

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GUILHERME MAZON SILVEIRA

LUIZA IZABEL SIMIONI

VITOR YUKIO ITO DAVID

SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO EM UMA LINHA DE PRODUÇÃO DE
PINTURA: OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS E RESULTADOS

CURITIBA

2025

GUILHERME MAZON SILVEIRA
LUIZA IZABEL SIMIONI
VITOR YUKIO ITO DAVID

SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO EM UMA LINHA DE PRODUÇÃO DE
PINTURA: OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS E RESULTADOS

TCC apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Mecânica,
Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito
parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Pablo Deivid Valle

CURITIBA
2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PARECER Nº 5/2025/UFPR/R/TC/DEMEC

PROCESSO Nº 23075.041715/2025-19

INTERESSADO: GUILHERME MAZON SILVEIRA, LUIZA IZABEL SIMIONI, VITOR YUKIO ITO DAVID

TERMO DE APROVAÇÃO

Título: SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO EM UMA LINHA DE PRODUÇÃO DE PINTURA: OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS E RESULTADOS

Autores: GUILHERME MAZON SILVEIRA; LUIZA IZABEL SIMIONI; VITOR YUKIO ITO DAVID

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica. Aprovado pela seguinte banca examinadora:

Prof. Pablo Deivid Valle (UFPR/DEMEC) – Orientador

Prof. João Moraes da Silva Neto (UFPR/DEMEC)

Eng. Gustavo Henrique Del Conte da Silva (Mestrando/PGMEC)

Curitiba, 14 de julho de 2025



Documento assinado eletronicamente por **PABLO DEIVID VALLE, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/07/2025, às 09:54, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **JOAO MORAIS DA SILVA NETO, CHEFE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA - TC**, em 06/08/2025, às 15:55, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **GUSTAVO HENRIQUE DEL CONTE DA SILVA, Usuário Externo**, em 03/09/2025, às 22:55, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida [aqui](#) informando o código verificador

7953896 e o código CRC **E5A47D6E**.

Dedicamos esse trabalho a nossos pais e nossos amigos, por toda a força e incentivo durante nossas caminhadas na universidade.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho de conclusão de curso foi algo desafiador, que não seria possível sem o apoio e a colaboração de diversas pessoas a quem expressamos nossa profunda gratidão.

Primeiramente, nosso sincero agradecimento ao nosso orientador, Prof. Dr. Pablo Deivid Valle, pela confiança em nosso potencial, pela orientação e pelo apoio ao longo do desenvolvimento deste TCC. Sua experiência e conhecimento foram fundamentais para a qualidade e estruturação do nosso trabalho.

Aos nossos gestores na empresa, Marcos Lima, Maximiliano Silva e Geovani Souza, nosso muito obrigado por terem proporcionado o ambiente e os recursos necessários para a execução desta pesquisa. A oportunidade de aplicar conceitos teóricos a um cenário industrial real, como a linha de pintura em Curitiba, foi essencial para a consolidação do nosso aprendizado.

À nossa própria equipe – Guilherme Mazon Silveira, Vitor Yukio Ito David e Luiza Izabel Simioni – agradecemos a dedicação, o espírito de colaboração e a resiliência diante dos desafios. A sinergia e o comprometimento de cada um foi a força motriz para superarmos as dificuldades e alcançarmos nossos objetivos.

Às nossas famílias, nosso mais profundo agradecimento pelo amor, pela paciência, pela compreensão e pelo incentivo que nos impulsionaram a seguir em frente e a conquistar mais esta etapa em nossas vidas acadêmicas e pessoais.

Finalmente, à Universidade Federal do Paraná, por toda a estrutura e conhecimento oferecidos, e a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização deste projeto.

No jogo da vida, a melhor estratégia é sempre ter um plano B. Na engenharia, um plano C, D, E... e uma simulação para testar todos eles.

(Reflexão)

RESUMO

A indústria de manufatura busca constantemente otimizar seus processos, reduzir custos e aumentar a produtividade. As linhas de pintura são essenciais por fornecerem valor estético e proteção contra corrosão, mas enfrentam gargalos devido à complexidade de suas etapas. Este trabalho analisa uma linha de pintura industrial, utilizando simulação computacional no software Tecnomatix Plant Simulation para identificar restrições e propor melhorias. A aplicação de tinta metálica, que exige múltiplas passagens, foi identificada como o principal gargalo. O modelo de simulação criado representa um Modelo Digital (Digital Model), alimentado manualmente, sem conexão em tempo real com o ambiente físico. Foram analisados tempos de processamento, taxas de recirculação, mix de produtos e desempenho da linha. As simulações testaram cenários variados quanto ao mix de modelos, variantes de cor e tempos de ciclo, buscando aumento de capacidade produtiva, redução de gargalos e melhoria do OLE. Os resultados fundamentam propostas para a evolução da linha rumo a um Gêmeo Digital completo.

Palavras-chave: Simulação; Processo de Manufatura; Otimização de Processos; *Tecnomatix Plant Simulation*; VSM.

ABSTRACT

The manufacturing industry constantly seeks to optimize processes, reduce costs, and increase productivity. Paintshop lines are crucial for providing aesthetic value and corrosion protection but often face bottlenecks due to their complexity. This work analyzes an industrial painting line using Tecnomatix Plant Simulation software to identify constraints and propose improvements. The application of metallic paints, which requires multiple passes, was identified as the main bottleneck. The simulation model represents a Digital Model (DM), manually updated without real-time connection to the physical environment. Processing times, recirculation rates, product mix, and performance metrics were analyzed. Simulations tested different scenarios involving model mix, color variants, and cycle times to increase production capacity, reduce bottlenecks, and improve OLE. The results support strategies toward a complete Digital Twin implementation.

Keywords: Simulation; Manufacturing Process; Process Optimization; Tecnomatix Plant Simulation; VSM.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - FLUXO DE PROCESSOS LINHA DE PINTURA.....	18
FIGURA 2 – RESTRIÇÃO DE PINTURA DE PEÇAS COLORIDAS	30
FIGURA 3 - CORES SÓLIDA E METÁLICA.....	31
FIGURA 4 - ELEMENTOS UTILIZADOS PARA CONSTRUÇÃO DA SIMULAÇÃO	34
FIGURA 5 - PLANEJAMENTO DE ATIVIDADES.....	41
FIGURA 6 - CAMINHO CRÍTICO	43
FIGURA 7 - FLUXOGRAMA LINHA DE SOLDA	47
FIGURA 8 - FLUXOGRAMA PRÉ-TRATAMENTO/ECOAT E SELANTE	48
FIGURA 9 - VSM PRÉ-TRATAMENTO/ECOAT	48
FIGURA 10 - VSM SELANTE.....	48
FIGURA 11 - FLUXOGRAMA PRIMER E TOPCOAT	49
FIGURA 12 - VSM APLICAÇÃO DE PRIMER.....	49
FIGURA 13 - VSM APLICAÇÃO DE TINTA (TOPCOAT)	50
FIGURA 14 - MODELAGEM DA LINHA DE PINTURA	50
FIGURA 15 - MODELAGEM DA LINHA DE PINTURA	51
FIGURA 16 - SIMULAÇÃO DA LINHA DE PINTURA	51
FIGURA 17 - INTERFACES DE USUÁRIO NA SIMULAÇÃO.....	52
FIGURA 18 - LOCALIZAÇÃO DA SUBLINHA DE PRÉ-TRATAMENTO.....	53
FIGURA 19 - LOCALIZAÇÃO DA SUBLINHA SELANTE	54
FIGURA 20 - LOCALIZAÇÃO DA SUBLINHA PRIMER.....	55
FIGURA 21 - LOCALIZAÇÃO DA SUBLINHA APLICAÇÃO DE TINTA	56
FIGURA 22 - INDICADORES DE VOLUME (PRODUTOS PASSANDO POR CADA ESTAÇÃO/PROCESSO)	58
FIGURA 23 - VOLUME PRODUZIDO POR DIA (MÉDIA).....	59
FIGURA 24 - DIAGRAMAS PARA VARIAÇÃO DE TEMPO DE CICLO E SEUS RESULTADOS DE 3 DIAS PARA CICLOS NA FASE 1	67
FIGURA 25 - DIAGRAMAS PARA VARIAÇÃO DE TEMPO DE CICLO E SEUS RESULTADOS DE 3 DIAS PARA PEÇAS NA FASE 1	68
FIGURA 26 - RESULTADOS DE TEMPOS DE CICLO POR MODELO E VARIANTE, REPRESENTANDO AVANÇO DA FASE 1	69
FIGURA 27 - DIAGRAMAS PARA VARIAÇÃO DE TEMPO DE CICLO E SEUS RESULTADOS DE 3 DIAS PARA CICLOS NA FASE 2	70

FIGURA 28 – DIAGRAMAS PARA VARIAÇÃO DE TEMPO DE CICLO E SEUS RESULTADOS DE 3 DIAS PARA PEÇAS NA FASE 2	71
FIGURA 29 - RESULTADOS DE TEMPOS DE CICLO POR MODELO E VARIANTE, REDUZINDO SÓLIDOS 60" E METÁLICOS 90" (AVANÇO 1) E MAIS 60S TUDO (AVANÇO 2) REPRESENTANDO AVANÇO DA FASE 272	
FIGURA 30 - EXPERIMENT MANAGERS UTILIZADOS PARA MODELOS E VARIANTES.....	73
FIGURA 31 - RESULTADOS DE VARIAÇÃO DE VARIANTES PARA VALORES REAIS DE FORECAST	74
FIGURA 32 - RESULTADOS DE VARIAÇÃO DE VARIANTES PARA VALORES TEÓRICOS DE 0 A 100%	75
FIGURA 33 - RESULTADOS DE VARIAÇÃO DE MODELOS PARA VALORES REAIS DE FORECAST	76
FIGURA 34 - RESULTADOS DE VARIAÇÃO DE MODELOS PARA VALORES TEÓRICOS DE 0 A 100%	77
FIGURA 35 - RESULTADOS DE VARIAÇÃO ENTRE MODELOS E VARIANTES NO IMPACTO EM PEÇAS E CICLOS.....	79
FIGURA 36 - ILUSTRAÇÃO DO FLUXO DO ALIMENTADOR DE TINTAS COLORIDAS	80
FIGURA 37 - RESULTADOS DAS CONDIÇÕES DE GABINETES	81
FIGURA 38 - FRENTES DE MODIFICAÇÃO DE PROCESSO PARA ADEQUAÇÃO DE LINHA PARA FORECASTS FUTUROS.....	83
FIGURA 39 - PROPOSTA DE REDUÇÃO DE TEMPO DE CICLO DOS ROBÔS POR VARIANTE DE MODELO E VARIANTE DE COR.....	84
FIGURA 40 - SIMULAÇÃO EM 3 DIAS APÓS AS MODIFICAÇÕES.....	85
FIGURA 41 - VOLUME PRODUZIDO POR DIA PÓS MELHORIAS.....	86

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – STATUS DAS ESTAÇÕES DURANTE PRODUÇÃO	60
GRÁFICO 2 - CURVA DE CAPACIDADE DA LINHA VERSUS % DE METÁLICOS	63
GRÁFICO 3 - STATUS DAS ESTAÇÕES PÓS MELHORIAS	86

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - MIX DE PRODUÇÃO	52
TABELA 2 - DADOS GLOBAIS DA SIMULAÇÃO	52
TABELA 3 – TURNOS E HORÁRIOS DE PRODUÇÃO	52
TABELA 4 - TEMPOS DE OPERAÇÃO PRÉ-TRATAMENTO	53
TABELA 5 - TEMPOS OPERAÇÃO SELANTE	54
TABELA 6 - TEMPOS DE OPERAÇÃO PRIMER	55
TABELA 7 - TEMPOS OPERAÇÃO APLICAÇÃO DE TINTA - SÓLIDAS E VERNIZ	56
TABELA 8 - TEMPOS OPERAÇÃO APLICAÇÃO DE TINTA - METÁLICAS	57
TABELA 9 - COMPARATIVO TEMPOS DE OPERAÇÃO PEÇAS SÓLIDAS E METÁLICAS	57
TABELA 10 - <i>FORECAST</i> – PERCENTUAL METÁLICOS	64
TABELA 11 - <i>FORECAST</i> – VOLUME ABSOLUTO METÁLICOS	64
TABELA 12 - <i>FORECAST</i> – VOLUME ABSOLUTO SÓLIDOS	64

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

VSM	- <i>Value Stream Map</i>
DTS	- <i>Digital Twin Shop Floor</i>
TC	- <i>Tempo de Ciclo</i>
OEE	- <i>Overall Equipment Efficiency</i>
OLE	- <i>Overall Line Efficiency</i>
FiFo	- <i>First In First Out</i>
VA	- <i>Value Aggregated</i>
NVA	- <i>Non-Value Aggregated</i>
UPH	- <i>Units Per Hour</i>
MRP	- <i>Manufacturing Resource Planning</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 PROBLEMA	18
1.2 OBJETIVOS	19
1.2.1 Objetivo geral	19
1.2.2 Objetivos específicos.....	19
1.3 JUSTIFICATIVA	20
2 REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1 HISTÓRICO DO PROCESSO DE PINTURA INDUSTRIAL	21
2.2 FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO NA INDÚSTRIA	21
2.3 OTIMIZAÇÃO DE LINHAS DE PRODUÇÃO.....	23
2.4 ESTUDOS DE CASO EM AMBIENTES INDUSTRIAIS	24
2.5 GÊMEOS DIGITAIS	25
3 MATERIAL E MÉTODOS	28
3.1 NATUREZA DA PESQUISA.....	28
3.2 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	28
3.3 ABORDAGEM DA PESQUISA.....	29
3.4 CARACTERIZAÇÃO DA LINHA DE PINTURA	29
3.5 COLETA E ANÁLISE DE DADOS.....	32
3.6 MODELAGEM E SIMULAÇÃO.....	33
3.7 VALIDAÇÃO DO MODELO	35
3.8 IDENTIFICAÇÃO DE GARGALOS.....	35
3.9 PROPOSTAS DE OTIMIZAÇÃO	36
4 PLANEJAMENTO.....	40
4.1 ATIVIDADES E ENTREGÁVEIS	41
4.1.1 Alcance e metodologias	41
4.1.2 Hipóteses de modificação	42
4.2 ORGANIZAÇÃO E PLANEJAMENTO	43
4.2.1 Análise de Caminho Crítico	43
4.2.2 Time Plan	44
4.2.3 Gestão de Riscos	44
5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	46
5.1 <i>VALUE STREAM MAPS</i> (VSM)	46

5.1.1 Value Stream Map Linha de Solda	46
5.1.2 Value Stream Map Linha de Pintura	47
5.2 SIMULAÇÃO DE FLUXO	50
5.2.1 Parâmetros Globais	52
5.2.2 Parâmetros Pré-Tratamento	53
5.2.3 Parâmetros Selante	54
5.2.4 Parâmetros Primer	55
5.2.5 Parâmetros Aplicação de Tinta	56
5.2.6 Resultados preliminares	58
5.3 IDENTIFICAÇÃO DE GARGALO	59
5.4 DIFERENTES CENÁRIOS DE PRODUÇÃO	62
5.5 HIPÓTESES E RESULTADOS	65
5.5.1 Diminuição do Tempo de Ciclo	66
5.5.2 Otimização de Mix	73
5.5.3 Aumento de Disponibilidade	79
5.5.4 Proposta de Otimização	82
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	88
8 REFERÊNCIAS	90
9 APÊNDICE 1	95
10 ANEXO 1	97

1 INTRODUÇÃO

Uma linha de produção pode ser definida como uma interface homem-máquina, em que matérias-primas, ou diversos componentes, são tratados e transformados em um produto.

Há diversas formas de desenvolver e projetar uma linha de produção, sejam elas, por exemplo: com inspiração em conceitos de diferentes épocas, necessidades específicas de um produto, espaço disponível, tecnologia empregada, além de diversos outros critérios e possibilidades. Como principal característica tem-se que cada linha possui suas particularidades, o que torna as análises de padrões e características delas muito amplo e complexo.

Nesse sentido, o uso de softwares de simulação de linhas de produção tem, com a crescente aplicação da digitalização nas indústrias, facilitado a compreensão, detecção e tomada de decisões quanto a gargalos e problemas de concepção, por exemplo, para linhas já em operação, bem como o correto planejamento e execução de linhas de produção futuras.

Na busca por mais eficiência, menores custos e maior produtividade, a indústria de manufatura investe continuamente em melhorias nos seus processos. Nesse contexto, as linhas de pintura desempenham um papel crucial, pois além de conferirem valor estético ao produto, são responsáveis pela proteção contra corrosão e durabilidade. Contudo, por se tratar de um processo com várias etapas interdependentes, gargalos e ineficiências podem surgir, comprometendo o desempenho da linha como um todo.

Este trabalho propõe mapear e analisar uma linha de pintura industrial, utilizando ferramentas de simulação e modelagem de fluxo para identificar possíveis restrições e propor soluções de otimização. Através dessa análise, o objetivo é não apenas evidenciar os pontos críticos que impactam o desempenho, mas também propor melhorias que resultem em uma operação mais fluida e eficiente.

A metodologia aplicada envolverá o levantamento detalhado das etapas do processo de pintura, a modelagem do fluxo produtivo utilizando software de simulação, e a validação dos resultados por meio da comparação com dados reais. Ao final, espera-se fornecer recomendações práticas que possam ser implementadas para melhorar o desempenho da linha de pintura, contribuindo para a competitividade e a sustentabilidade da operação.

As tecnologias empregadas no processo de pintura, relacionadas aos produtos químicos utilizados, fazem com que a linha possa ser dividida em quatro “sublinhas”: Pré-tratamento, selante, aplicação de primer e aplicação de tinta. Cada sublinha tem suas particularidades, introduzidas a seguir, e tempos de processamento diferentes, que serão discutidos posteriormente.

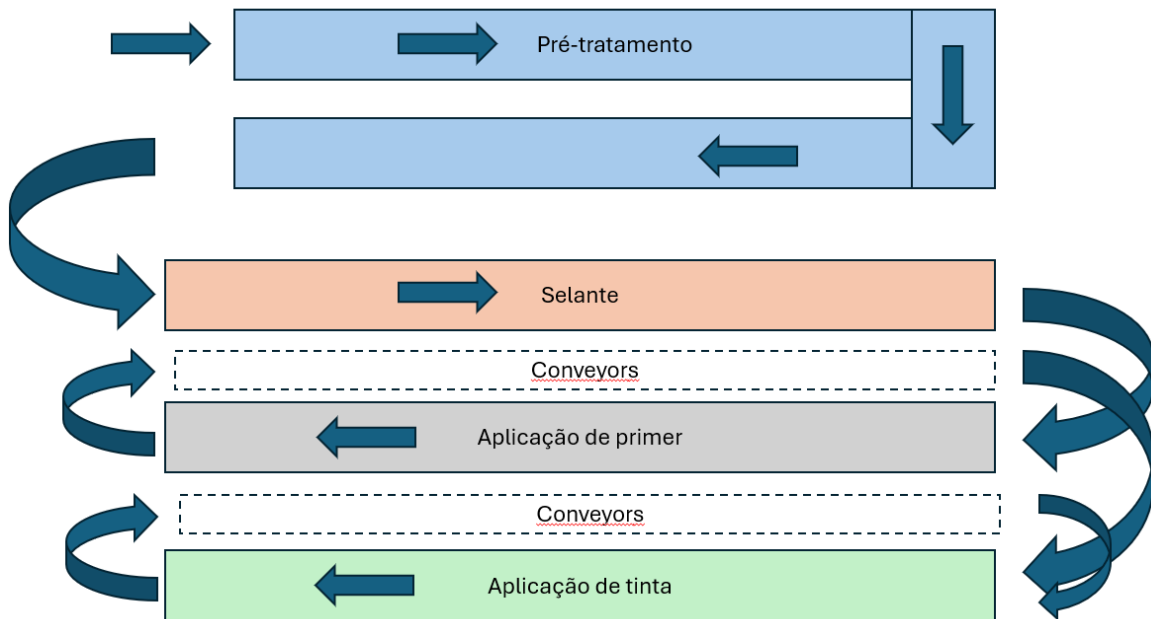
O pré-tratamento tem por objetivo realizar a limpeza das peças após o processo de solda e aplicar camadas de materiais responsáveis pela proteção anticorrosão, necessárias aos veículos.

A linha do selante é responsável pela aplicação do material de mesmo nome, que realiza a vedação das peças, o protegendo da entrada de água e poeira.

