 Referenciais Práticos e Estudos Aplicados

A literatura apresenta uma diversidade de abordagens para o problema do sequenciamento em ambientes Job Shop, com foco em métodos que aumentem a previsibilidade e reduzam a variabilidade dos sistemas. Embora existam modelos matemáticos avançados para resolver tais problemas, muitos estudos destacam suas limitações em contextos industriais reais, especialmente quando se trata de ambientes sob encomenda.

Portilho (2007), por exemplo, analisa a aplicação de heurísticas e modelos de otimização em indústrias metalúrgicas, concluindo que, embora eficazes teoricamente, tais métodos enfrentam dificuldades de implementação prática devido à natureza dinâmica e instável dos processos. Morales e Ronconi (2015) reforçam essa constatação ao discutirem a complexidade combinatória das decisões de sequenciamento, especialmente em sistemas com múltiplos produtos e restrições simultâneas.

Dentre as abordagens aplicadas, destaca-se o trabalho de Votto e Fernandes (2014), que propuseram a integração entre Lean Production e Teoria das Restrições em indústrias Engineer-to-Order. Os autores desenvolveram um modelo de implantação conjunta baseado no uso do Takt Time e na definição de uma unidade padronizada de carga para o gargalo, permitindo estabilizar o fluxo produtivo e reduzir as oscilações decorrentes da variabilidade dos tempos de processamento.

Essa abordagem teórica serviu de referência direta para o presente estudo, especialmente na definição e utilização da UP. Ao converter diferentes tempos de processamento em unidades equivalentes, a UP possibilita normalizar a carga aplicada ao recurso restritivo e aumentar a robustez de heurísticas simples, como FIFO, que isoladamente não seriam suficientes para lidar com a variabilidade observada em ambientes Job Shop.

De modo geral, os estudos analisados convergem para a necessidade de soluções práticas e adaptadas ao contexto real das empresas. Modelos matemáticos sofisticados de scheduling, apesar de eficientes em condições controladas, enfrentam dificuldades de implementação em sistemas sob encomenda, caracterizados por prioridades mutáveis e elevada diversidade de roteiros. Nesse cenário, a combinação entre princípios da TOC, fundamentos do

Lean e mecanismos de padronização da carga — como a Unidade Padrão — apresenta-se como uma alternativa consistente para aumentar a estabilidade do fluxo e melhorar a eficiência do planejamento.

3 DETALHAMENTO DO PROBLEMA

Este capítulo tem por objetivo apresentar, de forma aprofundada, o contexto operacional da empresa analisada, evidenciando os fatores que motivaram a proposta de padronização do sequenciamento no gargalo produtivo. Inicialmente, descreve-se a estrutura do processo de fabricação, com foco na linha de rotores, produto de maior relevância no portfólio da organização. Em seguida, são discutidos os desafios enfrentados pelo setor de Planejamento e Controle da Produção, especialmente no que se refere à ausência de critérios sistematizados para o sequenciamento das ordens na etapa de soldagem — identificada como a principal restrição do sistema.

Com base nesse diagnóstico, são apresentados os impactos operacionais gerados pela falta de padronização, tais como baixa aderência ao plano, alto volume de horas extras e instabilidade no fluxo produtivo. Esses elementos justificam a adoção de uma metodologia específica de programação, orientada pela lógica de recursos restritivos, cuja aplicação prática será detalhada nos capítulos seguintes.

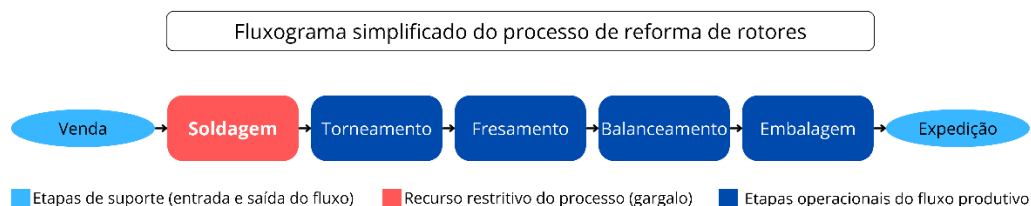
3.1 Caracterização da Empresa e do Processo Produtivo

A organização objeto deste estudo atua no setor metalúrgico, com foco na indústria papelreira, e tem como principal atividade a fabricação e a reforma de componentes industriais. Sua operação está inserida em um ambiente de produção sob encomenda, típico do modelo ETO, e classificado como Job Shop, devido à alta diversidade de produtos, à variabilidade nos roteiros de fabricação e à dificuldade de padronização dos processos.

O item de maior relevância no portfólio da empresa é o rotor, componente essencial para o funcionamento de máquinas de papel. Ao todo, foram mapeados 64 modelos distintos, agrupados em 25 padrões de produção. Apesar das similaridades entre eles, cada modelo apresenta especificidades técnicas que reforçam o caráter sob medida da operação. Essa diversidade acentua a complexidade do planejamento e controle da produção, exigindo uma abordagem personalizada para cada ordem.

As operações mais comuns nos diferentes roteiros de reforma incluem soldagem, torneamento, fresamento, balanceamento e embalagem. A Figura 1 apresenta um fluxograma simplificado que resume as etapas mais recorrentes no fluxo de reforma de rotores.