A aplicação de primer é robotizada e responsável pela camada preparatória de tinta no veículo, tornando o substrato adequado para o recebimento da cor.

Por fim, a aplicação de tinta é a última etapa do processo de pintura e é responsável pela cor e estética. É nesse local onde há recirculação dos produtos, dependendo do tipo de tinta utilizado: cores sólidas requerem apenas uma aplicação, enquanto cores metálicas necessitam duas aplicações, com o agravante de ainda necessitarem uma reentrada na linha para a aplicação de um verniz incolor responsável pelo brilho do produto acabado. Todo esse fluxo de processo pode ser desenhado conforme a figura abaixo:

FIGURA 1 - FLUXO DE PROCESSOS LINHA DE PINTURA



FONTE: Os autores (2024)

1.1 PROBLEMA

A análise prévia da linha de pintura em estudo revelou que a etapa de aplicação de tinta, particularmente devido à necessidade de recirculação do produto, representa um ponto crítico. Essa recirculação, intrínseca ao processo produtivo e impulsionada por características das tintas metálicas que exigem múltiplas passagens para a aplicação da tinta base e do verniz, já impõe desafios à capacidade operacional atual. Prevê-se um aumento na demanda de mercado por produtos que requerem mais recirculações no futuro, o que intensificará as pressões sobre a linha. Tal cenário levanta preocupações significativas quanto à capacidade máxima de recirculações sem a ocorrência de gargalos ou a necessidade de intervenções estruturais. A falta de uma análise mais detalhada tende a gerar ineficiências no processo, aumento de custos de produção devido a retrabalhos ou atrasos, e comprometimento da capacidade de resposta às demandas futuras do mercado. Portanto, um estudo detalhado que simule o comportamento da linha sob diferentes cenários de demanda é fundamental para identificar preventivamente as limitações e propor soluções otimizadas. Este trabalho se alinha à crescente relevância do conceito de *Digital Twin Shop Floor* (DTS) na indústria manufatureira, uma vez que o DTS pode oferecer

vantagens como flexibilidade de produção, economia de custos e otimização de processos, integrando os mundos virtual e físico.

1.2 OBJETIVOS

Tendo em mente essa necessidade de análise aprofundada, pode-se descrever alguns objetivos claros do trabalho, os quais serão apresentados a seguir e divididos entre objetivos gerais e específicos.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral do trabalho é a simulação e modelagem da linha de pintura de uma indústria, visando a otimização de seus processos e resultados.

1.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, é possível listar:

a) Localizar e detalhar o gargalo da linha: Com base na simulação, identificar precisamente em qual estação (ou combinação de estações) o gargalo ocorre e em qual tipo de produto, considerando modelos e famílias de cores, ele se manifesta. Essa identificação detalhada é crucial para direcionar esforços de otimização de forma assertiva;

Propor e discutir possibilidades de melhoria da linha: Com base na análise dos gargalos, desenvolver e apresentar um conjunto de soluções potenciais que visem aprimorar a eficiência, reduzir o tempo de ciclo e aumentar a capacidade produtiva da linha, buscando atender às demandas futuras de produção;

Realizar a simulação dessas possibilidades de melhoria: Modelar e simular os cenários propostos com as melhorias para avaliar quantitativamente seu impacto no desempenho da linha. Esta etapa permitirá prever os resultados das intervenções sem a necessidade de alterações físicas onerosas ou disruptivas no processo produtivo real;

1.3 JUSTIFICATIVA

A complexidade cada vez maior dos sistemas produtivos tem levado as indústrias a buscarem ferramentas que apoiem suas decisões. O conceito de Gêmeo Digital (Digital Twin - DT) surge como uma alternativa promissora nesse contexto, pois oferece uma réplica virtual de um sistema físico, permitindo a previsão e simulação de cenários. Contudo, a tecnologia é recente e ainda há uma percepção de incerteza quanto aos seus benefícios e viabilidade de investimento por parte das indústrias.

Atualmente, este trabalho utiliza um modelo de simulação que, embora represente fielmente a linha de pintura, depende da entrada manual de dados para refletir o comportamento real do processo. Isso significa que a simulação atua como um modelo digital da linha de produção, onde os dados da operação real são inseridos para análise, mas não há uma conexão automática e em tempo real que permita a atualização contínua do modelo virtual pela contraparte física.

Este trabalho se justifica pela necessidade de aprofundar o conhecimento sobre as aplicações e otimizações que podem ser alcançadas mesmo com um modelo digital, com o potencial de futuramente evoluir para um DTS completo. Utilizando como base a linha de pintura de uma fábrica em Curitiba, Brasil, busca-se identificar melhorias aplicáveis a este sistema, contribuindo para a otimização de processos e a superação dos desafios impostos pela necessidade de recirculação na linha de pintura. A escassez de artigos que revisam a aplicação do DTS em indústrias reforça a importância desta pesquisa para a comunidade científica e para o setor de manufatura.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura é fundamental para contextualizar a pesquisa, apresentando os conceitos e estudos prévios que embasam o desenvolvimento do trabalho. Este capítulo aborda o histórico do processo de pintura industrial, as ferramentas de simulação aplicadas à indústria e as técnicas de otimização de linhas de produção, com o objetivo de fornecer o panorama teórico e prático para a análise e proposição de melhorias na linha de pintura.

2.1 HISTÓRICO DO PROCESSO DE PINTURA INDUSTRIAL

O processo de pintura industrial evoluiu significativamente ao longo do tempo, transformando-se de métodos manuais em sua maior parte para processos altamente automatizados. Inicialmente, as técnicas de pintura eram mais rudimentares, focando na aplicação de anticorrosivos e tintas de forma básica, conforme descrito por Ribeiro e Greca (2003) ao analisar a evolução das simulações computacionais na educação química, o que pode ser transposto para a evolução dos processos industriais. Esses autores já apontavam para procedimentos de preparação de superfície do aço e aplicação de camadas protetoras e estéticas, principalmente na indústria automotiva.

Com o avanço tecnológico, a indústria testemunhou a introdução de inovações como a pintura eletrostática e o uso de robôs, que revolucionaram a eficiência, a qualidade e a padronização do processo. A automação não apenas otimizou a aplicação de tintas e vernizes, mas também permitiu um controle mais preciso das etapas, garantindo maior proteção e durabilidade aos produtos industriais, ao mesmo tempo em que aprimora o acabamento estético. Essa evolução é um reflexo da busca contínua por processos mais eficientes e sustentáveis na manufatura.

2.2 FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO NA INDÚSTRIA

O advento da digitalização tem impulsionado a adoção de softwares de simulação e modelagem na indústria, facilitando a compreensão, detecção e tomada de decisões em relação a gargalos e problemas de concepção, tanto em linhas de operação existentes quanto no planejamento de novas instalações. A simulação

computacional é reconhecida como uma tecnologia habilitadora da Indústria 4.0, essencial para a tomada de decisões dinâmicas e automáticas em sistemas de manufatura inteligentes, especialmente diante da crescente variabilidade de produtos e da redução dos tamanhos de lote, o que gera cadeias e processos cada vez mais complexos.

O software de simulação ARENA tem sido amplamente utilizado na simulação de linhas de produção, permitindo a determinação de restrições, a análise de probabilidade do processo e a simulação de diferentes cenários para avaliar suas consequências na entrega e eficiência da linha. Um estudo de Paniago, Silveira e Zeuri (2024) exemplifica essa aplicação em uma empresa fabricante de plástico, onde o ARENA foi fundamental para identificar gargalos e propor melhorias.

Considerado uma ferramenta robusta, o *Tecnomatix Plant Simulation* é reconhecido por sua capacidade de modelar, simular, analisar, visualizar e otimizar sistemas de produção e processos logísticos. Ele permite aos usuários detectar e eliminar problemas nos sistemas de produção, contribuindo diretamente para a eficiência operacional. Além disso, a obra '*Tecnomatix Plant Simulation: Modeling and Programming by Means of Examples*', de Steffen Bangsow (2010), oferece uma introdução sistemática ao desenvolvimento de modelos de simulação, com mais de 200 exemplos práticos, tornando-o acessível tanto para usuários experientes quanto para iniciantes. Fernandes (2009) também destaca a utilização do *Plant Simulation* para a visualização, controle e otimização de processos no formato de modelos que podem evoluir para gêmeos digitais. Um estudo de Silva, Ferrer, Amici e Camusso (2022) utilizou o *Plant Simulation* e seu *Experiment Manager* para otimizar um processo produtivo hipotético, resultando em um ganho de produtividade de aproximadamente 20%. Gonzales (2021) aplicou o *Plant Simulation* para virtualização e simulação de processos produtivos em um setor de lentes, obtendo um modelo virtualizado com uma diferença de 1,07% em relação ao modelo real.

Já avaliando a utilização de softwares como Jack e Delmia, as ferramentas são mais focadas na simulação de atividades humanas, permitindo a avaliação de cargas físicas de trabalho e a aplicação de ferramentas ergonômicas em ambientes reais e digitais, como na indústria aeronáutica. Diniz (2014) realizou um estudo comparativo da aplicação de ferramentas como RULA e Snook e Ciriello em ambientes real e digital usando os softwares Delmia e Jack, concluindo que esses

softwares podem auxiliar na análise ergonômica, enquanto o NIOSH teve resultados discrepantes.

A integração de ferramentas como o *Plant Simulation* com *S7-PLCSIM Advanced* e *TIA Portal Step 7*, conforme abordado por Sobrino et al. (2019), evidencia os benefícios do comissionamento virtual, incluindo a redução de tempo, flexibilidade e mitigação de riscos em ambientes industriais. Pasianotto et al. (2023) também analisam a simulação como uma tecnologia habilitadora fundamental para os Digital Twins, sendo a chave para um DTS bem-sucedido, pois seus resultados dependem da confiabilidade das simulações e da precisão dos modelos utilizados. Pozzebon (2020) também propõe um modelo de simulação na indústria automotiva usando a linguagem C# para otimizar a produção e a qualidade sem testes físicos, destacando a simulação como uma ferramenta importante da Indústria 4.0.

2.3 OTIMIZAÇÃO DE LINHAS DE PRODUÇÃO

A otimização de linhas de produção é um esforço contínuo na indústria de manufatura, buscando garantir maior eficiência, redução de custos e aumento da produtividade. A complexidade crescente das cadeias produtivas, impulsionada pela personalização de produtos e tamanhos de lote menores, exige sistemas de gerenciamento de produção que lidem com maior variabilidade.

A dissertação de Marcelo da Silva Meira (2015) explora o uso da Programação Linear Inteira Mista (MILP) para otimizar a produção em uma linha de montagem mista na indústria automotiva, focando no balanceamento da linha e na melhoria da eficiência.

Eliton Smith dos Santos (2014), em sua dissertação de mestrado, demonstra como a simulação computacional, utilizando o *Tecnomatix Plant Simulation 9.0*, pode auxiliar na tomada de decisões em processos industriais complexos, contribuindo para a minimização de custos e maximização de lucros.

Um estudo de caso em uma indústria de produtos médicos, apresentado por Amorin, Rodrigues e Silva Junior (2020), mostra a aplicação de ferramentas de melhoria de processo e adequação de layout para aumentar a eficiência produtiva, resultando em redução de tempo de processo e aumento da produtividade.

Barino e Cunha (2024) realizaram um estudo de caso em uma manufatura no setor de pneumáticos, otimizando a área de armazenagem para abastecimento da

linha de produção através do rearranjo do layout, o que contribuiu para a redução do tempo ocioso de máquinas, pessoas e materiais, e o aumento da capacidade de estocagem.

Esses exemplos demonstram a importância da simulação e de abordagens sistemáticas para identificar e solucionar ineficiências em linhas de produção, especialmente em processos interdependentes como os encontrados em linhas de pintura.

2.4 ESTUDOS DE CASO EM AMBIENTES INDUSTRIAIS

A aplicação prática de modelos de simulação em ambientes industriais tem se mostrado uma ferramenta valiosa para otimização e tomada de decisão. A dissertação de Bruna Pozzebon (2020) propõe um modelo de simulação na indústria automotiva como ferramenta da Indústria 4.0, com o objetivo de otimizar a produção e a qualidade do produto sem a necessidade de testes no processo produtivo real.

Outro estudo relevante é a implementação de um sistema de controle de WIP (*Work in Process*) em uma linha de montagem industrial, que destaca o uso do software *Tecnomatix Plant Simulation* para otimização. Essa pesquisa, realizada por Santos (2024), demonstra como a simulação computacional foi utilizada para determinar o tamanho ideal dos WIPs, aplicar o controle de FiFo, e reduzir gargalos, resultando em ganhos de produtividade, redução de ociosidade e aumento da eficiência da linha.

Ainda no contexto de DTS, estudos de caso e aplicações práticas são essenciais para validar os benefícios teóricos. Pasianotto et al. (2023) revisaram artigos científicos para identificar otimizações aplicáveis a um gêmeo digital já existente de um grande fabricante de autopeças. Eles destacam que a literatura ainda possui um número limitado de trabalhos focados na implementação de gêmeos digitais em indústrias reais, com a maioria dos estudos se baseando em testes de laboratório ou simulações. No entanto, estudos como o de Santos et al. (2020), que propõe uma ferramenta de suporte à decisão com DTS usando simulação e previsão para otimizar o planejamento operacional, mostram resultados concretos, incluindo uma economia de aproximadamente 100 horas anuais através da otimização de rotas de suprimento. Tliba et al. (2022) também abordam a programação dinâmica resiliente em um *flow shop* híbrido, utilizando um DT para adaptar e processar mudanças em

tempo real, o que pode ser de grande valor para a otimização de linhas de produção complexas.

A aplicação de modelos de simulação para lidar com a desordem na produção, impulsionada pela flexibilidade de mix, é explorada por Assad Neto et al. (2023). Eles propõem procedimentos para projetar, implementar e utilizar o gêmeo digital em organizações que enfrentam interrupções causadas pela flexibilidade, demonstrando a aplicação em um grande fabricante de autopeças automotivas, o que se alinha diretamente ao escopo deste trabalho. Graessler e Poehler (2018) propõem um *Digital Twin* como representação humana para comunicação e coordenação de tarefas, permitindo que o funcionário participe da tomada de decisões computacionais, o que pode aumentar a satisfação do trabalhador e a eficiência.

Além disso, a utilização do software ARENA para simular e analisar linhas de produção em empresas de médio porte fabricantes de plástico tem sido empregada para identificar gargalos e propor melhorias no processo industrial, como discutido no artigo "USO DE SOFTWARE DE SIMULAÇÃO PARA MELHORIA INDUSTRIAL". Esses estudos de caso reforçam a eficácia da simulação como ferramenta para aprimorar processos e tomar decisões estratégicas no ambiente industrial.

2.5 GÊMEOS DIGITAIS

A evolução da digitalização e da Indústria 4.0 trouxe à tona o conceito de Gêmeos Digitais (*Digital Twins* - DTs), que representam réplicas virtuais de objetos ou sistemas físicos. Proposto inicialmente por Michael Grieves em 2003 para o Gerenciamento do Ciclo de Vida do Produto (PLM), o conceito evoluiu e foi aplicado pela NASA em seus sistemas de voo para diagnósticos e prognósticos, garantindo operações seguras contínuas.

No contexto industrial, o *Digital Twin Shop Floor* (DTS), estabelecido por Tao e Zhang (2017), refere-se à réplica virtual de um chão de fábrica. Ele permite a interação entre o modelo digital e sua contraparte física, oferecendo vantagens como flexibilidade de produção, economia de custos e otimização de processos. Essa interação idealmente se baseia em um processo de percepção (dados do físico para o virtual) e um de controle (decisões do virtual para o físico).

A maturidade dos DTS permite que a parte virtual auxilie na tomada de decisões, utilizando dados do chão de fábrica para previsão e simulação. Pasianotto et al. (2023)

destacam que, dada a alta complexidade dos sistemas de produção devido a fatores internos e externos imprevisíveis, a capacidade do DT de auxiliar na tomada de decisões em tempo real ou até mesmo realizá-las autonomamente pode levar os fabricantes a um novo nível de eficiência, fortalecendo os benefícios da Indústria 4.0.

É crucial distinguir os diferentes níveis de maturidade de um modelo virtual em relação ao Gêmeo Digital completo. Em nosso trabalho, o modelo de simulação da linha de pintura se enquadra na categoria de Modelo Digital (*Digital Model* - DM), conforme a classificação de Fuller et al. (2020) e Pasianotto et al. (2023). Um DM é uma representação digital de um objeto físico (como um modelo matemático ou de simulação), caracterizado pela falta de troca automática de dados entre o modelo e o objeto físico. Isso significa que todos os dados são fornecidos manualmente ao DM. Portanto, alterações na linha de pintura real (objeto físico) não atualizam automaticamente a simulação; essas informações precisam ser inseridas manualmente.

A evolução de um Modelo Digital para um Gêmeo Digital completo passaria por estágios intermediários:

Digital Shadow (DS): Um DS já possui um fluxo de dados automático e unidirecional do objeto físico para o virtual. Quando os parâmetros do objeto físico mudam, o digital é automaticamente atualizado, mas o inverso não ocorre.

Digital Twin (DT - Gêmeo Digital completo): É o estágio mais avançado, onde os dados trafegam em ambas as direções, permitindo que as mudanças no mundo físico afetem o digital e vice-versa, conferindo ao modelo digital a capacidade de controlar o objeto real.

Este projeto se baseia na construção e otimização de um Modelo Digital robusto, que serve como fundação para uma futura implementação de um *Digital Shadow* ou *Digital Twin* completo.

As tecnologias habilitadoras que seriam fundamentais para a evolução em direção a um Gêmeo Digital completo incluem:

Internet das Coisas (IoT): Fundamental para a coleta e troca de dados em tempo real entre dispositivos interconectados. A IoT permite monitoramento e controle em tempo real, rastreamento de ativos, manutenção preditiva, monitoramento de consumo de energia e supervisão da segurança no ambiente de trabalho. A integração de IoT com ambientes industriais resulta na IIoT (*Industrial Internet of Things*), otimizando processos e permitindo o monitoramento do chão de fábrica em tempo

real. Kuts et al. (2019) conduziram um estudo de caso sobre a sincronização de modelos virtuais e físicos de DTs usando um *middleware* IIoT.

RFID (*Radio-Frequency Identification*): Tecnologia baseada em comunicação sem fio que utiliza etiquetas e leitores para identificar e monitorar objetos e ativos, sendo crucial para a IoT e para alimentar o DT com dados de posição de peças na linha de produção. Na fábrica de injetores diesel estudada por Pasianotto et al. (2023), as tags RFID são colocadas em contêineres de peças e aproximadas dos sensores pelos funcionários para rastreamento.

Inteligência Artificial (IA): Permite que sistemas tenham habilidades semelhantes às humanas, como aprender e interpretar informações, superando limitações de programas que apenas seguiam instruções. A IA pode ser usada para reconhecimento de imagens, linguagem, assistentes virtuais, resolução de problemas e tomada de decisões. Ma et al. (2021) propõem uma estrutura de DT aprimorada por IA, com pilares de percepção, controle e consistência de interação.

***Machine Learning* (Aprendizado de Máquina):** Subcampo da IA que constrói algoritmos e modelos baseados em dados, sem programação explícita, para reconhecimento de padrões e tomada de decisões. É sugerido para prever parâmetros como vida útil de equipamentos, resultados de produção e custos energéticos.

Redes Neurais (*Neural Networks*): Algoritmos computacionais que processam informações como o cérebro humano, aprendendo a partir de dados rotulados ou não rotulados. Podem ser usadas para prever valores de índices de avaliação e gerar estratégias de controle em DTs aprimorados por IA.

***Big Data*:** Dada a grande quantidade de informações trocadas no DT, o Big Data é crucial para permitir avaliações em tempo real e lidar com a complexidade de gerenciar grandes conjuntos de dados. A fusão de dados é uma técnica comum em DTs para melhorar a confiabilidade dos dados, combinando informações de diversas fontes.

Realidade Aumentada (RA) e Realidade Virtual (RV): Embora não sejam tecnologias habilitadoras chave, RA permite a visualização e interação entre o mundo físico e digital simultaneamente, enquanto RV pode simular a linha de produção para interação ou monitoramento remoto. Kuts et al. (2019) utilizaram RV como complemento ao DT para colaboração e monitoramento remoto de sistemas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Nesse tópico, será abordada a classificação desse trabalho quanto ao tipo de pesquisa e seu objetivo, sua abordagem e procedimento a ser seguido. Além disso, será descrita a metodologia para a coleta e análise de dados, bem como o passo a passo a ser seguido após a análise de resultados

3.1 NATUREZA DA PESQUISA

Essa dissertação é de natureza aplicada, já que esta pesquisa está direcionada para a aplicação de conceitos teóricos de engenharia mecânica em uma linha real de pintura, logo, o intuito é de analisar os dados da linha de produção e com base nos resultados deste estudo é elaborada uma solução por meio de simulação de software computacional.