Figura 1 - Fluxograma simplificado do processo de reforma de rotores

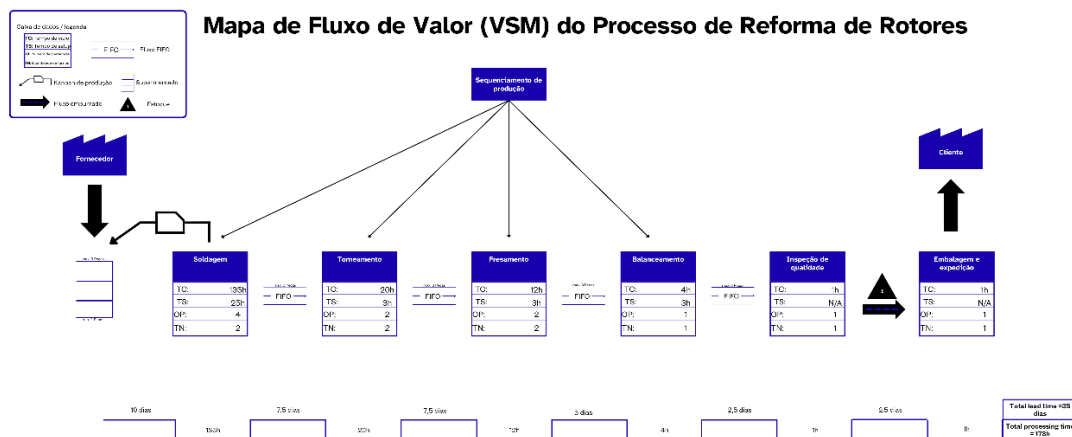


Fonte: Autoria própria (2025)

Dentre essas etapas, a soldagem foi identificada como o principal gargalo físico do processo. O setor dispõe de seis posicionadores, sendo três destinados prioritariamente à linha de rotores — embora, em casos específicos, os demais também possam ser utilizados. A principal limitação, entretanto, não se restringe à infraestrutura, mas à natureza contínua da soldagem, que impede o fracionamento de uma mesma peça entre diferentes máquinas. Assim, cada rotor permanece alocado em um único posicionador até a conclusão do serviço.

Além disso, o tempo necessário para a solda é altamente variável, oscilando entre 16 e 160 horas por peça, dependendo do modelo, do nível de desgaste e da extensão da recuperação necessária. Essa amplitude de tempos reforça o papel da soldagem como restrição produtiva e influencia diretamente a capacidade efetiva da linha. Para ilustrar a relação entre fluxos e tempos de processamento, a Figura 2 apresenta o Mapa de Fluxo de Valor (VSM) simplificado do processo.

Figura 2 - Mapa de Fluxo de Valor (VSM) simplificado do processo de reforma de rotores



Fonte: Autoria própria (2025)

Diante dessa realidade, o setor de solda foi definido como foco central das análises e intervenções propostas neste trabalho.

3.2 Situação Inicial e Impactos do Problema

Antes da implementação da metodologia de padronização, o planejamento e sequenciamento da produção eram conduzidos manualmente, por meio de planilhas eletrônicas. O plano semanal era elaborado e divulgado às segundas-feiras, servindo como base para a organização das atividades produtivas. As prioridades eram ajustadas nas reuniões diárias de SFM, com base em critérios como prazo de entrega, urgência e demandas específicas dos clientes.

No entanto, não havia um critério formal para o nivelamento da carga no gargalo. As decisões variavam conforme a percepção dos líderes e supervisores, o que resultava em instabilidade e baixa aderência ao plano. A média inicial de cumprimento do planejamento era de aproximadamente 60%, refletindo o desalinhamento entre o que foi programado e o que, de fato, era executado.

Para evidenciar tecnicamente essa instabilidade, a Tabela 1 apresenta o histórico real das doze primeiras semanas monitoradas (W38.24 a W49.24). A nomenclatura utilizada segue o padrão “WXX.AA”, em que W representa week (semana), XX indica o número sequencial da semana no ano e AA corresponde aos dois últimos dígitos do ano calendário. Assim, por exemplo, W38.24 refere-se à semana 38 do ano de 2024.

Tabela 1 - Aderência ao plano nas semanas iniciais de monitoramento (W38.24 a W49.24)

Semana	Horas Planejadas	Horas trabalhadas dentro do plano	Aderência ao plano
W38.24	1099	684	62%
W39.24	1438	889,4	62%
W40.24	1213,5	764,5	63%
W41.24	1170,5	578,4	49%
W42.24	1326	760	57%
W43.24	1232	754	61%
W44.24	1001	652	65%
W45.24	1129	704	62%
W46.24	1214	753	62%
W47.24	1123	629	56%
W48.24	1095	646	59%
W49.24	1039	675	65%

Fonte: Autoria própria (2025)

Os dados revelam um comportamento operacional irregular, com aderência ao plano variando entre aproximadamente 49% e 65%, reforçando a ausência de um método estruturado de sequenciamento e a necessidade de padronização no gargalo.

A necessidade constante de replanejamentos consumia tempo relevante do PCP e limitava sua atuação a uma lógica reativa, dificultando o controle da execução.

A interferência frequente da supervisão, por meio de alterações de prioridade ao longo da semana, agravava o cenário e reduzia ainda mais a previsibilidade. Como consequência, diversos impactos negativos foram identificados:

- Aumento do número de horas extras, empregadas como compensação para atrasos ou desequilíbrios de carga;
- Elevação dos custos operacionais e redução da eficiência da mão de obra;
- Lead time médio entre oito e dez semanas, com forte dispersão entre as ordens;
- Baixa previsibilidade entre etapas, dificultando o cumprimento dos prazos e a coordenação entre setores.

Os dados referentes ao cenário inicial foram extraídos das planilhas do PCP e consolidados em painéis interativos no Power BI. Esse processo permitiu uma análise quantitativa mais profunda da instabilidade operacional, evidenciando a necessidade de um modelo estruturado de programação para o gargalo.

A partir desse diagnóstico, foi concebida uma nova abordagem de sequenciamento com base na Unidade Padrão UP — definida como o menor tempo registrado em operações de soldagem de rotores. Essa métrica passou a ser associada ao Takt Time da linha, permitindo o nivelamento da carga no gargalo e melhorar a previsibilidade do sistema.

4METODOLOGIA

Este capítulo apresenta o delineamento metodológico adotado para condução da pesquisa. São descritos o tipo de investigação, os procedimentos de coleta e análise de dados, os critérios utilizados na avaliação dos resultados e as limitações observadas ao longo do estudo. A proposta metodológica foi concebida de modo a permitir uma análise sistemática dos efeitos da padronização do sequenciamento sobre o desempenho do gargalo produtivo, assegurando a coerência entre os objetivos da pesquisa e os resultados obtidos.

4.1 Tipo de Pesquisa

A presente investigação caracteriza-se como um estudo de caso aplicado, realizado em uma empresa metalúrgica com atuação voltada ao segmento papaleiro, tendo como foco analítico a linha de reforma de rotores. Trata-se de uma pesquisa de natureza descritiva, cujo objetivo principal é compreender o comportamento do sistema produtivo, especialmente no que se refere aos efeitos gerados pela ausência de um método formal de sequenciamento e à efetividade da metodologia proposta.

A abordagem adotada combina métodos quantitativos e qualitativos. A dimensão quantitativa está presente na análise dos indicadores de desempenho — como aderência ao plano, horas extras e lead time —, enquanto a qualitativa se refere à interpretação contextualizada dos resultados, considerando as mudanças observadas na rotina de planejamento e execução.

Segundo Gil (2019), a pesquisa descritiva é indicada quando se busca analisar e interpretar fenômenos sem interferência direta em seu curso natural. Já Yin (2015) destaca que o estudo de caso é apropriado quando se deseja investigar um fenômeno dentro de seu contexto real, especialmente em situações em que as fronteiras entre o problema e o ambiente não estão claramente definidas.

Diante disso, este trabalho enquadra-se como uma pesquisa aplicada e descritiva, de abordagem mista, cujo propósito é investigar os efeitos práticos da padronização do sequenciamento no gargalo em um ambiente Job Shop real.

4.2 Coleta e Análise de Dados

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos a partir de fontes secundárias, provenientes de registros internos da empresa. As principais informações derivam das planilhas mantidas pelo setor de Planejamento e Controle da Produção, que consolida semanalmente as horas planejadas e as horas efetivamente trabalhadas nas ordens de produção. Esses registros alimentam dashboards no Power BI, utilizados exclusivamente como ferramenta de visualização e análise, sem interferência na execução operacional.

O período analisado compreende novembro de 2024 a agosto de 2025, abrangendo tanto as semanas iniciais de consolidação da medição quanto aquelas posteriores à implementação da padronização via Unidade Padrão. A estruturação dos dados foi realizada no Microsoft Excel, ferramenta utilizada pelo PCP para elaboração, arquivamento e controle do plano semanal. Cada versão do planejamento é salva em uma base interna, permitindo rastrear a execução e calcular a aderência ao plano de forma sistemática.

A análise foi conduzida por comparação temporal dos indicadores, observando-se tendências, variações antes e depois da padronização e a estabilidade do sistema ao longo do período. Complementarmente, uma análise qualitativa permitiu compreender mudanças percebidas na rotina do PCP, no fluxo produtivo e na previsibilidade das operações.

4.3 Critérios de Avaliação

A avaliação dos resultados baseou-se em três indicadores principais: aderência ao plano, horas extras e lead time.

A aderência ao plano mede a proporção de horas efetivamente trabalhadas conforme o planejamento semanal em relação ao total de horas planejadas. Trata-se do indicador central para avaliar a previsibilidade do sistema, pois expressa o alinhamento entre o que foi programado e o que foi efetivamente executado.

As horas extras representam o volume adicional de trabalho necessário para cumprir o cronograma, funcionando como um indicativo indireto de estabilidade operacional. Reduções nesse indicador estão associadas a um planejamento mais consistente e menor necessidade de intervenções emergenciais.

O lead time corresponde ao prazo estimado para conclusão dos reparos, utilizado pela área comercial na negociação com os clientes. A sua estabilização é essencial para garantir confiabilidade e competitividade no serviço prestado.

O PCP estabeleceu como meta elevar a aderência ao plano para 85%, entendida como nível adequado para o ambiente analisado, de modo a reduzir a necessidade de horas extras e estabilizar o lead time.

Os resultados são apresentados visualmente por meio de gráficos e tabelas provenientes do Power BI, permitindo uma comparação direta entre os cenários anterior e posterior à implementação.

4.4 Definição e Aplicação da Unidade Padrão

A Unidade Padrão adotada neste estudo baseia-se em uma interpretação prática da abordagem proposta por Votto e Fernandes (2014), segundo a qual a normalização da carga do gargalo é um elemento fundamental para estabilizar o fluxo produtivo em ambientes Engineer-to-Order. No contexto analisado, caracterizado por elevada variabilidade nos tempos de soldagem dos rotores, a UP foi definida como o menor tempo contínuo registrado nas operações de solda, correspondente a 16 horas de processamento em um posicionador.

A escolha desse valor como referência não possui caráter prescritivo ou de medição de desempenho individual. Sua função é essencialmente operacional: estabelecer uma unidade mínima de carga que permita expressar tempos muito distintos em uma mesma escala. Em vez de utilizar horas brutas — que dificultam a comparação entre peças e frequentemente mascaram a carga real destinada à família de rotores — a UP cria uma base comum para representar o esforço de processamento. Assim, tempos elevados de reparo deixam de distorcer o planejamento semanal e passam a ser tratados como múltiplos de uma mesma unidade.