A pesquisa de natureza aplicada tem como objeto de estudo problemas presentes dentro das atividades de instituições ou organizações e está dedicada na elaboração de diagnósticos, identificação de gargalos e na procura por soluções. Assim, este tipo de estudo pode ser definido como um conjunto de atividades em que conhecimentos previamente obtidos são utilizados para coleta, seleção e processamento de dados, com a finalidade de obter ou confirmar resultados. Ou seja, o objetivo principal deste tipo de pesquisa é gerar conhecimentos para aplicações práticas voltadas para problemas específicos (Tatiane; 2024; Fleury; Werlang, 2017; Prodanov; Freitas, 2013)

3.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Sobre os objetivos dessa pesquisa, foi classificada como uma pesquisa exploratória, em que busca encontrar ideias e intuições, com o objetivo de obter mais informações sobre o fenômeno pesquisado, mas sem a necessidade de formulação de hipóteses nestes tipos de estudos. Uma pesquisa exploratória possibilita aumentar o conhecimento do pesquisador sobre os fatos, permitindo formular problemas mais precisos e realização de pesquisas mais estruturadas e detalhadas (Oliveira, 2011; Prodanov; Freitas, 2013).

3.3 ABORDAGEM DA PESQUISA

Em relação à abordagem, essa dissertação foi classificada como pesquisa quantitativa, em que se deve formar hipóteses e classificar a relação entre as variáveis, garantindo a precisão dos resultados, evitando ideias contraditórias no processo de análise e interpretação. De forma que quantifique os dados e generalize os resultados da amostra para os interessados. A pesquisa quantitativa considera que tudo pode ser mensurável ou quantificável, descrevendo traduzir em números as opiniões e informações para classificação e análise, identificando relações de causa-efeito entre os fenômenos descritos.

É fundamental ressaltar que a simulação elaborada neste trabalho representa um Modelo Digital da linha de produção. Conforme a classificação de Fuller et al. (2020) e Pasianotto et al. (2023), um modelo digital é uma representação virtual de um objeto físico onde a troca de dados entre o modelo e o objeto físico é realizada manualmente. Isso significa que, para que a simulação se aproxime à linha de pintura real, os dados operacionais são obtidos e inseridos no modelo de forma manual. No escopo atual do trabalho, não há uma conexão automática e em tempo real que permita que as alterações no ambiente físico sejam automaticamente atualizadas no modelo virtual, como poderia acontecer em um Digital Shadow (DS) ou um Gêmeo Digital (Digital Twin - DT). Portanto o enfoque deste trabalho é na precisão da representação e na análise baseada em dados empíricos, visando a evolução da maturidade digital do processo no futuro.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DA LINHA DE PINTURA

O processo de manufatura abordado consiste em uma linha de pintura composta por quatro sublinhas principais: pré-tratamento, selante, aplicação de primer e aplicação de tinta. Esta linha possui um sistema de produção empurrada, de demanda variável e é caracterizada como um processo de pintura semiautomático.

Cada sublinha apresenta características específicas relacionadas a etapas do processo produtivo:

Pré-tratamento: Processo automático, apenas com alimentação manual que realiza a remoção de graxas e óleos das peças e a preparação do metal base aplicando uma camada de cristais de fosfato de zinco e outra camada de primer e-

coat, depositado pelo processo eletroforético, no qual é aplicada uma diferença de potencial entre o substrato (peça) e a cobertura (o próprio *e-coat*, em meio aquoso) e essa diferença de potencial realiza a adesão dos componentes.

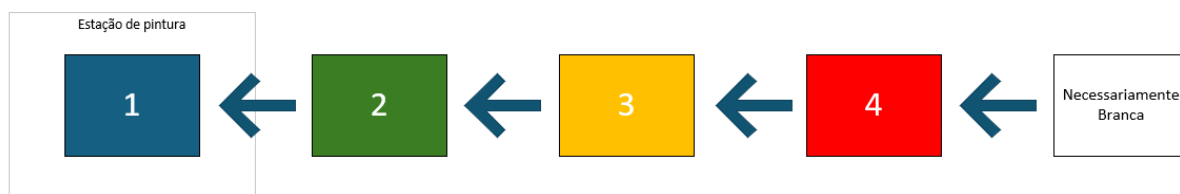
Selante: processo manual responsável pela aplicação do material vedante, garantindo a proteção contra poeira e água.

Aplicação de primer: Etapa de pintura robotizada que prepara a superfície para receber a tinta final. Conta com duas estações de aplicação, com quatro robôs em cada uma.

Aplicação de tinta: última etapa, onde são aplicadas as tintas, além de verniz para acabamento de tintas de cor metálica. Assim como na aplicação de primer, conta com duas estações de aplicação automática, com quatro robôs em cada uma.

Para a aplicação de tinta é utilizado um equipamento denominado *Supply-P*, responsável pelo *set-up* das diferentes cores para pintura carregando latas de 18 litros de tinta em gabinetes, que enviam a tinta para os robôs de aplicação. O *Supply-P* é utilizado apenas para cores diferentes do branco, pois essa cor, por ser o maior volume, tem seu carregamento feito diretamente de um contentor de 1000 litros até o robô, sem a necessidade de *set-up* manual. Para atender as demandas de produtos coloridos atualmente estão instalados 4 gabinetes do *Supply-P* com um tempo de *set-up* de cada um de 25 minutos, o que limita a pintura de consecutivos produtos coloridos em no máximo 4 seguidos, tendo a necessidade de pintar um produto branco na sequência, como mostrado abaixo:

FIGURA 2 – RESTRIÇÃO DE PINTURA DE PEÇAS COLORIDAS



FONTE: Os autores (2025).

Ao final de cada sublinha há uma estação de inspeção relacionada ao processo que acaba de ser realizado. Essas inspeções são realizadas manualmente por operadores treinados nos respectivos processos.

Para melhor compreensão do processo, será traçado um fluxograma para visualização de cada etapa da linha de montagem de forma global, o qual é composto por máquinas de montagem semiautomáticas, máquinas de testes funcionais e algumas realizadas 100% manualmente, conforme descrito anteriormente na figura 1. Esse fluxograma é mostrado no APÊNDICE 1

A capacidade produtiva da linha é projetada para atender às demandas de produção, contando com buffers intermediários para balanceamento da linha sem paradas no processo produtivo.

A produção conta com oito modelos principais, os quais variam tempos de processamento por conta do tamanho do produto. Para efeito da condução desse trabalho, serão consideradas duas famílias de cores possíveis: cores sólidas e cores metálicas, como mostradas abaixo, respectivamente:

FIGURA 3 - CORES SÓLIDA E METÁLICA



FONTE: Os autores (2024)

As principais diferenças entre essas cores são: a tecnologia das tintas e a característica de processamento na aplicação. A tecnologia diz respeito aos componentes de cada tinta, enquanto tintas de cores sólidas já possuem verniz em sua composição, tintas metálicas contém apenas o pigmento e pós-metálicos (denominada tinta base), sendo necessária a aplicação de verniz posteriormente. Nesse sentido a diferença de processamento na aplicação se dá justamente por essa

necessidade de uma segunda aplicação. Portanto, uma peça de cor sólida tem somente uma aplicação na sublinha de aplicação de tinta, enquanto veículos de cores metálicas precisam passar duas vezes na mesma linha, uma para a aplicação da tinta base e outra para aplicação de verniz.

Sendo assim, nesse trabalho serão consideradas 16 configurações possíveis de processo, considerando modelos e cores.

3.5 COLETA E ANÁLISE DE DADOS

Os dados para a simulação e análise da linha de pintura foram coletados diretamente no ambiente industrial, por meio de uma combinação de medições em linha, análise de relatórios de produção gerados por sistemas internos da empresa e entrevistas com operadores e responsáveis pelos processos. As principais variáveis levantadas, cruciais para a construção de um modelo fidedigno, incluíram:

Tempos de processamento por sublinha: Medições cronometradas do tempo necessário para cada etapa nas sublinhas de pré-tratamento, selante, aplicação de primer e aplicação de tinta. Para garantir a precisão, foram realizadas 5 tomadas de tempo para cada posto de trabalho, e a média desses tempos será utilizada como tempo de ciclo para a simulação. Equipamentos de supervisão, como cronômetros digitais, foram empregados para assegurar a exatidão das medições. As tabelas detalhadas com os tempos por estação para fosfato, *e-coat*, selante, primer e aplicação de tinta estão apresentadas no capítulo 5.2.

Taxas de recirculação: Especialmente críticas na sublinha de aplicação de tinta, onde veículos com cores metálicas necessitam de múltiplas passagens para a aplicação da tinta base e do verniz. Esses dados foram coletados para entender o fluxo de reentrada e seu impacto na capacidade da linha.

Capacidades de operação e produtividade: Informações sobre a capacidade máxima de produção projetada da linha e o rendimento atual, incluindo a presença e função dos buffers intermediários para balanceamento do fluxo.

Métricas de desempenho: Dados de disponibilidade, MTTR (*Mean Time To Repair*) e MTBF (*Mean Time Between Failures*) para os equipamentos, obtidos de relatórios mensais de OLE (*Overall Line Effectiveness*), que incluem informações sobre disponibilidade, performance e qualidade.

Mix de produtos: Detalhes sobre os três modelos de produto, oito variantes principais (como altura e largura) e, crucialmente, as duas famílias de cores (sólidas e metálicas). A distinção entre cores sólidas (uma aplicação de tinta) e metálicas (duas aplicações, incluindo verniz) é um fator determinante para a recirculação e será detalhadamente considerada na coleta.

A análise desses dados permitiu identificar os tempos de ciclo reais de cada posto de trabalho e os intervalos de trabalho, fornecendo a base empírica para a modelagem fiel da linha no ambiente de simulação.

Para a elaboração do Value Stream Map (VSM), o processo seguiu uma abordagem de mapeamento detalhado do fluxo de valor. Inicialmente, o mapeamento será feito através de observações diretas no chão de fábrica e entrevistas com operadores e supervisores, para capturar o fluxo de materiais e informações, tempos de ciclo, tempos de espera, e as atividades com e sem valor agregado. Em seguida, os dados coletados (tempos de processamento, estoque em processo, tempos de setup etc.) foram organizados para construir o VSM atual da linha de pintura, destacando visualmente as perdas e os gargalos. Este mapeamento é fundamental para a compreensão aprofundada do sistema, servindo como uma representação visual clara para a identificação de pontos críticos e a posterior transposição para o ambiente de simulação. Os VSMs são apresentados em detalhes na seção 5.1 deste trabalho

3.6 MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Com base nos dados coletados, a linha de pintura será modelada utilizando o *software* de modelagem e simulação computacional *Tecnomatix Plant Simulation* 2302. A escolha deste *software* se deu pela sua capacidade de lidar com sistemas de produção complexos, como o presente, que envolvem diferentes sublinhas e variações de processo. O modelo digital será construído para representar cada sublinha — pré-tratamento, selante, aplicação de primer e aplicação de tinta — como uma entidade distinta, configurada com parâmetros de processo que replicam o mais fielmente possível a linha real. É importante salientar que esta modelagem representa um modelo digital (*Digital Model* - DM) da linha de produção, pois os dados são inseridos manualmente na simulação, não havendo uma conexão automática e em tempo real com a linha de produção física.

FIGURA 4 - ELEMENTOS UTILIZADOS PARA CONSTRUÇÃO DA SIMULAÇÃO

Categoria	Componentes	
Fluxo de Material		<i>Drain</i>
		<i>Source</i>
		<i>EventController</i>
		<i>Assembly</i>
		<i>Machine</i>
		<i>Buffer</i>
Recursos de Objetos		<i>ShiftCalendar</i>
		<i>ExperimentManager</i>
		<i>Table</i>
		<i>Graph</i>
		<i>Method</i>
		<i>Variable</i>

FONTE: Os autores (2025).

De forma mais abrangente, é mostrado na Figura 3, os componentes utilizados para a modelagem da linha no *Plant Simulation*, com a descrição dos componentes do software abaixo:

Os principais componentes do software utilizados na modelagem incluem: *Source* (para entrada de peças), *Drain* (para saída), *Assembly* (para processos de montagem ou união), *Machine* (para as estações de trabalho), *Buffer* (para estoques intermediários), *Connectors* (para fluxos), *Shift Calendar* (para gestão de turnos) e *Event Controller* (para controle da simulação).

Os parâmetros operacionais inseridos no modelo para garantir a precisão do modelo digital foram:

Tempo de ciclo (TC): Média dos tempos cronometrados em cada posto, conforme detalhado na seção 3.5.

Taxa de rejeição: Dados de qualidade da linha que impactam o fluxo de produtos.

Gargalos: Pontos de restrição identificados que afetam a capacidade da linha.

FTT (*First Time Through*): Taxa de produtos que passam por todas as etapas sem necessidade de retrabalho.

A modelagem considerou as conexões e interdependências entre as sublinhas (pré-tratamento, selante, aplicação de primer, aplicação de tinta e aplicação de verniz), refletindo o fluxo complexo do processo produtivo.

3.7 VALIDAÇÃO DO MODELO

O modelo passará por testes para assegurar que reproduz fielmente o funcionamento da linha, comparando o resultado de saída, os percentuais de falha e a disponibilidade com os dados de produção diária. Com as disparidades do modelo versus realidade serão realizados ajustes necessários para melhorar a precisão do modelo, de forma a aumentar a confiabilidade da simulação. Esta etapa de validação, que compara a saída do modelo digital com a realidade, é fundamental para garantir a fidedignidade da simulação, mesmo quando os dados são inseridos manualmente.

A validação do nosso modelo digital é um processo contínuo que assegura que a representação virtual se aproxima da realidade da linha de pintura. É importante ressaltar que, embora este trabalho não envolva a criação de um Digital Shadow ou Digital Twin completo (onde a alimentação de dados seria automática e em tempo real), a validação rigorosa do Modelo Digital é um passo crucial. Ela confirma que as entradas manuais de dados (coletadas conforme descrito na seção 3.5) são suficientes para gerar um comportamento simulado que mimetiza de perto o desempenho da linha real. Dessa forma, as análises e as propostas de otimização geradas pelo modelo são confiáveis e podem embasar decisões estratégicas para o aprimoramento do processo produtivo.

3.8 IDENTIFICAÇÃO DE GARGALOS

A fase de identificação de restrições é um passo crucial no processo de otimização de linhas de produção, pois o foco em pontos críticos permite direcionar os esforços de melhoria de forma mais eficaz. A partir da simulação

do modelo digital da linha de pintura no cenário "AS-IS" (estado atual), foram utilizados diversos parâmetros para identificar as principais restrições.

Conforme discutido por Paniago, Silveira e Zeuri (2024), a simulação de linhas de produção, como a realizada com o software ARENA, é uma ferramenta eficaz para a determinação de restrições. No nosso caso, o *Tecnomatix Plant Simulation* permitiu uma análise aprofundada dos dados operacionais. Os principais parâmetros considerados para a identificação do gargalo incluíram:

a) Tempos de Espera e Filas (WIP): A formação de longas filas de produtos antes de uma estação indica que essa estação não consegue processar os itens na mesma velocidade em que são entregues, caracterizando uma restrição. O acúmulo de WIP (Work In Process) a montante de uma estação, conforme observado na seção 5.3, é um forte indicador de restrição. Este aspecto é fundamental, pois o excesso de WIP é considerado um desperdício que impacta negativamente o lead time e a qualidade dos produtos, gerando insatisfação dos clientes;

Taxa de Ocupação/Utilização de Recursos: Estações com alta taxa de utilização de equipamentos e mão de obra, operando próximas ou acima de sua capacidade por longos períodos, são candidatas a restrições;

Tempo de Ciclo da Estação: A estação com o maior tempo de ciclo pode ditar o ritmo de toda a linha, atuando como um "divisor de águas" para a capacidade produtiva;

A Teoria das Restrições (TOC) será a metodologia utilizada para guiar a identificação desse ponto de restrição, ou seja, o ponto que limita a eficiência global da linha;

3.9 PROPOSTAS DE OTIMIZAÇÃO

A partir da análise detalhada das restrições identificadas na seção 3.8, serão desenvolvidas e simuladas diferentes possibilidades de melhoria. O objetivo principal dessas propostas é aliviar as restrições e, conseqüentemente, aumentar a capacidade produtiva, reduzir os tempos de ciclo e aprimorar a eficiência geral da linha de pintura. A simulação do modelo digital, como o desenvolvido neste trabalho, permite testar e avaliar o impacto de diferentes cenários de melhoria sem a necessidade de intervenções físicas disruptivas na linha real.

As propostas de otimização serão concebidas para abordar as causas-raiz das restrições e maximizar o fluxo do sistema, seguindo a lógica da Teoria das Restrições (TOC). As possibilidades de melhoria consideradas e que serão simuladas incluem:

- a) Aumento da Capacidade das Estações: Esta proposta envolve a expansão ou reconfiguração de recursos nas estações que forem identificadas como restritivas para aumentar sua capacidade de processamento. Isso poderia incluir por exemplo a otimização dos percursos de programação ou a implementação de tecnologias de secagem ou aplicação mais rápidas, embora os detalhes específicos da intervenção sejam definidos em estudos posteriores após a definição da estação gargalo;
- b) Diminuição do Tempo de Ciclo em Estações Críticas: Análise e otimização dos parâmetros de processo nas estações que apresentarem os maiores tempos de ciclo ou forem identificadas como restrições. Isso pode envolver ajustes na velocidade dos transportadores, otimização dos tempos de processamento, ou a redução de tempos de *setup* (conforme sugerido por Pozzebon (2020) na seção 4.1.2 do seu trabalho), com foco em todos os modelos e variantes;
- c) Otimização do Mix de Produção: Investigação de como o sequenciamento da produção (mix de modelos e variantes) pode ser otimizado para minimizar o impacto em estações restritivas. A simulação permitirá estressar as restrições sob diferentes combinações de parâmetros (modelo e variantes), avaliando o desempenho da linha para identificar a configuração de mix mais eficiente;
- d) Balanceamento da Linha: Testar a redistribuição de tarefas entre as estações de trabalho para garantir um fluxo mais uniforme e eliminar períodos de inatividade, contribuindo para a redução da ociosidade dos colaboradores e o tempo de processo, conforme o estudo de Amorin, Rodrigues e Silva Junior (2020).

Para testar a efetividade dessas propostas e avaliar os cenários, o *Experiment Manager* do software *Tecnomatix Plant Simulation* será utilizado. Esta ferramenta avançada, destacada por Silva, Ferrer, Amici e Camusso (2022) por permitir ganhos de produtividade e otimizar diversos parâmetros de uma vez só, é o mecanismo central para a teste de diferentes configurações da linha.

A configuração do *Experiment Manager* será realizada da seguinte forma:

a) Variáveis de Entrada: Serão variados parâmetros críticos das estações que forem identificadas como restritivas, além do mix de modelos e variantes que impactam as operações em toda a linha. A identificação de quais equipamentos e quais as famílias de produtos mais impactam as restrições será refinada durante as fases iniciais dos experimentos, mas os parâmetros gerais de variação incluem:

- Mix de Modelos: Variações nas proporções dos 8 modelos de veículos, que impactam os tempos de ciclo em diversas estações da linha;
- Mix de Variantes:
 - o Pré-tratamento: Esta sublinha não apresenta diferença no tempo de operação independentemente da variante;
 - o Selante: Os tempos de operação variam significativamente de acordo com os produtos;
 - o Aplicação de Tinta: Os tempos de operação variam consideravelmente com a variante de cor (sólida vs. metálica), sendo que as cores metálicas exigem maior tempo e recirculação;
- Variação de Tempos de Ciclo Específicos: Serão testados cenários de redução percentual nos tempos de ciclo das estações consideradas restritivas e das estações que mais impactam essas restrições, identificadas após as análises preliminares da simulação "AS-IS".

b) Tipos de Experimentos (Famílias de Cenários):

- Experimento "Absoluto": Focado nas estações que forem sensíveis à variante e/ou modelo, este experimento alterará o percentual das variantes no mix de produtos, mantendo a proporção dos 8 modelos de veículos inalterada. O objetivo é entender o impacto direto de uma variante específica sobre as restrições, sem alterar a demanda por modelos específicos;
- Experimento "Real": Neste cenário, o percentual da variante específica será variado no mix, mas a proporção dos modelos de veículos não será mantida, refletindo uma demanda mais orgânica e menos controlada de produtos. Isso simula uma situação mais próxima das

flutuações reais de mercado, de acordo com o forecast que será apresentado no capítulo 5.4.