A equivalência entre tempo real e UPs é dada pela expressão:

$$UP = \frac{\text{Tempo real de solda (h)}}{16}$$

Essa normalização melhora de maneira significativa a previsibilidade da programação. Um rotor que demande 80 horas passa a ser representado como 5 UPs, enquanto outro que exija 32 horas corresponde a 2 UPs. Embora os tempos reais continuem sendo utilizados nas ordens

de produção e nos processos operacionais, a conversão para UPs permite ao PCP enxergar a carga do gargalo com maior clareza e comparar semanas de forma direta, independente da combinação de modelos que compõem o plano.

A padronização também resolve um problema recorrente antes da implementação da metodologia: semanas com mesma quantidade total de horas planejadas poderiam conter composições completamente diferentes de carga, gerando situações nas quais os posicionadores permaneciam ocupados, mas uma quantidade insuficiente de rotores avançava no fluxo. Como a solda atende diversas famílias de produtos, a carga destinada à linha principal nem sempre era evidente, o que dificultava garantir que a demanda de rotores acompanharia o Takt da produção.

Ao expressar o planejamento por meio de UPs, tornou-se possível assegurar que a parcela da capacidade semanal destinada aos rotores seria sempre suficiente para atender ao ritmo exigido. Considerando o Takt Time da linha — 2,5 dias por peça — e o tempo médio de soldagem observado nos reparos, equivalente a cinco UPs por rotor, conclui-se que a linha necessita processar 10 UPs por semana para atender à demanda planejada. Esse valor representa exclusivamente a carga da família de rotores no gargalo; a capacidade remanescente continua destinada às demais linhas que utilizam o setor.

Dessa forma, a UP atua como um mecanismo de normalização da carga, permitindo sincronizar demanda, capacidade e ritmo produtivo de forma simples e robusta. Ao eliminar distorções geradas pela variabilidade dos tempos e facilitar a visualização da parcela de carga efetivamente destinada aos rotores, a metodologia contribui para um planejamento mais estável, previsível e coerente com os princípios da Teoria das Restrições, sem impor metas irreais ou reinterpretar tempos operacionais reais.

5 APLICAÇÃO DA SOLUÇÃO E RESULTADOS

Este capítulo apresenta a implementação prática da metodologia de padronização do sequenciamento no gargalo produtivo da empresa estudada, detalhando as mudanças adotadas, os resultados obtidos e a comparação entre os cenários anterior e posterior à aplicação do novo modelo. O foco da análise permanece na linha de rotores, dada sua representatividade no portfólio da empresa e sua forte dependência do setor de soldagem, identificado como principal restrição do sistema.

5.1 Mudanças Implementadas

A iniciativa teve início com a constatação da necessidade de mensurar, de forma sistemática, o desempenho do planejamento da produção. Até então, o processo era conduzido de maneira predominantemente empírica, sem indicadores formais que permitissem avaliar a eficácia do plano semanal. O primeiro passo, portanto, foi a implantação do indicador de aderência ao plano, que possibilitou mapear desvios e evidenciar oportunidades de melhoria.

Anteriormente, o plano semanal era elaborado às segundas-feiras, o que comprometia a organização do início das atividades. Com a reformulação do processo, o planejamento passou a ser finalizado e distribuído ainda na sexta-feira anterior, garantindo que a produção iniciasse a semana com as prioridades claramente estabelecidas. Essa simples antecipação proporcionou ganhos significativos em termos de alinhamento e previsibilidade.

Além disso, a equipe do PCP passou a armazenar uma cópia de cada plano semanal em uma base de dados, permitindo a comparação entre o programado e o executado ao final de cada semana. Essa prática viabilizou o cálculo sistemático da aderência ao plano, que, nas primeiras medições, apresentava uma média de cerca de 60%, evidenciando o alto nível de variabilidade e a baixa previsibilidade da produção. Como ilustrado na Figura 3, a tendência das primeiras semanas revela um comportamento praticamente estável e sem indicação de melhoria sustentada, reforçando a necessidade de intervenção estruturada.

Diante desse diagnóstico, a equipe concentrou esforços na reestruturação do processo de programação, com foco na padronização do sequenciamento no gargalo. A escolha do setor de solda como ponto de partida foi estratégica, fundamentada nos princípios da Teoria das Restrições, segundo os quais o desempenho global do sistema é condicionado pelo seu recurso

mais limitante. Atuar sobre a restrição principal — neste caso, a soldagem de rotores — apresentava maior potencial de impacto sistêmico.