- Experimento "Teórico": Este experimento visa identificar qual modelo de veículo (do 1 ao 8) e/ou qual variante (0% ou 100% da variante) mais impacta as estações, especialmente as restrições. O objetivo é isolar o impacto de modelos e variantes específicos para identificar os "vilões" da eficiência, permitindo um direcionamento mais preciso das futuras otimizações.

A avaliação da efetividade das propostas de otimização é um passo fundamental para garantir que as mudanças sugeridas gerem os resultados desejados. A partir das medidas a serem inseridas na simulação, será possível verificar se as mudanças propostas para otimização da linha foram efetivas. Os critérios de avaliação utilizados para analisar o desempenho da linha de pintura sob os cenários propostos incluem:

- a) Aumento da Capacidade Produtiva (UPH - Units Per Hour): Medir o volume de produtos que a linha é capaz de processar por unidade de tempo após a implementação das melhorias propostas. O objetivo é aumentar o *throughput* da linha;
- b) Redução dos Tempos de Espera: Analisar a diminuição do tempo que os produtos ficam parados em filas (WIP) ou em *buffers* antes de serem processados pela próxima estação. A minimização dos tempos de espera diretamente contribui para a fluidez do processo e balanceamento da linha;
- c) Redução da Taxa de Ocupação das Restrições: Verificar se a implementação das melhorias diminui a taxa de utilização das estações identificadas como restritivas, indicando que a restrição está sendo aliviada e que o fluxo de produção está mais balanceado;

As simulações computacionais permitem a avaliação quantitativa desses critérios, fornecendo dados concretos para embasar as recomendações práticas e assegurar que as propostas de otimização sejam eficazes. Os resultados dessa avaliação serão apresentados e discutidos no Capítulo 5

4 PLANEJAMENTO

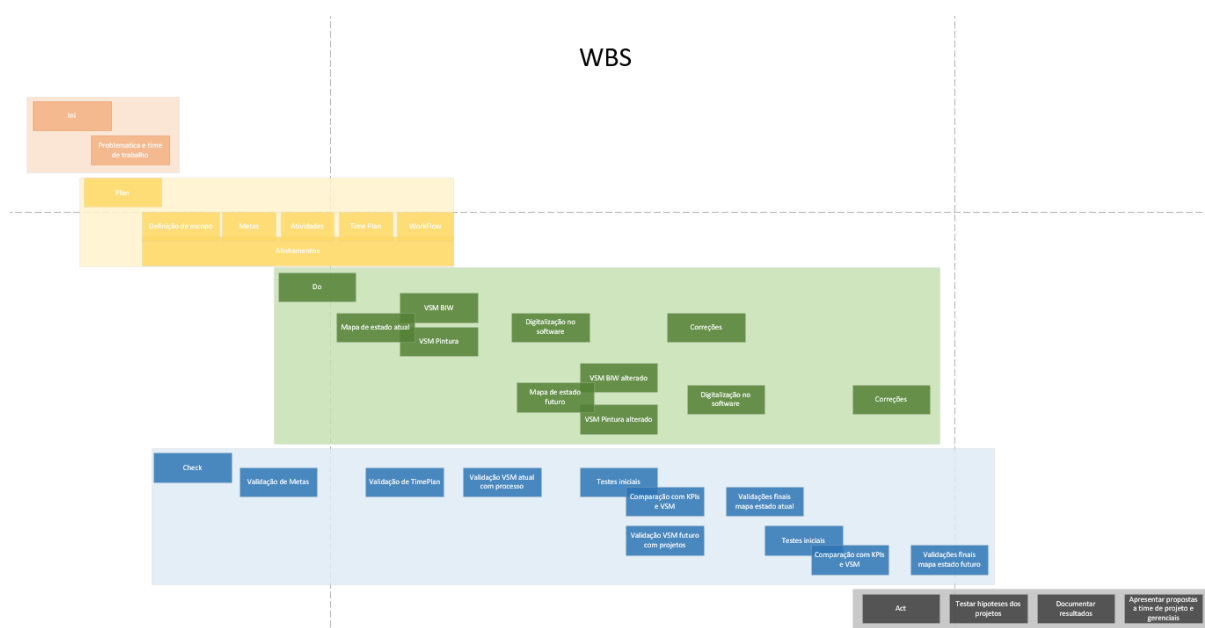
O planejamento de um projeto é uma das fases mais cruciais para o seu sucesso, especialmente quando se trata de otimização de processos industriais, como no caso do desenvolvimento de uma simulação de fluxo de processos nas linhas de solda e pintura. Para garantir que as alterações propostas no fluxo de trabalho sejam eficazes, é essencial que o planejamento seja detalhado, claro e bem fundamentado, de modo a permitir uma análise profunda das hipóteses e possíveis cenários resultantes das modificações. Este capítulo detalha os principais componentes do planejamento para o desenvolvimento de uma simulação, considerando o *Value Stream Mapping* (VSM) como base de análise, bem como o uso de ferramentas como o caminho crítico do projeto e o *time plan*.

O objetivo central deste planejamento é elaborar uma simulação do fluxo de processos das linhas de solda e pintura, usando o VSM como ponto de partida. Através dessa simulação, será possível testar diferentes hipóteses relacionadas a modificações dessas linhas, como mudanças de layout, redução de tempos de espera, aumento da eficiência e eliminação de gargalos. A simulação fornecerá informações valiosas que poderão ser usadas para a tomada de decisões e validação das propostas de melhoria.

4.1 ATIVIDADES E ENTREGÁVEIS

Para um planejamento assertivo e robusto, se faz necessário identificar os entregáveis e os steps que devem ser acompanhados para a conclusão do projeto. Podendo ser dividido em duas fases de execução, a fase de Alcance e Metodologias servirá como os passos até a primeira simulação AS-IS e a fase de Hipóteses e Modificações até a última simulação TO-BE.

FIGURA 5 - PLANEJAMENTO DE ATIVIDADES



FONTE: Os autores (2024)

Sendo assim, as atividades entregáveis são:

- Mapeamento do fluxo de valor (VSM);
- Simulação de fluxo da linha de pintura;
- Identificação de gargalos;
- Análise dos gargalos;
- Simulação de propostas de otimização.

4.1.1 Alcance e metodologias

O planejamento do projeto de simulação iniciou-se com a clara definição de seu escopo e das metodologias a serem empregadas. O alcance deste projeto limitou-se

ao mapeamento e simulação das linhas de produção de solda e pintura, englobando a análise do fluxo de processos, a identificação de pontos críticos e a proposição de melhorias. As metodologias, já citadas no capítulo anterior e resumidas a seguir, foram selecionadas por sua relevância na otimização de sistemas produtivos:

- a) *Value Stream Mapping* (VSM): Esta ferramenta será utilizada como ponto de partida para mapear o fluxo de valor de ambas as linhas de produção, desde a entrada de materiais até o produto. O VSM possibilitou a identificação visual dos tempos de ciclo, tempos de espera, perdas e, crucialmente, os gargalos presentes no processo, fornecendo uma base sólida para a simulação;
- b) Simulação de Processos: O cerne do planejamento reside na utilização de uma simulação computacional para modelar o fluxo de trabalho e testar diferentes cenários de melhoria. Conforme destacado por Randon e Ceccello (2019), a simulação é uma tecnologia habilitadora da Indústria 4.0, essencial para a tomada de decisões dinâmicas em sistemas de manufatura inteligentes, especialmente frente à crescente variabilidade de produtos e lotes menores;
- c) Teoria das Restrições (TOC): A TOC será aplicada para identificar o ponto de restrição do processo, ou seja, o gargalo que limita a eficiência global da linha. A partir da identificação do gargalo, serão testadas hipóteses para a eliminação ou mitigação de seu impacto, maximizando o fluxo do sistema.

4.1.2 Hipóteses de modificação

Com base na análise inicial do VSM, as hipóteses de modificação que serão avaliadas na simulação precisam ser definidas. O planejamento deve detalhar quais são as mudanças propostas e como elas poderão impactar o fluxo de processos.

Cada hipótese será ou poderá ser testada na simulação para avaliar sua viabilidade e impacto no desempenho global da linha de produção. A correta definição de quais testes realizar virão de demandas atuais de projetos ou resultados da avaliação da simulação AS-IS e seu VSM.

FONTE: Os autores (2024)

A identificação e monitoramento do caminho crítico são essenciais para assegurar que os prazos do projeto sejam cumpridos sem comprometer a qualidade dos resultados.

4.2.2 Time Plan

O *time plan* é a representação temporal das atividades do projeto e deve ser construído de forma a permitir o acompanhamento do progresso ao longo do tempo. Ele deve ser detalhado e incluir todas as fases do projeto, desde a coleta de dados até a apresentação dos resultados da simulação. Para o desenvolvimento da simulação, o *time plan* deve incluir:

Fase de Planejamento e Levantamento de Dados (2 semanas): Coleta de informações sobre os processos de Solda e Pintura, além de reuniões com as equipes envolvidas para entender os desafios atuais.

Fase de Construção do Modelo de Simulação (4 semanas): Desenvolvimento do modelo de simulação, incluindo a programação e integração de diferentes variáveis e parâmetros que influenciam os fluxos de produção.

Fase de Testes e Validação (3 semanas): Execução de testes na simulação, com ajustes baseados nos resultados preliminares e validação das hipóteses de modificação.

Fase de Análise e Resultados (2 semanas): Análise dos dados obtidos na simulação e elaboração do relatório com as recomendações para melhorias nas linhas de produção.

O *time plan* se encontra no APÊNDICE 2 e será monitorado regularmente para garantir que o progresso esteja dentro dos prazos estabelecidos, com ajustes no planejamento sendo feitos conforme necessário.

4.2.3 Gestão de Riscos

A gestão de riscos no planejamento é fundamental para antecipar problemas e definir estratégias de mitigação. Durante o desenvolvimento da simulação, os principais riscos incluem:

Coleta de Dados Incompletos ou Incorretos: A falta de dados precisos sobre os processos pode comprometer a qualidade da simulação. Para mitigar esse risco, será realizado um controle rigoroso de qualidade nas informações coletadas.

Erros na Construção do Modelo de Simulação: O modelo de simulação precisa ser fiel à realidade do processo, e erros na sua construção podem levar a resultados imprecisos. A validação do modelo será feita em várias etapas para minimizar esse risco.

Resistência à mudança: as propostas de modificações podem encontrar resistência por parte das equipes operacionais. Para mitigar esse risco, serão realizadas reuniões de alinhamento e comunicação para garantir que todos os envolvidos entendam os benefícios das mudanças.

5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos durante o desenvolvimento do projeto, abrangendo desde o mapeamento inicial da linha de produção até a simulação dos cenários de otimização. Os dados e análises aqui contidos fornecem uma visão abrangente do desempenho da linha de pintura e das oportunidades de melhoria identificadas.

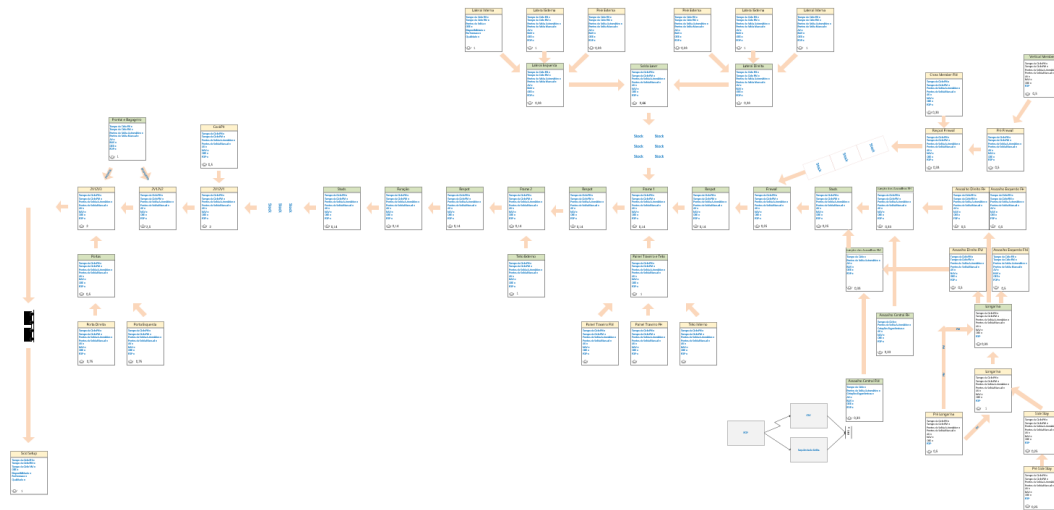
5.1 *VALUE STREAM MAPS (VSM)*

O Mapeamento do Fluxo de Valor (VSM) foi a ferramenta inicial utilizada para visualizar e analisar os processos de produção das linhas de solda e pintura. O VSM permitiu identificar os tempos de ciclo, tempos de espera, perdas e, crucialmente, os gargalos presentes no processo, fornecendo uma base sólida para a simulação. A seguir, são apresentados os VSMs das sublinhas da linha de solda e da linha de pintura.

5.1.1 *Value Stream Map Linha de Solda*

A linha de solda, que precede a linha de pintura, foi mapeada para entender seu fluxo e suas interdependências com a linha de pintura. A Figura 7 - FLUXOGRAMA LINHA DE SOLDA ilustra o processo de solda, que alimenta a linha de pintura com as peças. Embora não seja o foco principal deste trabalho, a compreensão do fluxo da solda é essencial para entender a entrada de peças na pintura e a possível formação de gargalos a montante.

FIGURA 7 - FLUXOGRAMA LINHA DE SOLDA



FONTE: Os autores (2025).

5.1.2 Value Stream Map Linha de Pintura

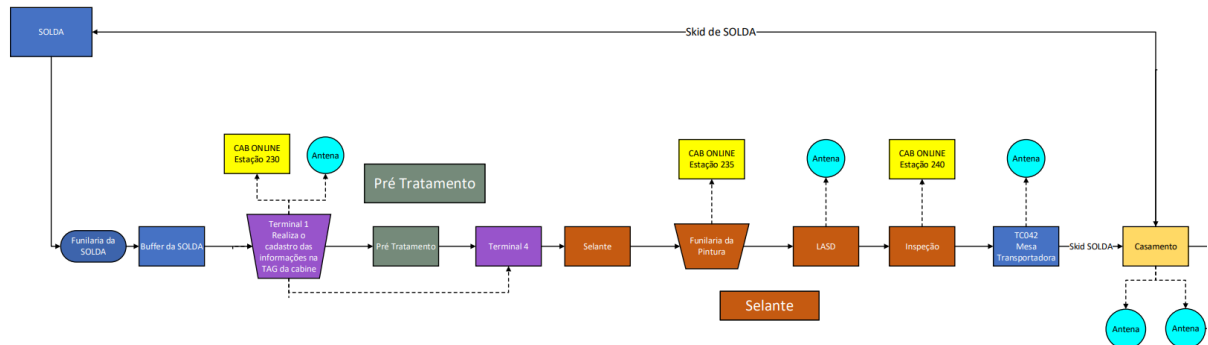
Como primeira entrega prevista o fluxograma da linha de pintura contemplando os processos de Pré-Tratamento, Selante, Aplicação de Primer e aplicação de tinta que é utilizado como esqueleto para a confecção dos VSMs.

A linha de pintura, o foco central deste trabalho, foi detalhadamente mapeada para a identificação de restrições. A primeira entrega prevista foi o fluxograma da linha de pintura, que contempla os processos de Pré-Tratamento, Selante, Aplicação de Primer e Aplicação de tinta, servindo como esqueleto para a confecção dos VSMs.

A Figura 8 - FLUXOGRAMA PRÉ-TRATAMENTO/ECOAT E SELANTE apresenta o fluxo mapeado da linha de Pré-Tratamento e Selante, que são as primeiras etapas antes da aplicação da tinta. Este fluxograma é fundamental para visualizar a sequência das operações e a interligação entre elas.

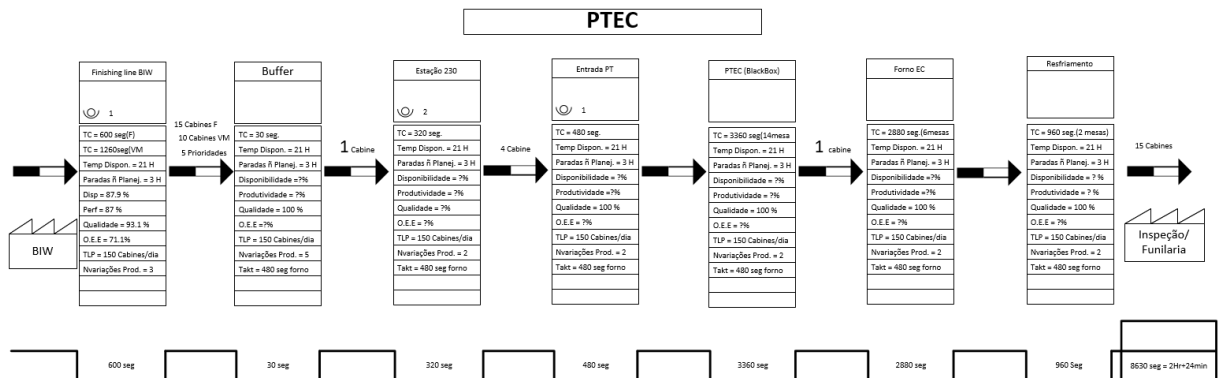
O VSM da linha de selante, ilustrado pela Figura 10 - VSM SELANTE, detalha as etapas de aplicação do selante nas peças. Essa fase tem como objetivo a proteção contra água e poeira e impacta diretamente a qualidade final do produto. A análise deste VSM permitiu identificar os tempos de processamento e as possíveis esperas que podem ocorrer nesta sublinha.

FIGURA 8 - FLUXOGRAMA PRÉ-TRATAMENTO/ECOAT E SELANTE



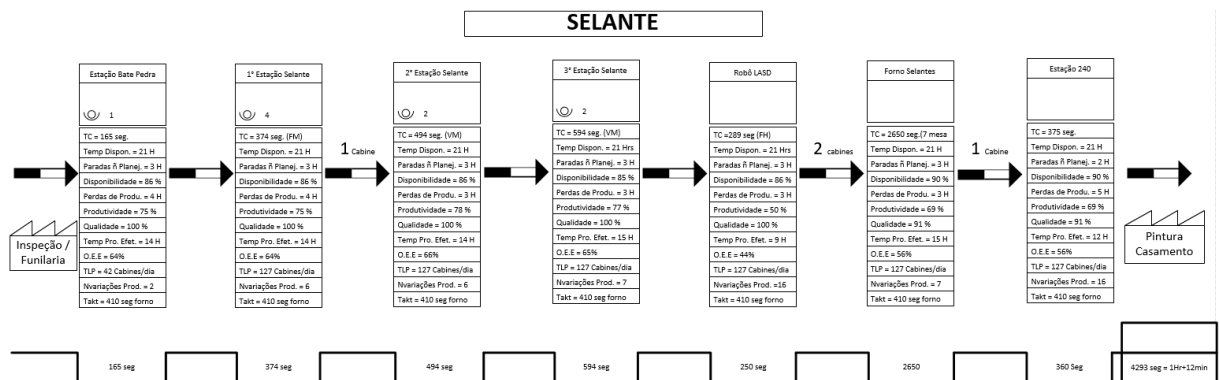
FONTE: Os autores (2024).

FIGURA 9 - VSM PRÉ-TRATAMENTO/ECOAT



FONTE: Os autores (2024).