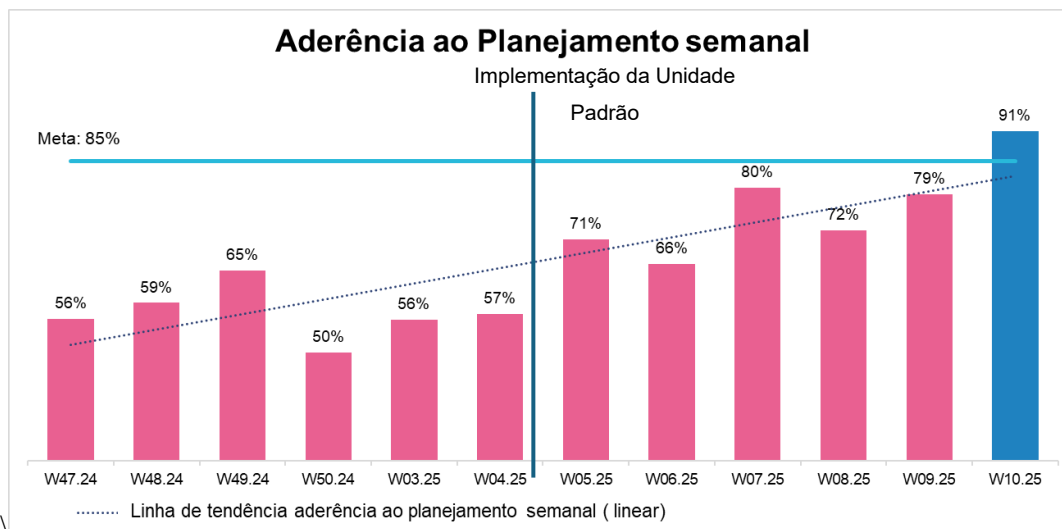
A implementação contou com a participação integrada do PCP, da gerência de operações e dos supervisores das áreas de solda, usinagem e montagem. A condução foi feita de forma gradual e iterativa, com validações semanais e ajustes progressivos. O objetivo era tornar o processo mais assertivo, reduzindo a dependência da experiência individual dos planejadores e facilitando a tomada de decisão.

Foi nesse contexto que se adotou o conceito de Unidade Padrão, inspirado nos estudos de Votto e Fernandes (2014). A UP foi definida como o menor tempo de processamento observado nas operações de solda de rotores, correspondente a 16 horas, e passou a ser utilizada como unidade de medida para planejar a carga do setor.

A lógica de priorização baseada no FIFO foi mantida como referência, sendo admitidas exceções apenas mediante avaliação conjunta entre PCP e supervisores. O planejamento continuou sendo elaborado em Excel, mas passou por uma automação via macro, o que reduziu o tempo de geração e atualização das ordens. Além disso, o foco da programação migrou para o gargalo, com as demais etapas (usinagem e montagem) subordinadas ao ritmo da solda.

Como resultado, as reuniões diárias de Shop Floor Management tornaram-se mais objetivas, reduzindo significativamente o tempo gasto com discussões sobre reprogramações e mudanças de prioridade. Houve também uma diminuição nas interferências manuais e um aumento da previsibilidade no cumprimento do plano. A partir do marco de implementação da UP, evidenciado na Figura 3, observa-se uma inflexão positiva na tendência da aderência ao plano, ilustrando de forma visual o impacto da mudança.

Figura 3 - Aderência ao plano com destaque para o início da implementação da UP



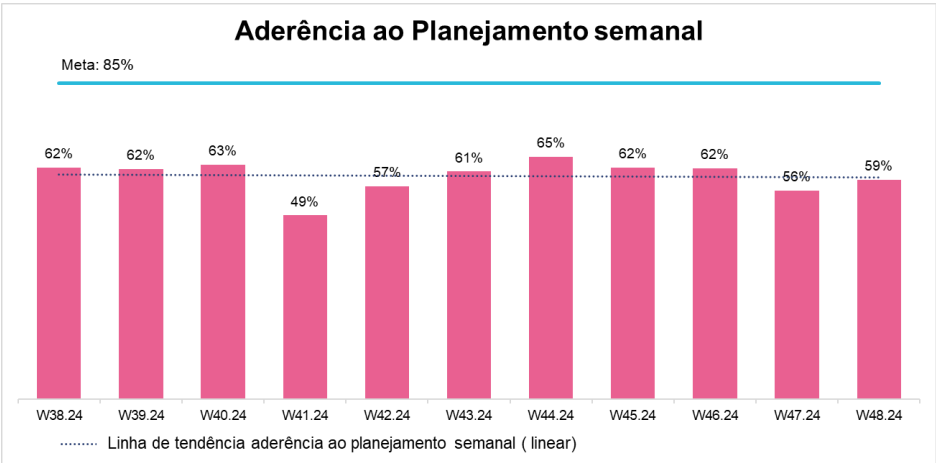
Fonte: Autoria própria (2025)

5.2 Resultados Obtidos

A consolidação dos dados e o monitoramento contínuo dos indicadores permitiram comparar de forma direta o desempenho do sistema produtivo antes e depois da padronização do sequenciamento no gargalo. A análise concentrou-se em dois períodos equivalentes: as doze primeiras semanas de medição da aderência ao plano (semanas 38 a 49 de 2024) e as doze semanas mais recentes até a data de corte do estudo (semanas 29 a 40 de 2025). Essa estrutura viabilizou uma comparação equilibrada entre um período representativo do cenário inicial e outro que reflete o estágio de maturidade do modelo após a implementação da Unidade Padrão.

Em relação à aderência ao plano, a Figura 4 apresenta o comportamento no período anterior à padronização. Observa-se que os valores permaneceram praticamente estáveis, oscilando em torno de 60%, com uma leve tendência descendente em algumas semanas, o que reforça a baixa previsibilidade e a dificuldade de cumprir o planejado. Esse padrão confirma que o sistema operava de forma reativa, dependente de ajustes constantes ao longo da semana.

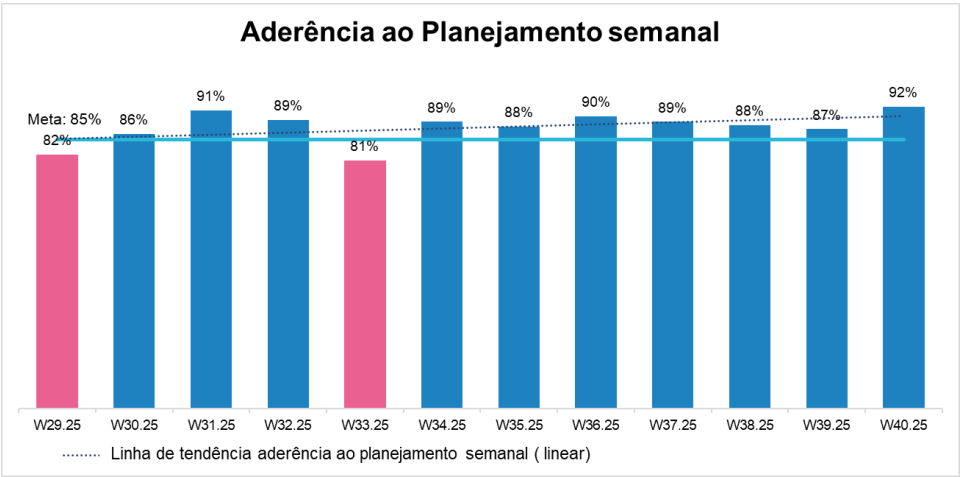
Figura 4 - Aderência ao plano semanal antes da padronização (Semanas 38 a 49 de 2024)



Fonte: Autoria própria (2025)

Após a implementação da metodologia baseada na UP, o comportamento muda de forma significativa, como ilustrado na Figura 5. Além de um salto imediato nos níveis de cumprimento, a linha de tendência passa a apresentar inclinação positiva, indicando não apenas um aumento consistente, mas também uma evolução contínua da estabilidade operacional. A média das doze semanas mais recentes atingiu aproximadamente 89%, superando a meta interna de 85% e representando um ganho superior a 28 pontos percentuais em relação ao período inicial.

Figura 5 - Aderência ao plano – semanas W29.25 a W40.25 (período após implementação)

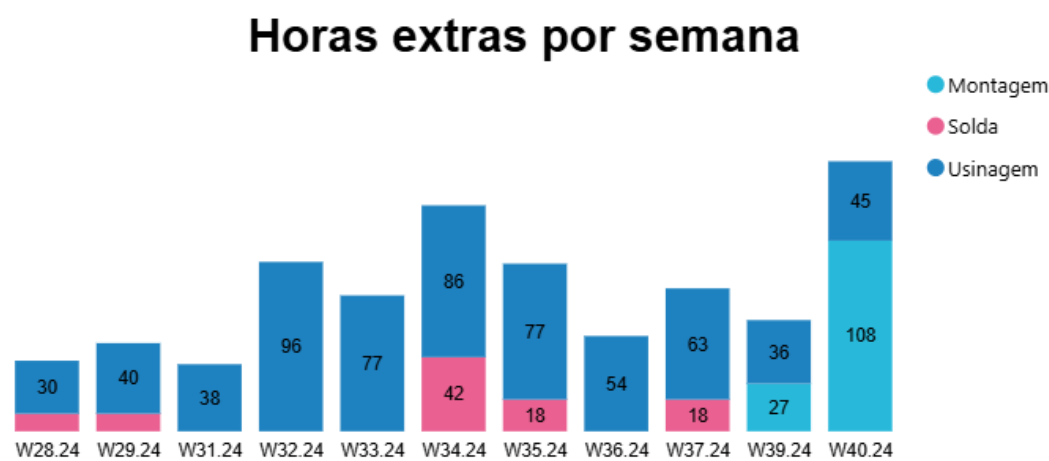


Fonte: Autoria própria (2025)

No caso das horas extras, também se verificou uma redução expressiva. No mesmo intervalo comparativo (semanas 28 a 40), o total registrado caiu de 875 horas em 2024 para 522

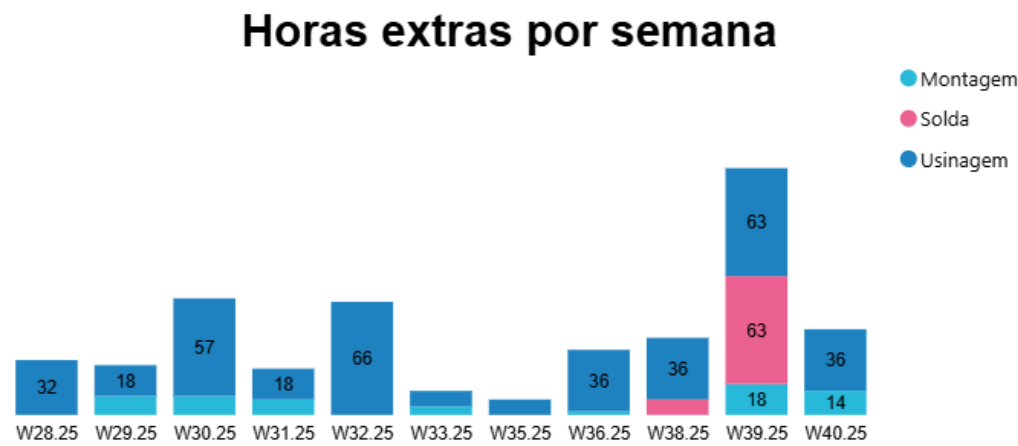
horas em 2025, representando uma queda de aproximadamente 40%. Essa redução é reflexo direto do aumento da estabilidade do fluxo e da melhoria na aderência ao plano, que dispensou a necessidade de ajustes emergenciais ou jornadas prolongadas.