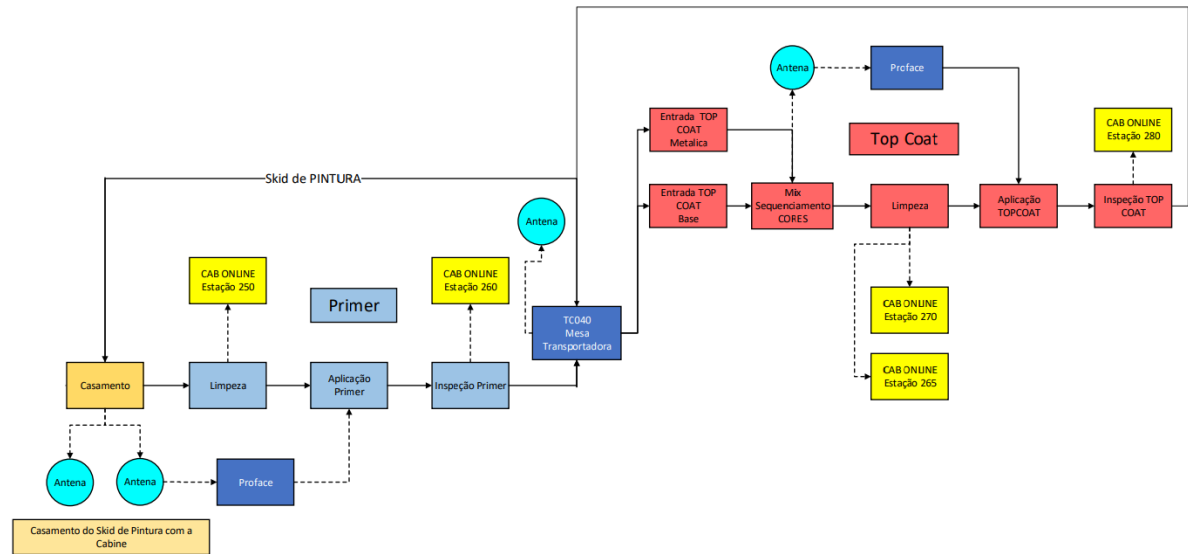
FIGURA 10 - VSM SELANTE



FONTE: Os autores (2024).

Em seguida, o FLUXO 3 - Fluxograma Primer e TopCoat (Página 47) detalha o fluxo das sublinhas de aplicação de primer e aplicação de tinta. Esta é a fase mais crítica da linha, especialmente devido à recirculação de produtos para cores metálicas, que exigem múltiplas passagens.

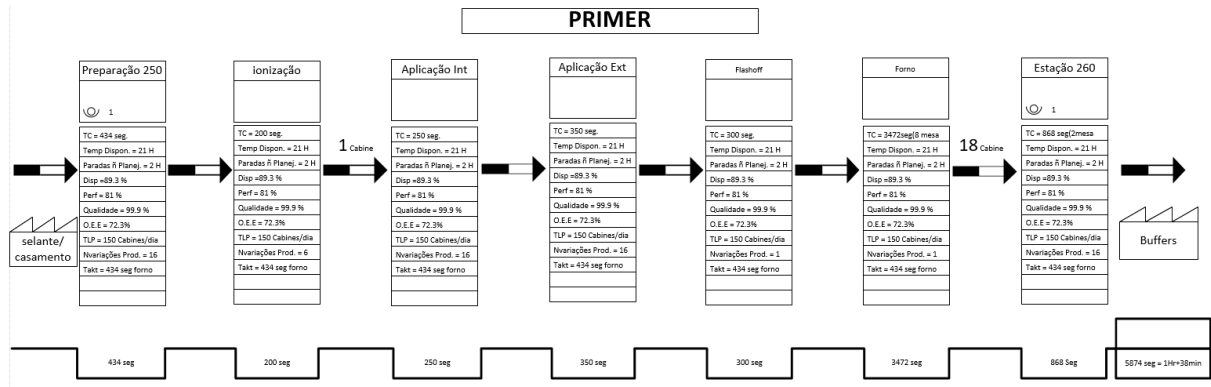
FIGURA 11 - FLUXOGRAMA PRIMER E TOPCOAT



FONTE: Os autores (2024).

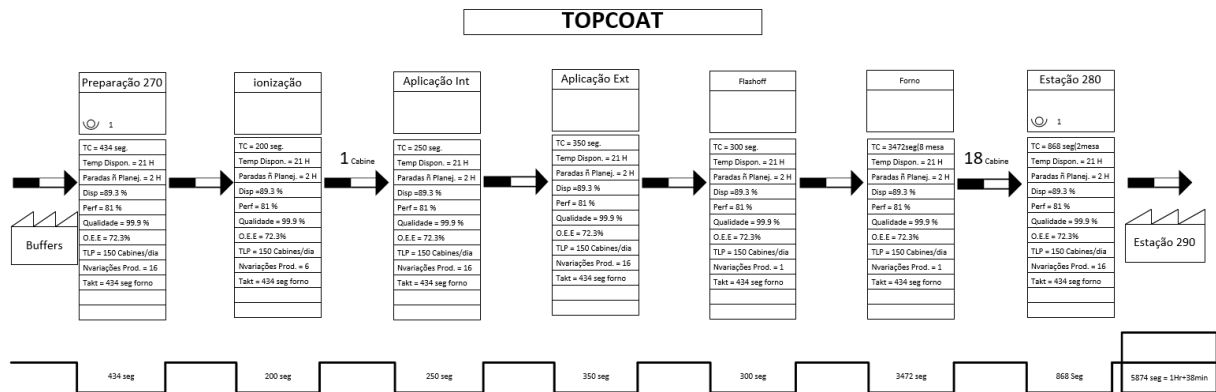
A Figura 12 - VSM Aplicação de Primer e Figura 13 VSM 4 - VSM Aplicação de Tinta (TopCoat) oferecem uma visão mais aprofundada das operações nessas etapas, incluindo tempos de ciclo, perdas e quaisquer gargalos identificados visualmente. Estes VSMs são cruciais para entender o desempenho atual da linha.

FIGURA 12 - VSM APLICAÇÃO DE PRIMER



FONTE: Os autores (2024).

FIGURA 13 - VSM APLICAÇÃO DE TINTA (TOPCOAT)



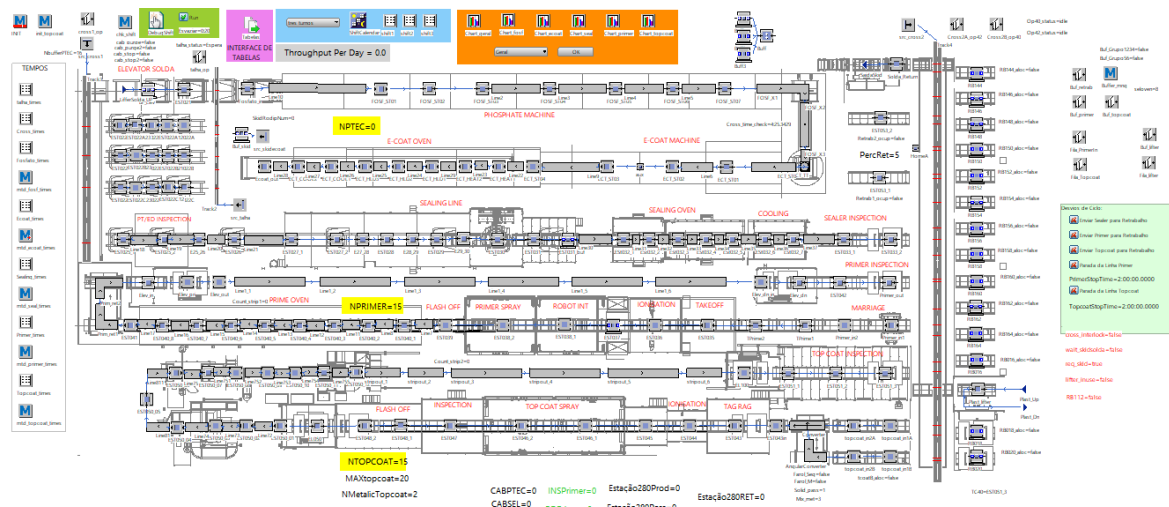
FONTE: Os autores (2024).

5.2 SIMULAÇÃO DE FLUXO

A simulação de fluxo foi realizada para modelar o sistema de produção da linha de pintura e testar diferentes cenários de melhoria. Utilizando o software *Tecnomatix Plant Simulation*, foi possível criar um modelo digital que representa a linha real. É importante reiterar que este modelo, embora detalhado, opera com dados inseridos manualmente e não é um Gêmeo Digital com conexão em tempo real.

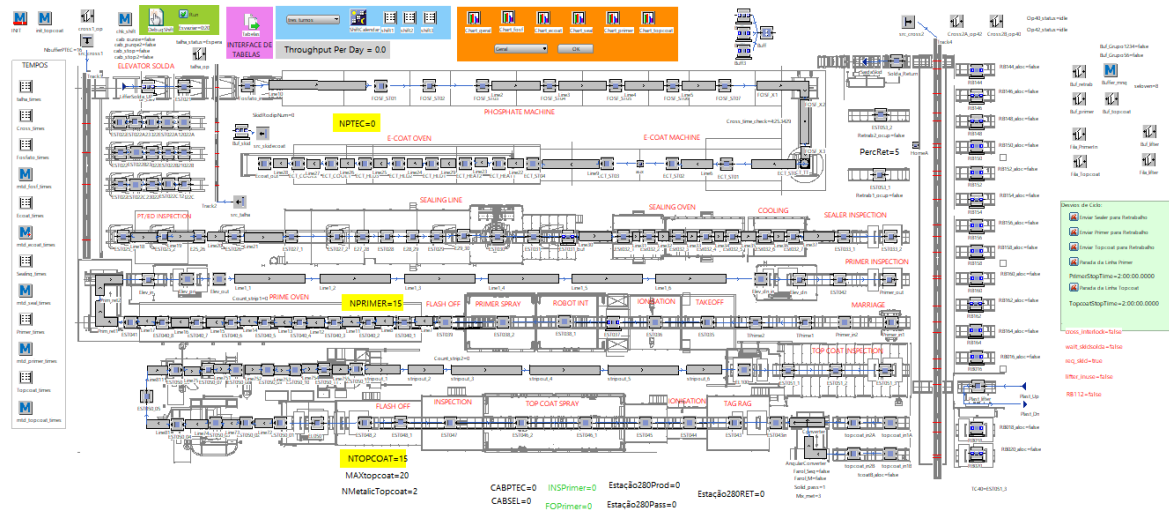
As figuras 14 e 15 mostram a modelagem do sistema estudado. Se trata de uma modelagem grande, o que torna difícil colocá-la em tamanho que seja possível ler o texto nas estações. No entanto, abaixo segue uma imagem do desenvolvimento que permite uma visão geral da complexidade do modelo.

FIGURA 14 - MODELAGEM DA LINHA DE PINTURA



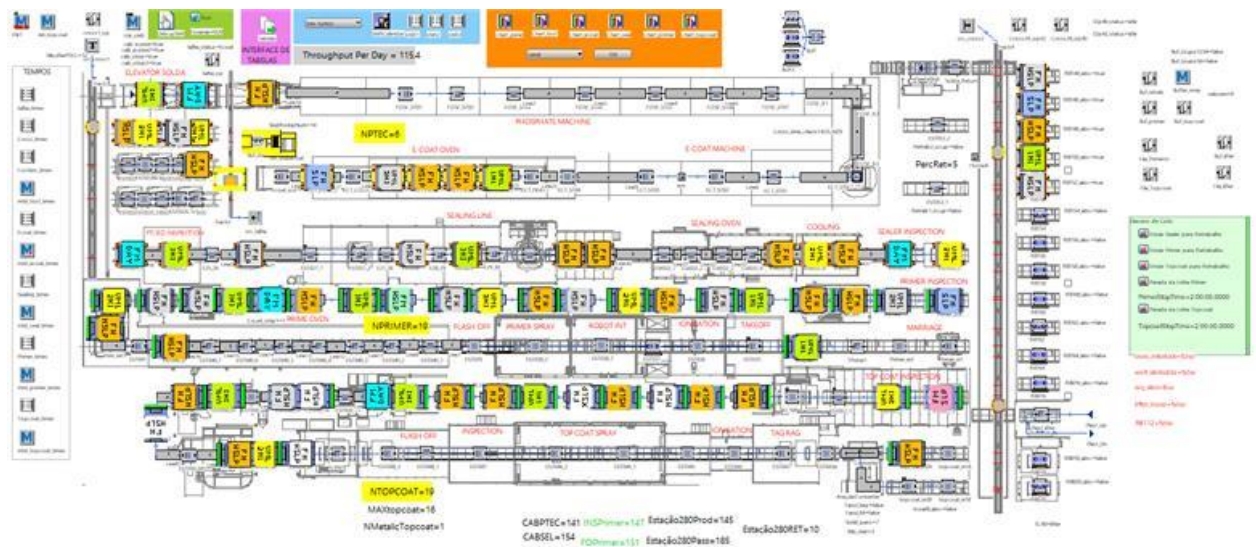
FONTE: Os autores (2025).

FIGURA 15 - MODELAGEM DA LINHA DE PINTURA



FONTE: Os autores (2025).

FIGURA 16 - SIMULAÇÃO DA LINHA DE PINTURA



FONTE: Os autores (2025).

Na simulação foi inserida uma seção de interfaces de usuário, para melhor manipulação e consulta aos parâmetros utilizados, na qual a cor verde representa um *reset* de linha, a cor rosa é toda a interface das tabelas, a cor azul a interface dos turnos de trabalho e, por fim, a cor laranja dá acesso aos gráficos gerados na simulação, como mostrado na figura abaixo:

FIGURA 17 - INTERFACES DE USUÁRIO NA SIMULAÇÃO



FONTE: Os autores (2025).

Todos os parâmetros utilizados, localização de cada sublinha na simulação e os resultados obtidos inicialmente serão apresentados entre as seções 5.2.1 e 5.2.6.

5.2.1 Parâmetros Globais

Os parâmetros globais são constituídos por aqueles valores, que, independentemente da sublinha, não sofrem alteração ao longo da simulação. São eles: mix de produção – apresentado na quantidade produzida de cada modelo e sua respectiva porcentagem de cores metálicas – e dados como MTTR, MTBF e OLE, destacados nos quadros a seguir:

TABELA 1 - MIX DE PRODUÇÃO

Modelo	Quantidade	Percentual de Metálicos em relação a quantidade por modelo
1	1292	2%
2	2941	11%
3	1113	7%
4	14659	42%
5	33	100%
6	400	18%
7	1449	6%
8	261	4%

FONTE: Os autores (2025).

TABELA 2 - DADOS GLOBAIS DA SIMULAÇÃO

Parâmetro	Valor
MTTR	1
MTBF	20
OLE	75,8%

FONTE: Os autores (2025).

A jornada de trabalho foi estabelecida através da ferramenta '*Shift Calendar*' do software, considerando três turnos de segunda-feira a sexta-feira, conforme os horários e intervalos detalhados na Tabela 3:

TABELA 3 – TURNOS E HORÁRIOS DE PRODUÇÃO

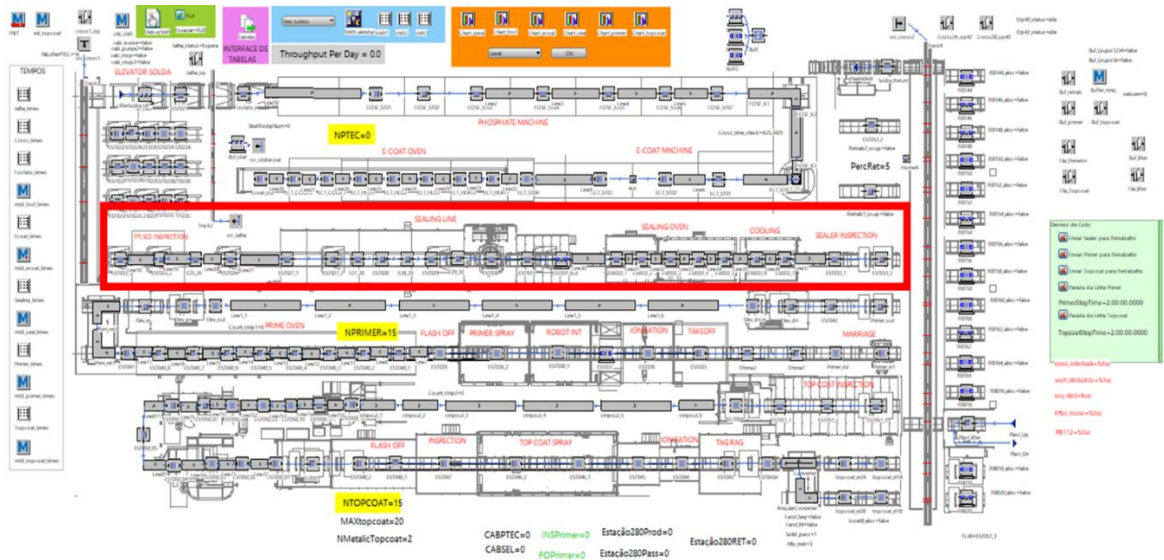
Estação	Descrição	Tempo (min)
ECT_HEAT2	Tempo de Operação Ecoat Heat up zone 02	07:12
ECT_HLD1	Tempo de Operação Ecoat Holding Zone 01	07:12
ECT_HLD2	Tempo de Operação Ecoat Holding Zone 02	07:12
ECT_HLD3	Tempo de Operação Ecoat Holding Zone 03	07:12
ECT_COOL1	Tempo de Operação Ecoat Cooling Zone 01	07:12
ECT_COOL2	Tempo de Operação Ecoat Cooling Zone 02	07:12

FONTE: Os autores (2025).

5.2.3 Parâmetros Selante

A sublinha do selante está caracterizada e localizada da seguinte forma:

FIGURA 19 - LOCALIZAÇÃO DA SUBLINHA SELANTE



FONTE: Os autores (2025).

Os tempos de processamento por modelo e por estação estão definidos na tabela a seguir, com tempos em formato minutos:segundos .

TABELA 5 - TEMPOS OPERAÇÃO SELANTE

Modelo	Tempo de Ciclo EST025_1	Tempo de Ciclo EST025_2	Tempo de Ciclo EST026	Tempo de Ciclo EST027_1	Tempo de Ciclo EST027_2	Tempo de Ciclo EST028	Tempo de Ciclo EST029
1	01:38	04:30	04:30	03:33	06:21	06:14	06:09
2	01:38	04:30	04:30	03:33	06:21	06:14	06:09
3	07:35	04:30	04:30	03:33	05:12	08:19	06:19
4	07:35	04:30	04:30	03:33	05:12	06:19	06:19
5	07:35	04:30	04:30	03:33	03:10	08:36	08:22
6	04:21	04:30	04:30	03:33	05:12	06:38	06:19
7	03:37	04:30	04:30	03:33	05:12	06:19	06:19

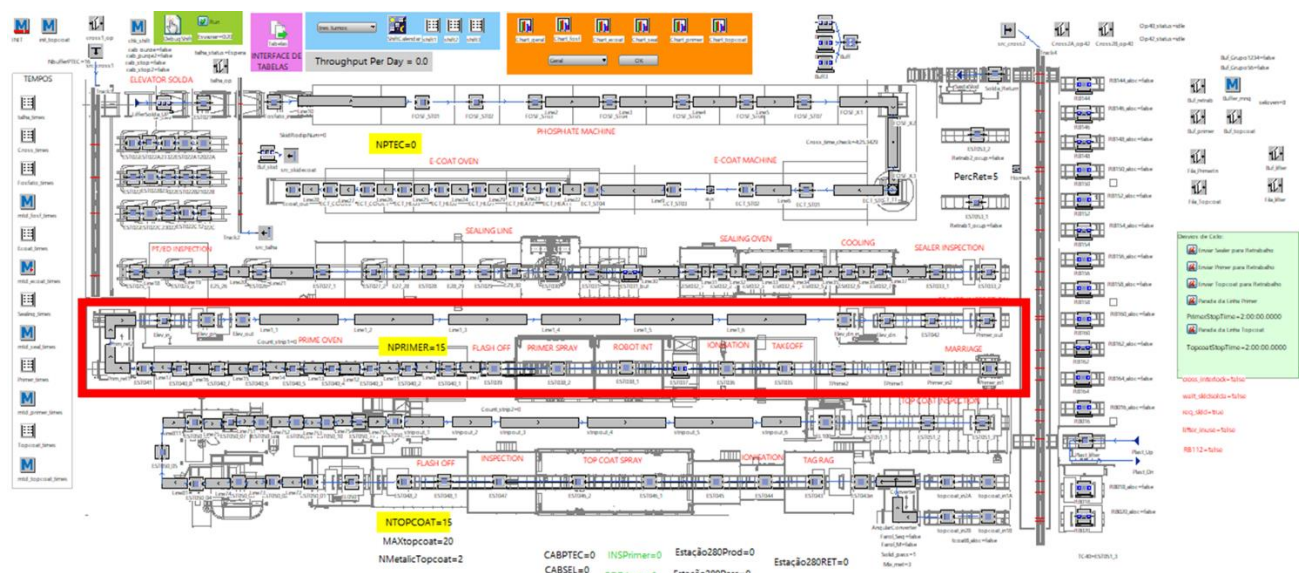
Modelo	Tempo de Ciclo EST025_1	Tempo de Ciclo EST025_2	Tempo de Ciclo EST026	Tempo de Ciclo EST027_1	Tempo de Ciclo EST027_2	Tempo de Ciclo EST028	Tempo de Ciclo EST029
8	04:21	04:30	04:30	03:33	05:12	06:19	06:19

FONTE: Os autores (2025).