Figura 6 - Horas extras antes da padronização (Semanas 28 a 40 de 2024)



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 7 - Horas extras após a padronização (Semanas 28 a 40 de 2025)



Fonte: Autoria própria (2025)

Além dos ganhos quantitativos, observou-se uma melhora significativa na rotina de planejamento. O tempo dedicado à elaboração do plano semanal foi reduzido, as reuniões passaram a focar em desvios pontuais e a comunicação entre áreas se tornou mais fluida. O sistema, antes reativo e instável, passou a operar com maior disciplina e previsibilidade.

A inclinação positiva da curva de aderência no período pós-implementação mostra que a operação não apenas atingiu um novo patamar de desempenho, mas também ganhou robustez para lidar com as variações naturais do ambiente sob encomenda. Esse comportamento contrasta com o período inicial, no qual os indicadores permaneciam praticamente estagnados. Dessa forma, os dados comprovam que a padronização do sequenciamento no gargalo não apenas elevou o desempenho imediato, mas consolidou um modelo de planejamento mais confiável, estável e compatível com a realidade de um ambiente Job Shop real.

5.3 Discussão dos Resultados

Os resultados obtidos confirmam que a padronização do sequenciamento no gargalo teve efeitos positivos diretos sobre a eficiência do planejamento e a estabilidade da operação. O aumento da aderência ao plano, superior a 28 pontos percentuais, aliado à redução significativa das horas extras, indica que a metodologia contribuiu efetivamente para mitigar a variabilidade e melhorar o desempenho geral do sistema.

Esses avanços devem-se, sobretudo, à antecipação do planejamento, ao uso da Unidade Padrão como métrica de carga e à subordinação das demais etapas ao ritmo do gargalo. A simplicidade do modelo, estruturado a partir de ferramentas já familiares à equipe (como Excel e Power BI), facilitou sua aceitação e execução, eliminando a necessidade de investimentos em sistemas complexos ou mudanças estruturais profundas.

Outro aspecto relevante foi o impacto indireto nas demais áreas produtivas. Com o gargalo operando de forma mais estável, as etapas subsequentes — como usinagem, balanceamento e montagem — passaram a atuar de maneira mais sincronizada, reduzindo tempos de espera e aumentando a fluidez do processo produtivo como um todo. O nivelamento do gargalo reduziu o efeito cascata de atrasos, resultando em menor sobrecarga para outras áreas.

Embora a demanda sob encomenda continue impondo variações naturais, a metodologia mostrou-se robusta o suficiente para absorver essas oscilações sem comprometer o planejamento semanal. O comportamento ascendente da linha de tendência no período pós-implementação reforça que o sistema não apenas se estabilizou, mas evoluiu em maturidade, demonstrando capacidade de manter alta aderência mesmo em semanas com maior carga de trabalho ou pequenas interrupções operacionais.

Assim, a combinação entre disciplina operacional, padronização do sequenciamento e foco no recurso restritivo consolidou um modelo de gestão mais confiável e eficaz. Os resultados validam, na prática, os fundamentos da Teoria das Restrições aplicados a um ambiente Job Shop real, fortalecendo o PCP como agente estruturador da previsibilidade e do desempenho operacional da empresa.

6 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta as principais conclusões do estudo a partir da aplicação da metodologia de padronização do sequenciamento no gargalo produtivo. São sintetizados os resultados obtidos, destacadas as contribuições práticas e acadêmicas da pesquisa, discutidas suas limitações e indicadas recomendações para desdobramentos futuros. A análise tem por objetivo refletir criticamente sobre os impactos observados e consolidar os aprendizados advindos da aplicação em ambiente real de manufatura sob encomenda.

6.1 Síntese dos Resultados

A padronização do sequenciamento no setor de solda, com base no conceito de Unidade Padrão, demonstrou efeitos concretos na melhoria do desempenho do sistema produtivo. A partir de uma situação inicial caracterizada por forte variabilidade, baixo controle e elevado volume de replanejamentos, foi possível estruturar uma abordagem de programação orientada ao recurso restritivo, que resultou em avanços consistentes em termos de previsibilidade e eficiência.

A aderência ao plano, principal indicador de avaliação do planejamento, apresentou evolução significativa: passou de uma média de aproximadamente 61% no período inicial (semanas 38 a 49 de 2024) para cerca de 89% nas semanas subsequentes à implementação (29 a 40 de 2025). Esse aumento refletiu uma maior consistência entre o que foi programado e o que efetivamente foi executado, evidenciando o fortalecimento da rotina de planejamento e controle.

De forma correlata, as horas extras caíram de 875 para 522 horas no período equivalente entre 2024 e 2025, representando uma redução próxima de 40%. A diminuição desse indicador denota maior equilíbrio entre carga e capacidade, com menor necessidade de ajustes reativos e compensações operacionais.

No aspecto qualitativo, observou-se maior agilidade na elaboração dos planos semanais, melhoria na comunicação entre áreas e redução das interferências na programação ao longo das semanas. O processo, antes pautado por decisões empíricas e reativas, passou a operar com maior grau de disciplina, previsibilidade e controle.

O lead time médio, que variava entre oito e dez semanas antes da padronização, foi estabilizado em oito semanas, o que contribuiu para reforçar a confiança nos prazos informados aos clientes e reduzir incertezas ao longo do fluxo produtivo.

De modo geral, os resultados validaram o objetivo proposto pela pesquisa: demonstrar que a padronização do sequenciamento no gargalo, estruturada por meio da Unidade Padrão e associada ao Takt Time, pode ampliar significativamente a eficiência do planejamento em ambientes Job Shop.