5.2.4 Parâmetros Primer

A sublinha do primer está caracterizada e localizada da seguinte forma na modelagem:

FIGURA 20 - LOCALIZAÇÃO DA SUBLINHA PRIMER



FONTE: Os autores (2025).

Seus tempos de processamento por modelo e por estação estão no quadro 3:

TABELA 6 - TEMPOS DE OPERAÇÃO PRIMER

Modelo	Tempo de Ciclo EST035	Tempo de Ciclo EST036	Tempo de Ciclo EST038_1	Tempo de Ciclo EST039	Tempo de Ciclo EST042
1	06:07	03:26	03:05	06:00	03:47
2	06:07	03:26	03:05	06:00	03:47
3	06:00	03:26	04:35	06:00	04:17
4	06:00	03:26	04:35	06:00	04:17
5	06:00	03:26	04:35	06:00	04:17
6	06:21	03:26	03:59	06:00	04:32
7	06:21	03:26	03:40	06:00	04:32
8	06:21	03:26	03:59	06:00	04:32

FONTE: Os autores (2025).

TABELA 8 - TEMPOS OPERAÇÃO APLICAÇÃO DE TINTA - METÁLICAS

Modelo	Tempo de Ciclo EST043	Tempo de Ciclo EST044	Tempo de Ciclo EST045	Tempo de Ciclo EST046 _1	Tempo de Ciclo EST046_2	Tempo de Ciclo EST047	Tempo de Ciclo EST048 _1	Tempo de Ciclo EST048_ 2
1	05:20	02:30	02:30	04:07	07:47	00:10	03:00	03:00
2	05:20	02:30	02:30	04:18	07:57	00:10	03:00	03:00
3	05:20	02:30	02:30	05:48	09:26	00:10	03:00	03:00
4	05:20	02:30	02:30	05:48	09:22	00:10	03:00	03:00
5	05:20	02:30	02:30	05:48	10:13	00:10	03:00	03:00
6	05:20	02:30	02:30	04:34	08:24	00:10	03:00	03:00
7	05:20	02:30	02:30	04:29	06:43	00:10	03:00	03:00
8	05:20	02:30	02:30	04:34	08:42	00:10	03:00	03:00

FONTE: Os autores (2025).

Vale ressaltar que a diferença de tempos de processamento entre peças pintadas de cores sólidas ou metálicas se dá apenas na estação EST046_2. Essa diferença nos tempos se dá, pois, as tintas metálicas necessitam de duas aplicações consecutivas, ou duas “demãos” para cobertura satisfatória em termos de qualidade e acabamento.

No quadro a seguir é apresentado um comparativo desses tempos de processamento, para uma melhor visualização:

TABELA 9 - COMPARATIVO TEMPOS DE OPERAÇÃO PEÇAS SÓLIDAS E METÁLICAS

Modelo	Tempo de Ciclo EST046_2 – Sólida/Verniz	Tempo de Ciclo EST046_2 - Metálica	Proporção tempo Metálico:Sólido
1	04:15	07:47	1,83:1
2	04:26	07:57	1,79:1
3	05:01	09:26	1,88:1
4	05:05	09:22	1,84:1
5	05:02	10:13	2,03:1
6	04:35	08:24	1,83:1
7	03:21	06:43	2,00:1
8	05:03	08:42	1,72:1

FONTE: Os autores (2025).

Considerando uma proporção média entre os tempos de processamento é possível afirmar que uma peça pintada em cor metálica leva aproximadamente 1,87

vezes mais tempo do que uma peça sólida, isso sem contar com a recirculação, fazendo com que seu tempo total de processamento seja de todas as estações no quadro 5, mais o tempo de todas as estações no quadro 4.

5.2.6 Resultados preliminares

Tendo sido realizada toda a modelagem da linha de pintura, inseridos todos os parâmetros e dados referentes a cada estação, se deu início a simulação propriamente dita, na qual foi contemplada uma semana inteira de produção, respeitando os horários determinados pelo *Shift Calendar*. Após esse período de observação, foram coletados os valores de unidades produzidas diariamente por cada sublinha, assim como uma medida da recirculação dos produtos na linha de aplicação de tinta. Esses valores estão apresentados nas figuras abaixo, recortes do próprio software:

FIGURA 22 - INDICADORES DE VOLUME (PRODUTOS PASSANDO POR CADA ESTAÇÃO/PROCESSO)

CABPTEC= 141 INSPrimer= 147 Estação280Prod= 145 Estação280RET= 10
CABSEL= 154 FOPrimer= 151 Estação280Pass= 185

FONTE: Os autores (2025).

Onde:

- a) CABPTEC se refere ao volume produzido na sublinha pré-tratamento
- b) CABSEL se refere ao volume produzido na sublinha selante
- c) INSPrimer se refere ao volume liberado na sublinha primer
- d) FOPrimer se refere ao volume que entrou na sublinha primer
- e) Estação280Prod se refere ao volume liberado pós aplicação de tinta
- f) Estação280Pass se refere a quantidade de vezes em que um produto passou pela estação final da aplicação de tinta
- g) Estação280RET se refere ao número de produtos que precisaram de retrabalho

FIGURA 23 - VOLUME PRODUZIDO POR DIA (MÉDIA)

Throughput Per Day = 145.8

FONTE: Os autores (2025).

Realizando uma análise prévia acerca apenas desses indicadores de volumes é possível destacar que:

- a) 40 produtos de cor metálica passaram pela linha de aplicação de tinta (Estação280Pass - Estação280Prod);
- b) Isso representa uma proporção de 27,6% de cores metálicas;
- c) O indicador de volume produzido é diretamente dependente da quantidade de produtos de cor metálica (por conta da recirculação e do tempo de processamento maior);
- d) A proporção de retrabalhos é de aproximadamente 7% (Estação280RET/Estação280Prod);
- e) Existe uma leve insaturação na sublinha do primer, uma vez que o volume liberado foi menor do que o volume que entrou;
- f) A sublinha do selante foi a que produziu o maior volume;
- g) A sublinha do pré-tratamento produziu a menor quantidade de produtos.

A modelagem segue a configuração real de uma linha de pintura, todos os parâmetros e dados imputados na simulação, bem como os volumes produzidos em cada sublinha, taxas de recirculação e retrabalho são fidedignos com a realidade, validando essa simulação como parte entregável desse trabalho.

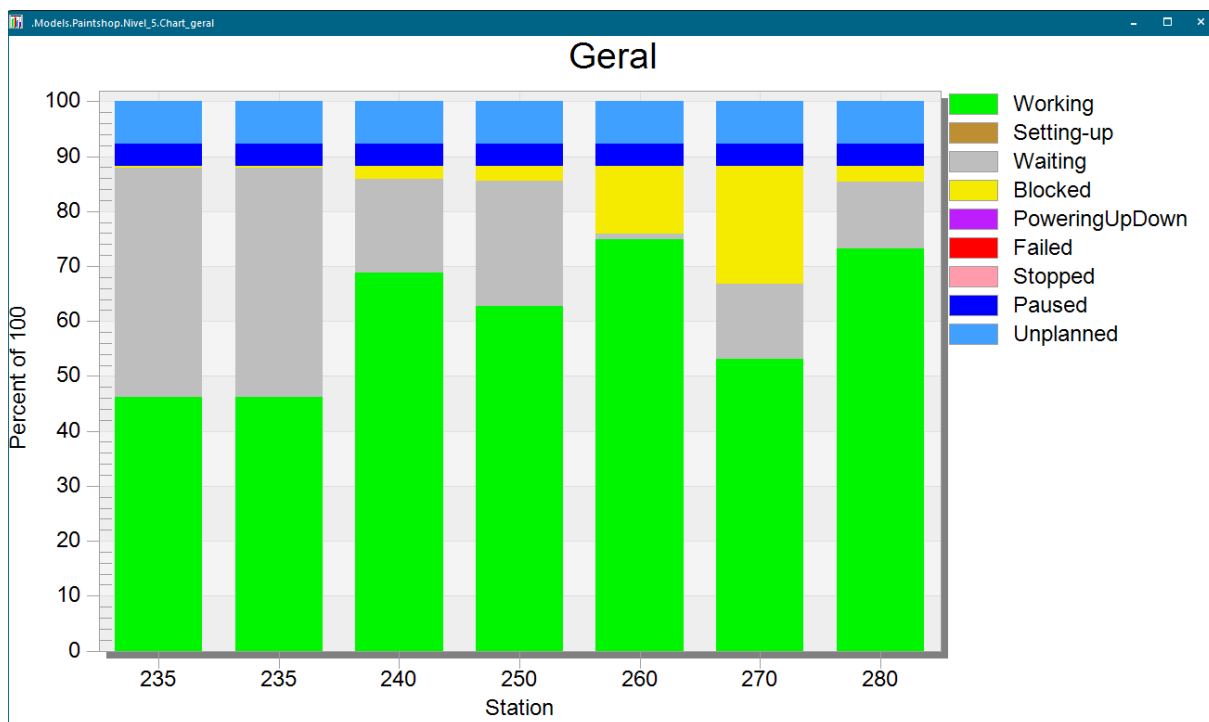
5.3 IDENTIFICAÇÃO DE GARGALO

A análise detalhada dos resultados da simulação *As-Is* (estado atual) da linha de pintura foi crucial para a identificação precisa da principal restrição do processo. Conforme o mapeamento do fluxo produtivo e a análise dos indicadores de desempenho, a estação de aplicação de tinta foi categorizada como a principal restrição da linha. Esta conclusão é solidificada pela análise de indicadores de desempenho específicos.

Para visualizar o impacto dessa restrição no fluxo da produção, foi gerado um gráfico comparando os status das estações ilustrando claramente o aumento

significativo nos tempos de espera imediatamente antes da estação de aplicação de tinta e a subsequente redução desses tempos após sua passagem, confirmando-a como a restrição que dita o ritmo da linha.

GRÁFICO 1 – STATUS DAS ESTAÇÕES DURANTE PRODUÇÃO



FONTE: Os autores (2025).

O eixo Y do gráfico representa o percentual correspondente a cada status de operação das estações, categorizado por cores específicas:

- Working* (em operação) – verde.
- Setting-up* (em *set-up*) – marrom.
- Waiting* (aguardando) – cinza.
- Blocked* (bloqueada) – amarelo.
- Failed* (em falha) – vermelho.
- Stopped* (parada) – rosa.
- Paused* (pausa programada) – azul escuro.
- Unplanned* (interrupção não planejada) – azul claro.

O eixo X, por sua vez, exibe as estações da linha de produção, representadas por números. São elas:

- 235 – Final da sublinha de pré-tratamento.
- 240 – Estação final da linha de selante.
- 250 – Estação inicial da aplicação de primer.

- d) 260 – Estação final do primer.
- e) 270 – Início da linha de aplicação de tinta.
- f) 280 – Fim da aplicação de tinta, marcando também o término da linha de pintura.

A partir da avaliação do gráfico, observa-se que o principal gargalo da linha produtiva está localizado entre as estações 270 e 280. Esse gargalo é evidenciado pela elevada taxa de bloqueio (representada pela cor amarela) na estação 270, indicando que os produtos se encontram com a movimentação interrompida nesse ponto. Além disso, essa estação apresenta uma baixa taxa de operação (*Working*) quando comparada à estação 250, que possui características de processamento semelhantes.

Outro ponto relevante é a presença de uma taxa de bloqueio, ainda que menor, na estação 280. Isso se deve à recirculação específica dos produtos metálicos, fenômeno semelhante ao observado na estação 260. Nesses casos, o bloqueio na estação 270 impacta diretamente o funcionamento das estações anteriores, refletindo em seus indicadores operacionais.

Ao aprofundar a investigação entre as estações 270 e 280, identificam-se alguns equipamentos com potencial para se tornarem gargalos e, conseqüentemente, alvos prioritários de intervenção. Destacam-se, especialmente, as duas estações de aplicação (EST046_1 e EST046_2), responsáveis pelos maiores tempos de processamento, conforme evidenciado nas Tabelas 7 e 8 da seção anterior.

Como apresentado na Seção 3.8, diferentes parâmetros foram considerados para a identificação do gargalo, os quais são detalhados a seguir:

- a) Tempos de Espera e Acúmulo de WIP (*Work In Process*): A formação de filas extensas antes de uma estação sinaliza que o ritmo de processamento é inferior à taxa de chegada dos produtos. Um exemplo é a estação 260, que apresenta um alto percentual de bloqueio (amarelo) sem ocorrência de espera (*waiting*), sugerindo que o problema está na etapa seguinte. O acúmulo de WIP é um forte indicativo de restrição, pois além de representar desperdício, afeta negativamente o *lead time*, a qualidade dos produtos e, conseqüentemente, a satisfação do cliente;
- b) Taxa de Ocupação dos Recursos: Estações que operam com alta taxa de utilização de equipamentos e mão de obra, próximas ou acima de sua capacidade nominal por longos períodos, são candidatas naturais a

gargalos. A estação de aplicação de tinta, por exemplo, apresentou uma das maiores taxas de ocupação, confirmando sua posição como principal restrição do processo;

- c) Tempo de Ciclo da Estação: A estação com o maior tempo de ciclo tende a ditar o ritmo da produção, limitando a capacidade global da linha. No caso da aplicação de tinta, a necessidade de recirculação dos produtos metálicos — que exige duas passagens pela estação (uma para a tinta base e outra para o verniz) — aumenta significativamente o tempo de ciclo e reforça sua atuação como gargalo.

A elevada taxa de ocupação da estação de aplicação de tinta confirma sua condição de restrição, uma vez que opera constantemente em sua capacidade máxima ou até acima dela. Como consequência, há um acúmulo de WIP nos buffers anteriores, indicando que a estação não consegue absorver o fluxo de produtos gerado pelas etapas anteriores com a devida velocidade. Isso resulta em longos tempos de espera para os veículos que chegam à aplicação de tinta, impactando diretamente o tempo de ciclo total da linha.

A origem desse gargalo está diretamente relacionada à recirculação dos produtos, especialmente dos veículos com acabamento metálico, que exigem um segundo ciclo na estação de pintura. Com a projeção de crescimento na demanda por esses acabamentos, a pressão sobre a estação tende a aumentar, comprometendo a capacidade produtiva e a capacidade de atendimento ao mercado. Assim, identificar e quantificar essa restrição torna-se essencial para embasar ações de otimização de forma precisa e eficaz.

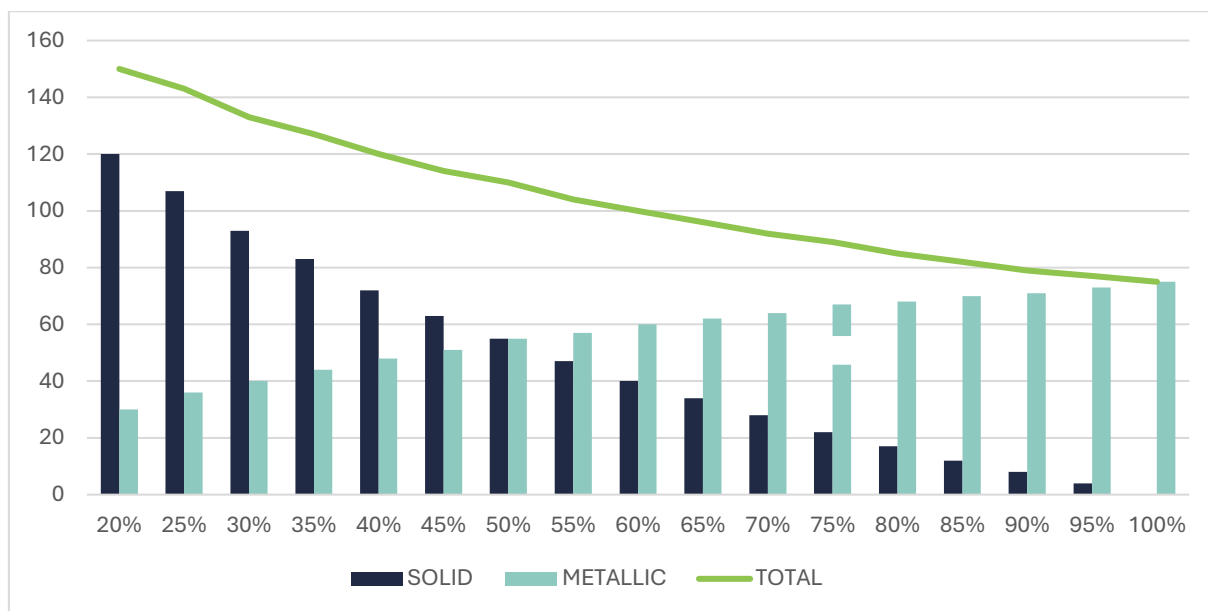
5.4 DIFERENTES CENÁRIOS DE PRODUÇÃO

Uma vez identificado que o gargalo da linha de pintura acontece na aplicação de tinta, a capacidade da linha é limitada a 145 produtos por dia, considerando também a quantidade de produtos de cores metálicas em 40, o que acumula uma ciclagem de 185 ciclos na linha.

Conforme já discutido na seção 5.2.6, a dependência do indicador de volume em relação à quantidade de produtos metálicos decorre das particularidades do seu processamento, como maior tempo e recirculação. Tal relação não segue uma progressão exatamente linear, mas quanto menor for a oferta de produtos metálicos,

maior a capacidade de produção. Isso pode ser visto no gráfico abaixo, que varia o percentual de oferta de metálicos em 5%, partindo de 20 até 100%, com relação à quantidade de produtos produzidos ao total.

GRÁFICO 2 - CURVA DE CAPACIDADE DA LINHA VERSUS % DE METÁLICOS



FONTE: Os autores (2025).

Dessa forma, a produção exclusiva de itens na cor metálica poderia atingir 100% da capacidade produtiva, desde que a demanda diária se mantivesse pouco abaixo de 80 unidades. No entanto, essa configuração levaria à subutilização dos demais setores da planta, os quais têm capacidade de produzir até aproximadamente 145 unidades por dia.

O principal fator para análise de hipóteses e propostas de redução de gargalos produtivos é o *forecast* de produção. Esse *forecast* consiste na previsão dos volumes a serem fabricados, discriminando os modelos e as cores dos produtos, com base na demanda comercial.

Nesse contexto, a tendência é que a procura por produtos metálicos cresça nos próximos anos, impulsionada tanto pela atratividade estética quanto por melhores perspectivas de revenda, em comparação com produtos de cores sólidas, chegando à casa de 45% da capacidade de produção.

Retornando brevemente ao gráfico 2 e localizando esse percentual de produtos metálicos, pode-se observar que a capacidade da linha seria de aproximadamente 115 volumes, contando com 50 metálicos e 180 ciclos na aplicação

de tinta, mostrando uma redução não só no volume produzido, como na ciclagem da estação e um crescimento da insaturação nos setores anteriores da linha de produção.

Além da expectativa de aumento no volume de produtos metálicos, não há previsão de redução no volume total de produção. Pelo contrário, as projeções indicam um crescimento de 10% até 2029, o que tornaria inviável manter a produção na linha de pintura com o atual *set-up* e os parâmetros operacionais atuais.

TABELA 10 - *FORECAST* – PERCENTUAL METÁLICOS

Ano	%Sólido no volume	%Metálico no volume	% Volume de produção
2025	73%	27%	-
2026	68%	32%	+4%
2027	65%	35%	+6%
2028	63%	37%	+9%
2029	61%	39%	+10%

FONTE: Os autores (2025).

TABELA 11 - *FORECAST* – VOLUME ABSOLUTO METÁLICOS

Ano	Produtos Sólidos	Produtos Metálicos	Produtos	Ciclos Necessários
2025	105	40	145	185
2026	102	49	151	200
2027	99	54	153	207
2028	99	59	158	217
2029	97	62	159	221

FONTE: Os autores (2025).

Como apresentado na seção 3.4 o *set-up* de cores diferentes do branco é realizado por um equipamento chamado *Supply-P*, o qual também necessita de uma análise mais aprofundada com relação a sua capacidade de operação, uma vez que produtos de cor metálica são necessariamente carregados nesse equipamento. Além disso, se faz necessário um levantamento dos dados do *forecast* com distinção entre produtos sólidos coloridos e brancos, como mostrado na tabela 12.

TABELA 12 - *FORECAST* – VOLUME ABSOLUTO SÓLIDOS

Ano	Produtos Brancos	Produtos Coloridos
2025	88	17
2026	83	19
2027	80	19
2028	79	20
2029	76	21

FONTE: Os autores (2025).

Diante disso, o *forecast* mostra que a linha não atende aos volumes previstos futuramente e, portanto, deve ser considerado como a meta de produção a ser alcançada.

5.5 HIPÓTESES E RESULTADOS

Com base na identificação da aplicação de tinta como o gargalo principal da linha de pintura, explicado no Capítulo 5.3, foram desenvolvidas e simuladas propostas de otimização com o objetivo de aumentar a capacidade e a eficiência do processo, discorrido no Capítulo 3.9. As propostas específicas para o gargalo focam em:

- a) Diminuição do Tempo de Ciclo na Aplicação: Análise e otimização dos parâmetros de processo na estação de aplicação de tinta para reduzir o tempo necessário de operação por peça. Isso pode envolver ajustes na velocidade dos transportadores, otimização dos programas de pintura dos robôs, ou a redução de tempos de setup, com foco em todos os modelos e cores;
- b) Otimização do Mix de Produção: Investigação de como o sequenciamento da produção (mix de modelos e cores) pode ser otimizado para minimizar o impacto da recirculação. A simulação permitiu estressar o gargalo sob diferentes combinações de parâmetros (modelo, tipo de cor), avaliando o desempenho da linha para identificar a configuração de mix mais eficiente. Por exemplo, a simulação testou o impacto de um aumento percentual de cores metálicas (com maior recirculação) na capacidade global da linha, buscando soluções para mitigar esse impacto;
- c) Aumento de disponibilidade (*Supply-P*): Esta proposta envolve a expansão ou reconfiguração de recursos na estação de aplicação de tinta para aumentar sua capacidade de processamento. As simulações realizadas com o *Experiment Manager* do *Plant Simulation* permitiram avaliar o impacto de cenários de aumento da capacidade de "*supply-P*". Isso poderia incluir a adição de robôs de pintura, a otimização dos percursos de aplicação ou a implementação de tecnologias de secagem mais rápidas, embora os detalhes específicos da intervenção sejam definidos em estudos posteriores.

Visando validar essas possibilidades, o uso do *ExperimentManager* consolidou as propostas e testou-as para os diversos cenários listados. Cenários esses que serão percorridos nos subcapítulos do capítulo 5.5 seguintes em conjunto de suas conclusões.

5.5.1 Diminuição do Tempo de Ciclo

Foi verificada a condição de revisão de tempos de aplicação por modelo e por variante com o responsável técnico do processo de aplicação de tinta, seguindo o *Yamazumi* de linha e foram definidos os cenários de simulação:

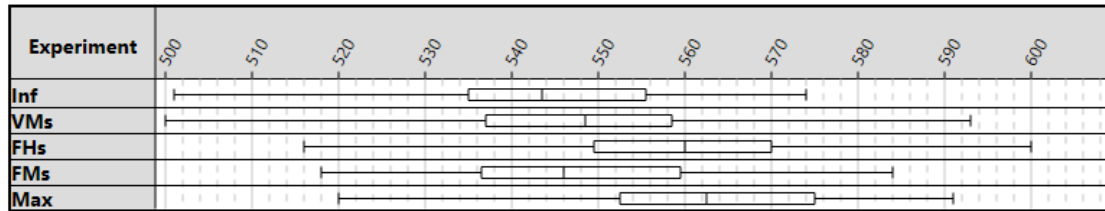
- a) Fase 1: Possíveis modificações imediatas em trajetória de robô para redução do tempo atual em 60 segundos para sólidos e 90 segundos para metálicos;
- b) Fase 2: Possíveis modificações em parâmetros de aplicação emitindo experimentos para redução do tempo da alternativa anterior em 60 segundos para todos os modelos;

Ao configurar o *Experiment Manager* com 6 experimentos de 60 observações de 3 dias corridos de simulação para validar a fase 1, foram obtidos os resultados abaixo, para ciclos na Figura 24 e para peças na Figura 25:

FIGURA 24 - DIAGRAMAS PARA VARIAÇÃO DE TEMPO DE CICLO E SEUS RESULTADOS DE 3 DIAS PARA CICLOS NA FASE 1

Evaluations of the output value 'Ciclos'

Min-Max Diagram : Ciclos



Detailed Results

Experiment	Ciclos	Standard Deviation	Minimum	Maximum	Left interval bound	Right interval bound
Inf	545.066666666667	15.305772331595	501	574	541.112766405923	549.020566927411
VMs	547.633333333333	17.0074427044331	500	593	543.239845001821	552.026821664845
FHs	558.166666666667	17.5394631719909	516	600	553.63574287487	562.697590458463
FMs	547.683333333333	14.9240923031654	518	584	543.828031479206	551.538635187461
Max	561.916666666667	16.2713137059537	520	591	557.713340620074	566.11999271326

Table of the p-values of the T-test of the output value 'Ciclos'

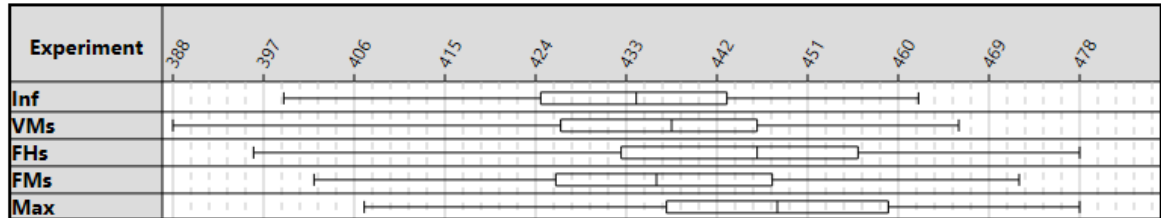
	VMs	FHs	FMs	Max
Inf	0.387	0	0.345	0
VMs		0.001	0.986	0
FHs			0.001	0.227
FMs				0

FONTE: Os autores (2025).

FIGURA 25 - DIAGRAMAS PARA VARIAÇÃO DE TEMPO DE CICLO E SEUS RESULTADOS DE 3 DIAS PARA PEÇAS NA FASE 1

Evaluations of the output value 'Cabs'

Min-Max Diagram : Cabs



Detailed Results

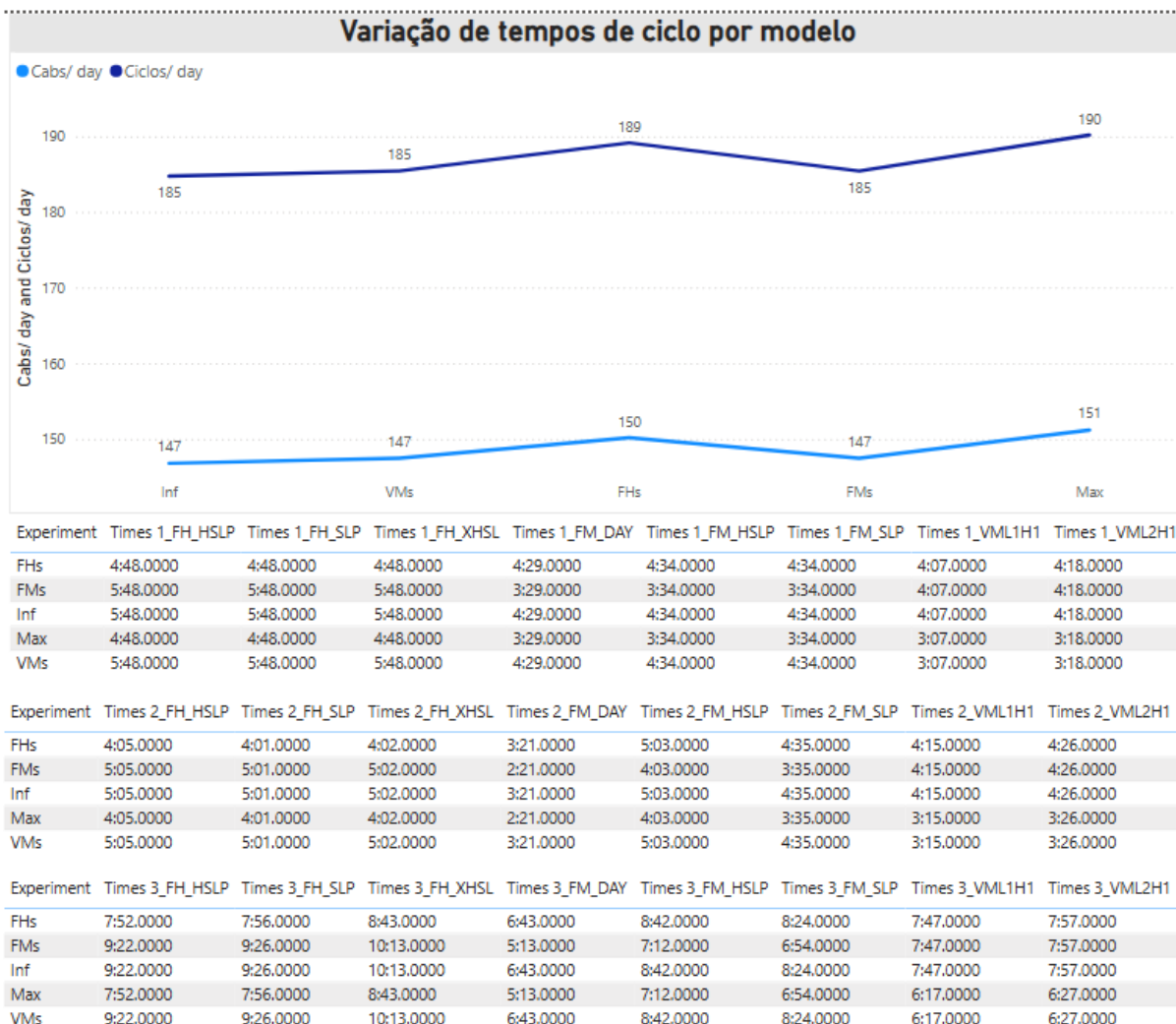
Experiment	Cabs	Standard Deviation	Minimum	Maximum	Left interval bound	Right interval bound
Inf	433.583333333333	14.2261297745238	399	462	429.908334319481	437.258332347186
VMs	435.116666666667	16.1288158450946	388	466	430.950151720945	439.283181612389
FHs	443.85	17.2143269066041	396	478	439.403067811936	448.296932188064
FMs	435.75	15.3309535121994	402	472	431.789594750524	439.710405249476
Max	446.866666666667	15.9389371513325	407	478	442.749202588847	450.984130744487

Table of the p-values of the T-test of the output value 'Cabs'

	VMs	FHs	FMs	Max
Inf	0.582	0.001	0.424	0
VMs		0.005	0.826	0
FHs			0.007	0.321
FMs				0

FONTE: Os autores (2025).

FIGURA 26 - RESULTADOS DE TEMPOS DE CICLO POR MODELO E VARIANTE, REPRESENTANDO AVANÇO DA FASE 1



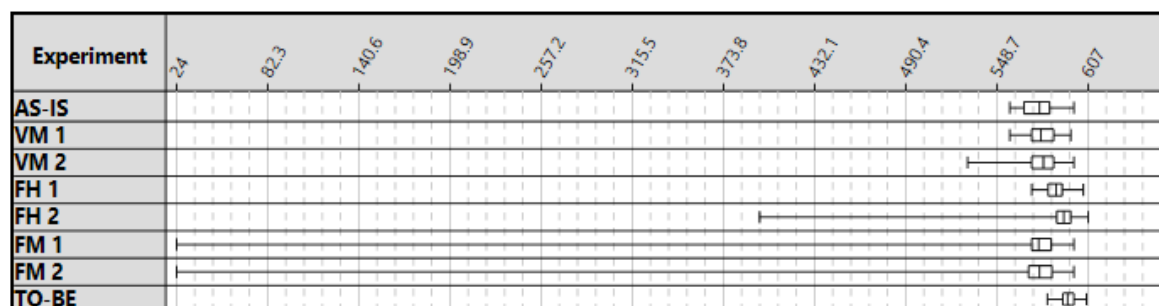
Pode-se observar que a fase 1 não atinge o valor de requisito mínimo de 200 ciclos por dia, chegando ao valor máximo de 190 ciclos.

Ao configurar o *Experiment Manager* com 8 experimentos de 60 observações de 3 dias corridos de simulação para validar da fase 1 e posterior fase 2, foram obtidos os resultados abaixo, para ciclos na Figura 27 e para peças na Figura 28:

FIGURA 27 - DIAGRAMAS PARA VARIAÇÃO DE TEMPO DE CICLO E SEUS RESULTADOS DE 3 DIAS PARA CICLOS NA FASE 2

Evaluations of the output value 'Ciclos'

Min-Max Diagram : Ciclos



Detailed Results

Experiment	Ciclos	Standard Deviation	Minimum	Maximum	Left interval bound	Right interval bound
AS-IS	575.216666666667	9.86191384229429	557	598	572.66906417607	577.764269157264
VM 1	577.25	9.63507891834373	557	596	574.760995183896	579.739004816104
VM 2	577.216666666667	10.993205400235	530	598	574.376820577445	580.056512755889
FH 1	586.533333333333	7.23800390749499	571	604	584.663558655055	588.403108011612
FH 2	588.583333333333	25.8937147446405	397	607	581.894277514234	595.272389152432
FM 1	567.5	71.9732765849442	24	598	548.907331110736	586.092668889264
FM 2	567.55	71.981736148714	24	598	548.955145773684	586.144854226316
TO-BE	593.933333333333	5.63544071837768	581	606	592.477544625448	595.389122041219

Table of the p-values of the T-test of the output value 'Ciclos'

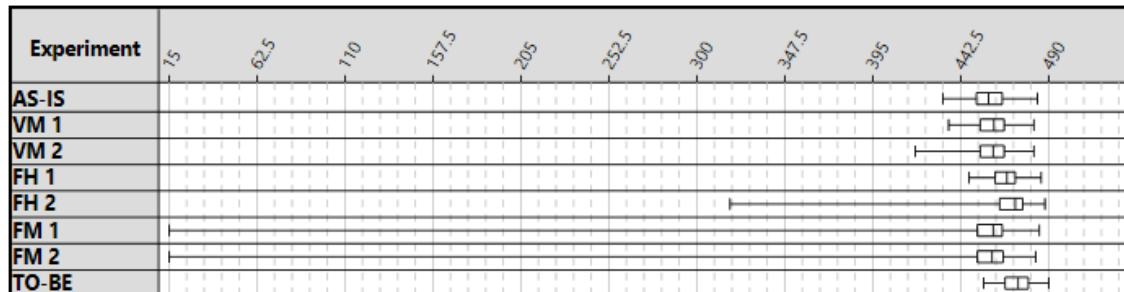
	VM 1	VM 2	FH 1	FH 2	FM 1	FM 2	TO-BE
AS-IS	0.256	0.296	0	0	0.414	0.417	0
VM 1		0.986	0	0.002	0.302	0.305	0
VM 2			0	0.002	0.305	0.308	0
FH 1				0.557	0.046	0.047	0
FH 2					0.036	0.037	0.123
FM 1						0.997	0.006
FM 2							0.006

FONTE: Os autores (2025).

FIGURA 28 – DIAGRAMAS PARA VARIAÇÃO DE TEMPO DE CICLO E SEUS RESULTADOS DE 3 DIAS PARA PEÇAS NA FASE 2

Evaluations of the output value 'Cabs'

Min-Max Diagram : Cabs



Detailed Results

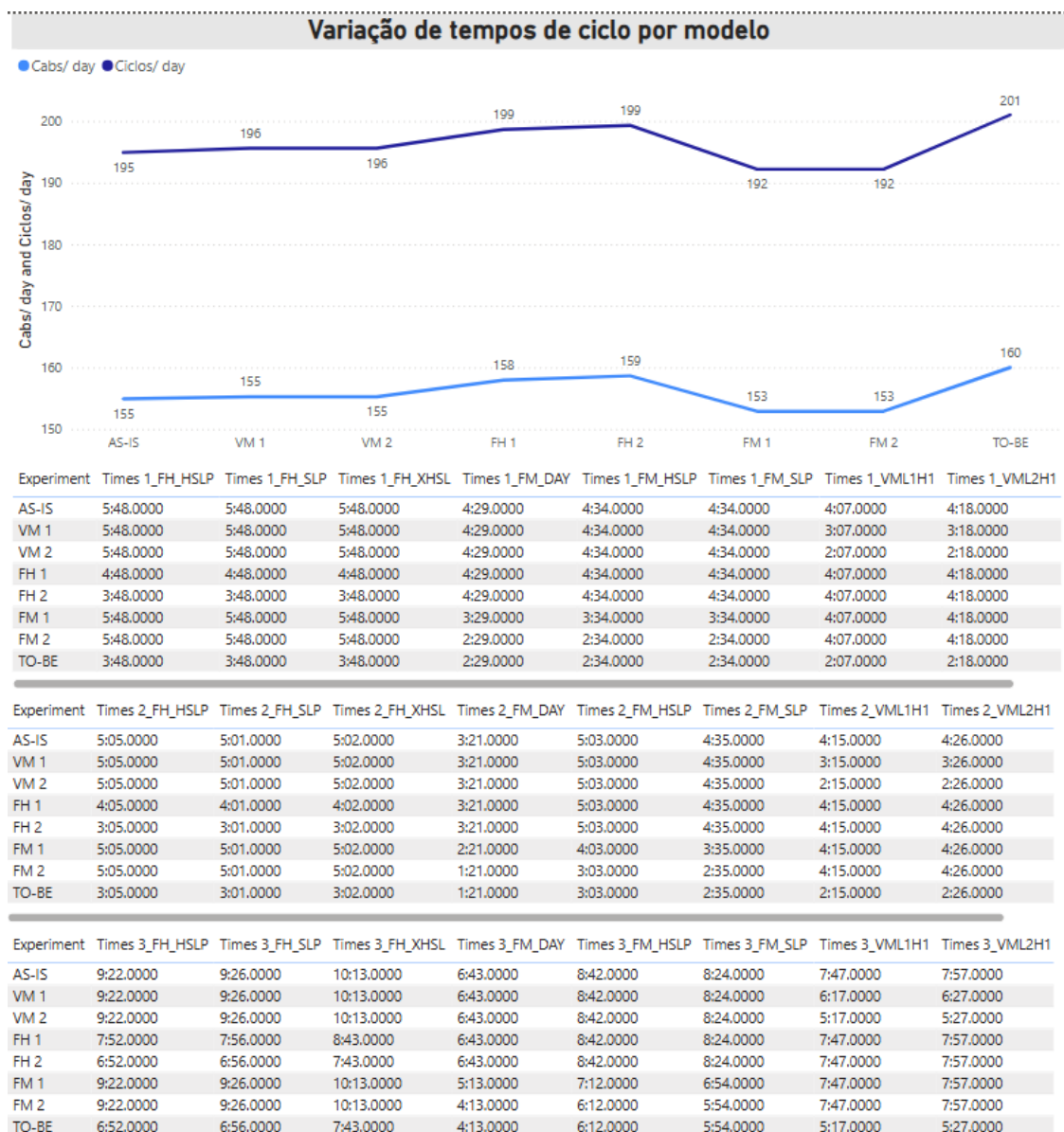
Experiment	Cabs	Standard Deviation	Minimum	Maximum	Left interval bound	Right interval bound
AS-IS	457.4	10.7296516126489	433	484	454.62823707358	460.17176292642
VM 1	458.783333333333	10.7279006850044	436	482	456.012022719487	461.55464394718
VM 2	458.716666666667	11.5054764656041	418	482	455.744486928737	461.688846404596
FH 1	466.316666666667	8.9716911971992	447	486	463.999033070962	468.634300262372
FH 2	467.983333333333	21.4290248808624	318	488	462.447629206268	473.519037460398
FM 1	451.166666666667	58.2211132030203	15	485	436.076558288795	466.156775044538
FM 2	451.183333333333	58.2360746915536	15	483	436.139359993137	466.22730667353
TO-BE	472.333333333333	8.45259295622324	455	490	470.149797032811	474.516869633856

Table of the p-values of the T-test of the output value 'Cabs'

	VM 1	VM 2	FH 1	FH 2	FM 1	FM 2	TO-BE
AS-IS	0.481	0.518	0	0.001	0.414	0.419	0
VM 1		0.974	0	0.004	0.32	0.324	0
VM 2			0	0.004	0.325	0.329	0
FH 1				0.58	0.05	0.051	0
FH 2					0.039	0.039	0.148
FM 1						0.995	0.007
FM 2							0.007

FONTE: Os autores (2025).