6.2 Recomendações e Perspectivas Futuras

Diante dos resultados alcançados, recomenda-se que a metodologia de padronização do sequenciamento seja expandida gradualmente para outras linhas produtivas que também apresentem características de variabilidade e restrições operacionais relevantes. Embora a aplicação inicial tenha se concentrado exclusivamente nos rotores — devido ao seu peso na demanda e à clara identificação da solda como gargalo — a lógica de normalização da carga via Unidade Padrão pode ser adaptada para outros fluxos, desde que suas restrições sejam caracterizadas adequadamente.

O acompanhamento contínuo dos indicadores de desempenho deve permanecer como parte estruturante da rotina do PCP. A manutenção do monitoramento da aderência ao plano, horas extras e lead time sustenta a cultura de melhoria contínua e permite identificar desvios de maneira precoce. O uso de dashboards também pode ser ampliado, integrando diferentes linhas de produção e oferecendo uma visão mais abrangente do comportamento dos gargalos ao longo do tempo.

Do ponto de vista analítico, o estudo abre espaço para aprofundamentos futuros. A utilização de modelos de simulação computacional, por exemplo, permitiria avaliar o comportamento do sistema sob diferentes políticas de sequenciamento, cenários de demanda ou configurações de carga. A adoção de simulações também possibilitaria antecipar gargalos emergentes e testar alternativas de priorização sem interferir diretamente na operação real.

Outro desdobramento relevante seria a integração da metodologia com as etapas anteriores à solda em outras famílias de produtos, especialmente naquelas cujo gargalo não se encontra na soldagem. A lógica empregada neste estudo pode ser adaptada para novos gargalos,

contribuindo para evitar acúmulos excessivos de WIP e melhorar a fluidez do fluxo como um todo, sempre respeitando as particularidades de cada linha.

Por fim, perspectivas acadêmicas adicionais incluem investigar combinações entre a abordagem de UP, heurísticas tradicionais de Job Shop Scheduling e princípios Lean, explorando potenciais sinergias que contribuam para a previsibilidade em ambientes de produção sob encomenda.

6.3 Limitações do Estudo

Apesar dos avanços observados, o estudo apresenta limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados. A primeira delas refere-se ao recorte temporal adotado. O período analisado — de novembro de 2024 a agosto de 2025 —, embora suficiente para identificar tendências importantes, não permite avaliar efeitos de longo prazo da metodologia, especialmente diante de eventuais mudanças sazonais de demanda ou alterações estruturais no fluxo produtivo.

A variabilidade natural da demanda, característica de ambientes sob encomenda, também constitui uma limitação relevante. Semanas com carga elevada ou reduzida influenciam diretamente a aderência ao plano e o volume de horas extras, podendo distorcer comparações pontuais. Em alguns casos específicos, determinados projetos já previam prazos reduzidos ou jornadas estendidas desde a origem, o que dificulta atribuir integralmente tais ocorrências ao desempenho do planejamento.

Outro ponto a ser destacado diz respeito à disponibilidade de dados históricos. O controle sistemático da aderência ao plano foi implementado apenas com o início do projeto, o que restringe a existência de séries mais longas para análises comparativas e limita avaliações antes do período estudado.

Além disso, a metodologia depende da qualidade das estimativas de tempo fornecidas pela engenharia, utilizadas como base para o cálculo da carga em Unidades Padrão (UP). Em situações de reparos atípicos ou com complexidade elevada, imprecisões nessas estimativas podem afetar temporariamente o balanceamento do gargalo. Embora isso não comprometa o método, indica a necessidade de revisões periódicas e calibragem contínua dos tempos de referência.

Por fim, a aplicação concentrou-se exclusivamente na linha de rotores. Apesar dos resultados positivos, sua replicação em outras linhas produtivas exige adaptações específicas às características de cada processo. Assim, os achados deste estudo representam uma contribuição sólida, porém limitada ao contexto analisado, servindo como base para futuras expansões, e não como generalização automática para toda a operação.

REFERÊNCIAS

- CORRÊA, Henrique L.; CORRÊA, Carlos A. **Administração de Produção e Operações: manufatura e serviços – uma abordagem estratégica**. 5. ed. São Paulo: GEN Atlas, 2022.
- GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 7. ed. São Paulo: GEN Atlas, 2019.
- GOLDRATT, Eliyahu M.; COX, Jeff. **A meta: um processo de melhoria contínua**. São Paulo: Nobel, 2007.
- MORALES, Sergio Gomez; RONCONI, Débora Pretti. Formulações matemáticas e estratégias de resolução para o problema job shop clássico. **Production**, v. 26, n. 3, p. 614–625, 2015.
- PACHECO, Ricardo Ferrari; SANTORO, Miguel Cezar. Proposta de classificação hierarquizada dos modelos de solução para o problema de job shop scheduling. **Gestão & Produção**, v. 6, p. 1-15, 1999.
- PORTILHO, L. **Aplicação do Problema de Job-Shop Scheduling em Aciarias**. Universidade Federal de Juiz de Fora, 2007.
- SLACK, Nigel; BRANDON-JONES, Alistair; BURGESS, Nicola. **Administração da Produção**. 10. ed. São Paulo: GEN Atlas, 2023.
- TUBINO, Dalvio Ferrari. **Planejamento e Controle da Produção: teoria e prática**. 3. ed. São Paulo: GEN Atlas, 2017.
- VOTTO, Rodrigo Goulart; FERNANDES, Flavio Cesar Faria. Produção enxuta e teoria das restrições: proposta de um método para implantação conjunta na Indústria de Bens de Capital sob Encomenda. **Gestão & Produção**, v. 21, p. 45-63, 2014.
- WOMACK, James P.; JONES, Daniel T. **A mentalidade enxuta nas empresas: elimine o desperdício e crie riqueza**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004.
- YIN, Robert K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.