FIGURA 29 - RESULTADOS DE TEMPOS DE CICLO POR MODELO E VARIANTE, REDUZINDO SÓLIDOS 60" E METÁLICOS 90" (AVANÇO 1) E MAIS 60S TUDO (AVANÇO 2) REPRESENTANDO AVANÇO DA FASE 2



FONTE: Os autores (2025).

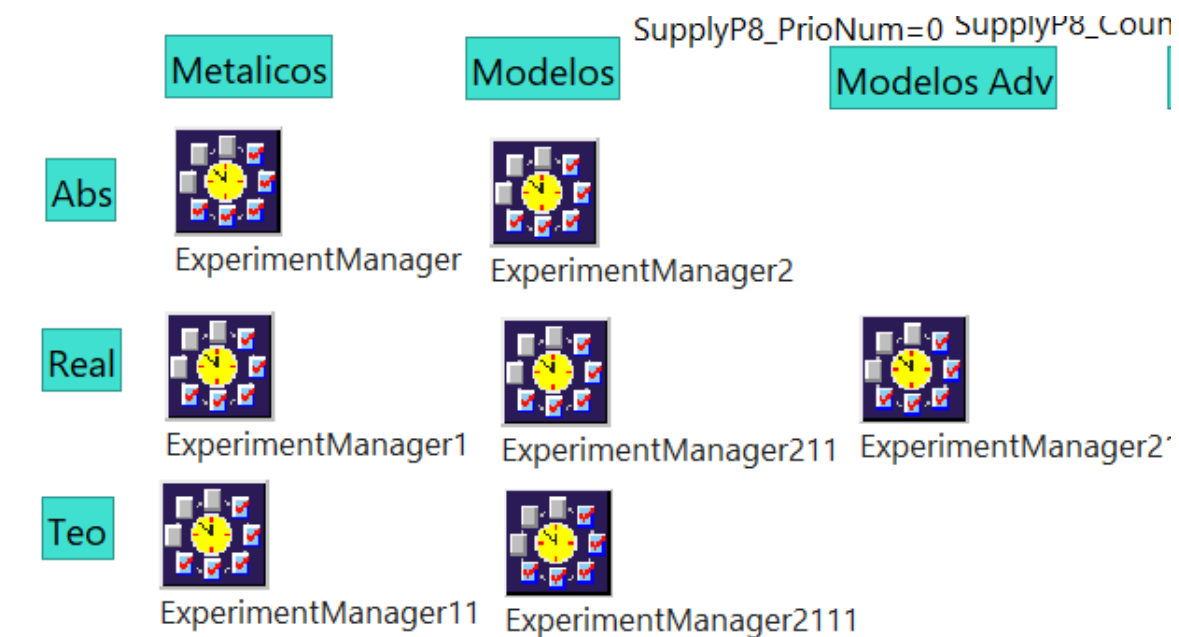
Concluído por meio dos dados resultantes que os 190 ciclos médios da fase 1 em condição de redução máxima não serão suficientes para atender as demandas de *forecast* do processo. A fase 2, que disponibilizará em sua totalidade 201 ciclos médios em condição máxima atenderá o target de 2026.

Foi identificado também que redução de tempo de operação apenas nos modelos 3, 4 e 5 seriam suficientes para atender o *forecast*, devido ao impacto maior na média do tempo de ciclo.

5.5.2 Otimização de Mix

Definido os valores de experimentos “Absoluto”, “Real” e “Teórico” para Variação de mix de modelos e para variação de mix de variantes (metálicos) segundo estratégia mencionada no item 3.8 – Identificação de Gargalos

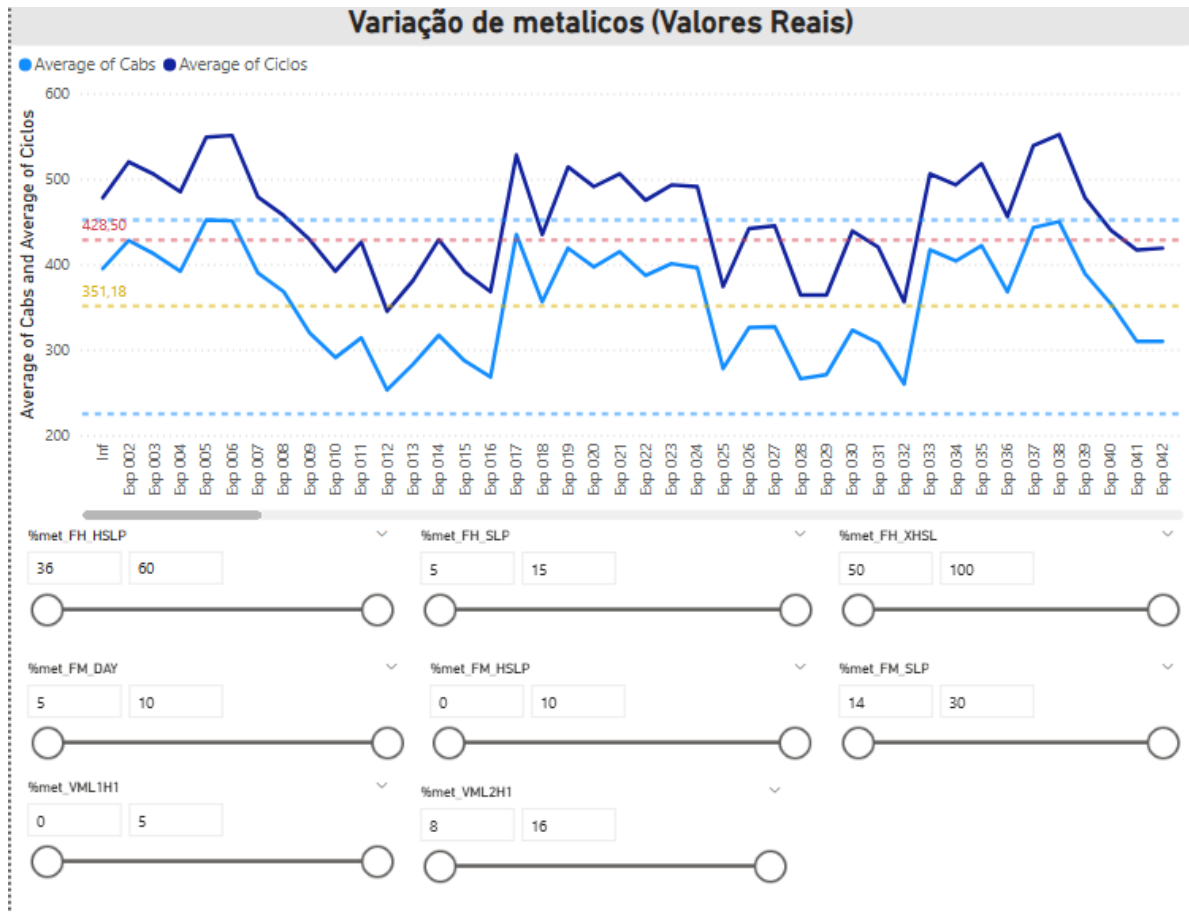
FIGURA 30 - EXPERIMENT MANAGERS UTILIZADOS PARA MODELOS E VARIANTES



Foram coletados os resultados (outputs) das iterações e elaborados gráficos comparativos para as condições "Real" e "Teórica" da variante analisada. Os gráficos ilustram: a média de peças (linha pontilhada amarela), o percentil de 90% (linha pontilhada vermelha) e os limites superior e inferior das iterações (linhas pontilhadas azuis).

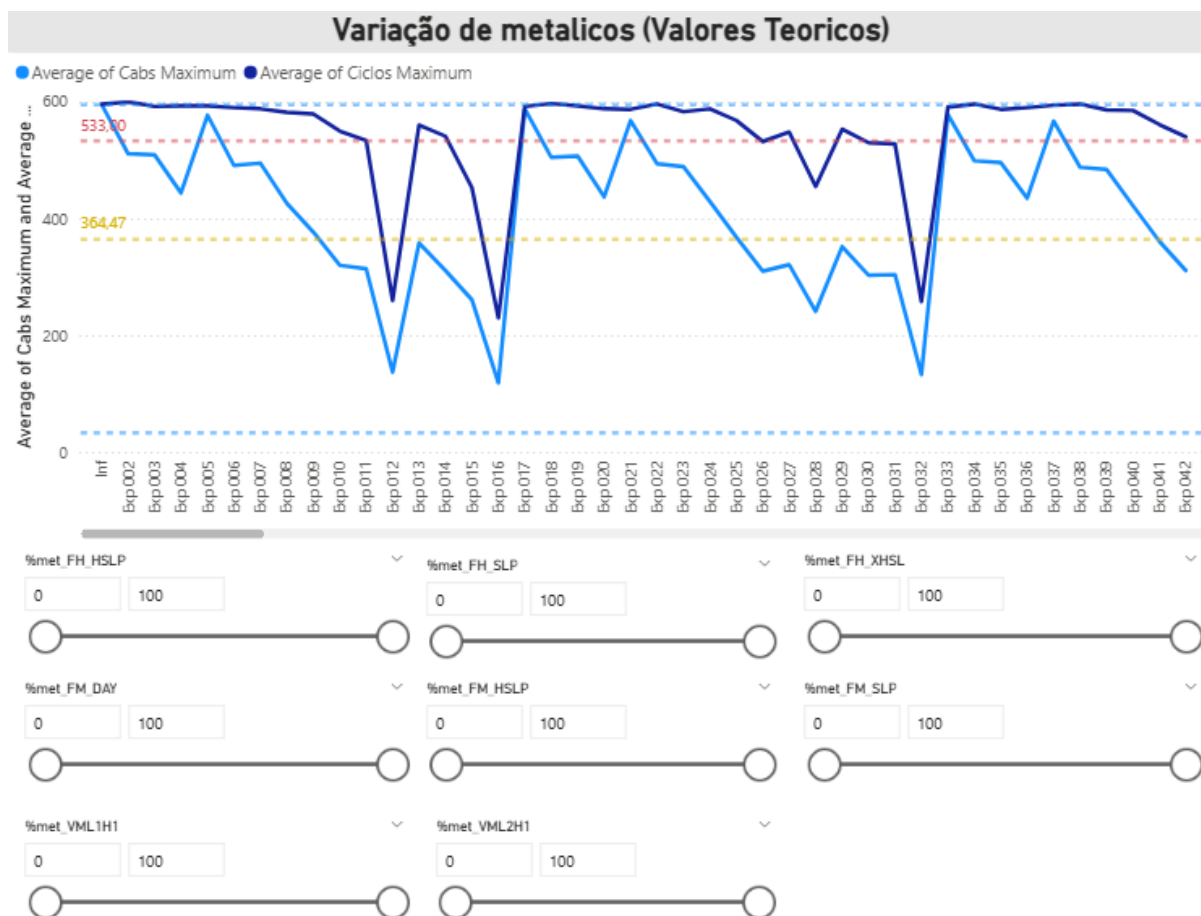
Os recortes dos gráficos são apresentados a seguir:

FIGURA 31 - RESULTADOS DE VARIAÇÃO DE VARIANTES PARA VALORES REAIS DE FORECAST



FONTE: Os autores (2025).

FIGURA 32 - RESULTADOS DE VARIAÇÃO DE VARIANTES PARA VALORES TEÓRICOS DE 0 A 100%



FONTE: Os autores (2025).

Após a análise dos gráficos e a avaliação conjunta com outros dados do processo, foi possível identificar que o aumento na porcentagem de veículos com pintura metálica (de 20% para 45%) gera impactos significativos nos seguintes aspectos do processo produtivo:

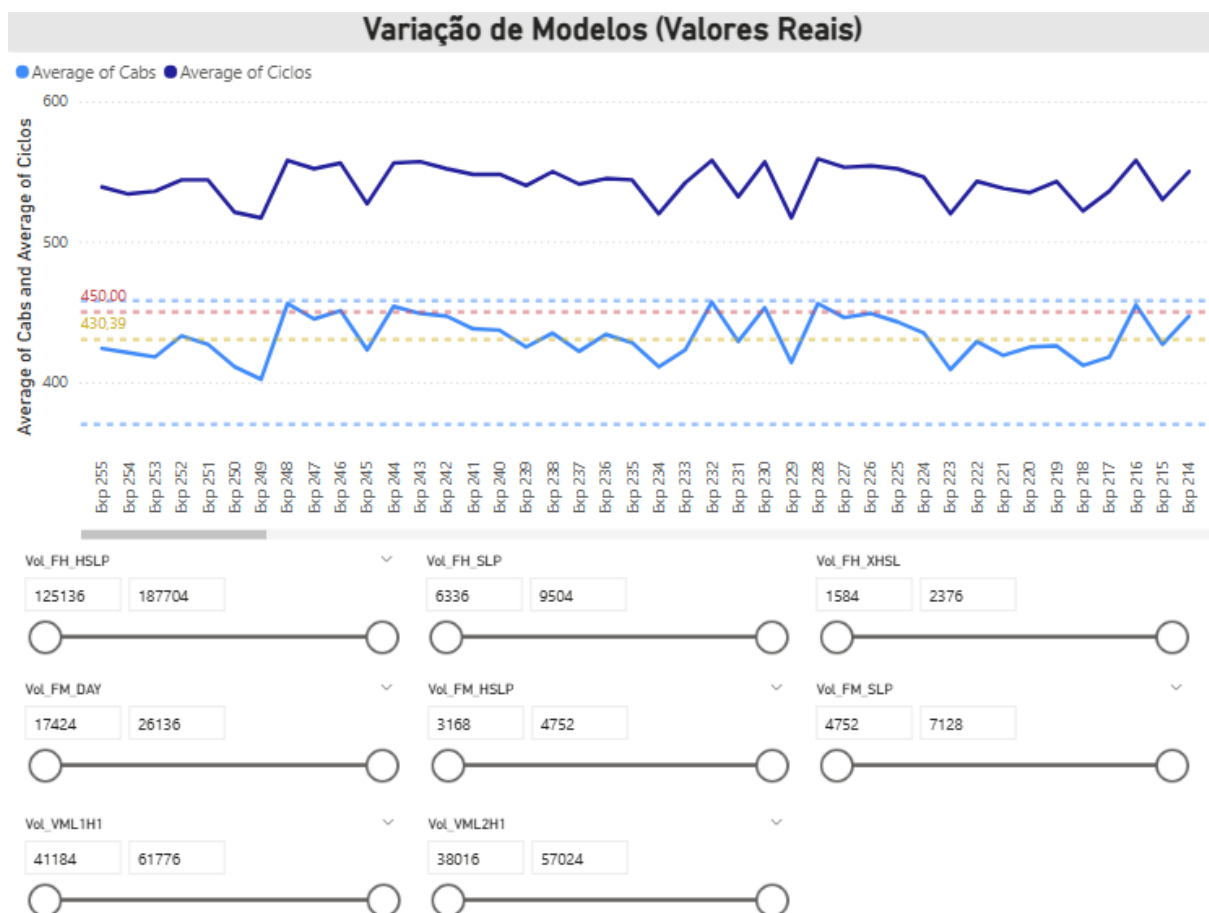
- Perda de ciclos: O tempo médio de ciclo aumenta consideravelmente para modelos com pintura metálica, devido a uma diferença média de aproximadamente 250 segundos em relação aos modelos com pintura sólida.
- Redução na produção de peças: A combinação entre o aumento do tempo de ciclo e a necessidade de recirculação dos modelos metálicos resulta em uma redução estimada de 2,9 peças por dia para cada ponto percentual adicional dentro do intervalo analisado (20% a 45%).
- Desbalanceamento da linha: Os modelos 3, 4 e 5 são os que apresentam os maiores tempos de ciclo médio (até 650 segundos no pior caso), sendo

os mais impactantes individualmente. No entanto, como esses modelos já possuem uma alta participação metálica, os maiores impactos na capacidade da linha ocorrem com o aumento da participação metálica nos modelos 1 e 2. Esses modelos, quando combinados com os modelos de maior tempo de ciclo, atuam como elementos de balanceamento do mix. A mesma lógica se aplica aos modelos 6, 7 e 8.

Com base nesses dados, foram coletados os resultados (outputs) das simulações e gerados gráficos comparativos para as condições “Real” e “Teórica” dos modelos analisados. Os gráficos apresentam: a média de peças produzidas (linha pontilhada amarela), o percentil de 90% (linha pontilhada vermelha) e os limites superior e inferior das iterações (linhas pontilhadas azuis).

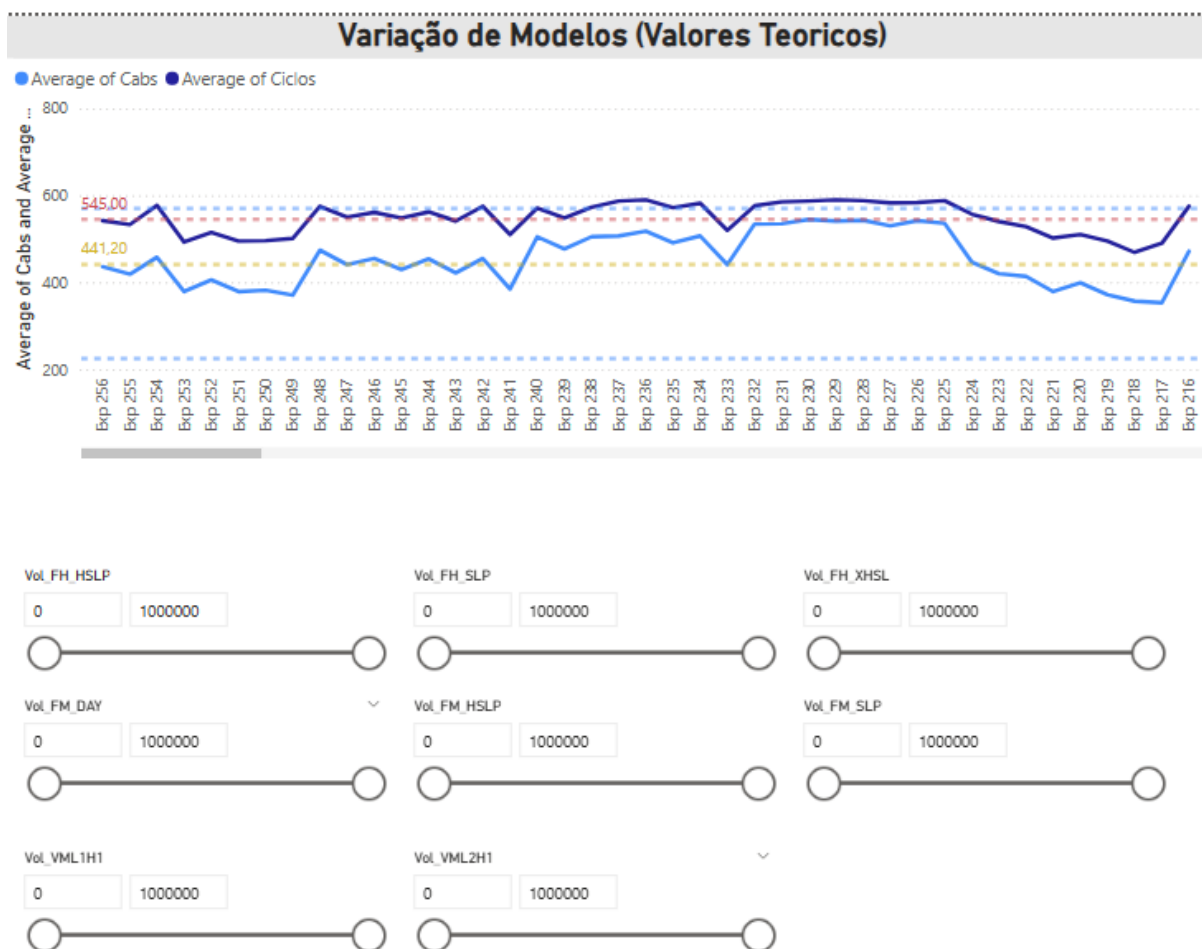
Os recortes dos gráficos são apresentados a seguir:

FIGURA 33 - RESULTADOS DE VARIAÇÃO DE MODELOS PARA VALORES REAIS DE FORECAST



FONTE: Os autores (2025).

FIGURA 34 - RESULTADOS DE VARIAÇÃO DE MODELOS PARA VALORES TEÓRICOS DE 0 A 100%



FONTE: Os autores (2025).

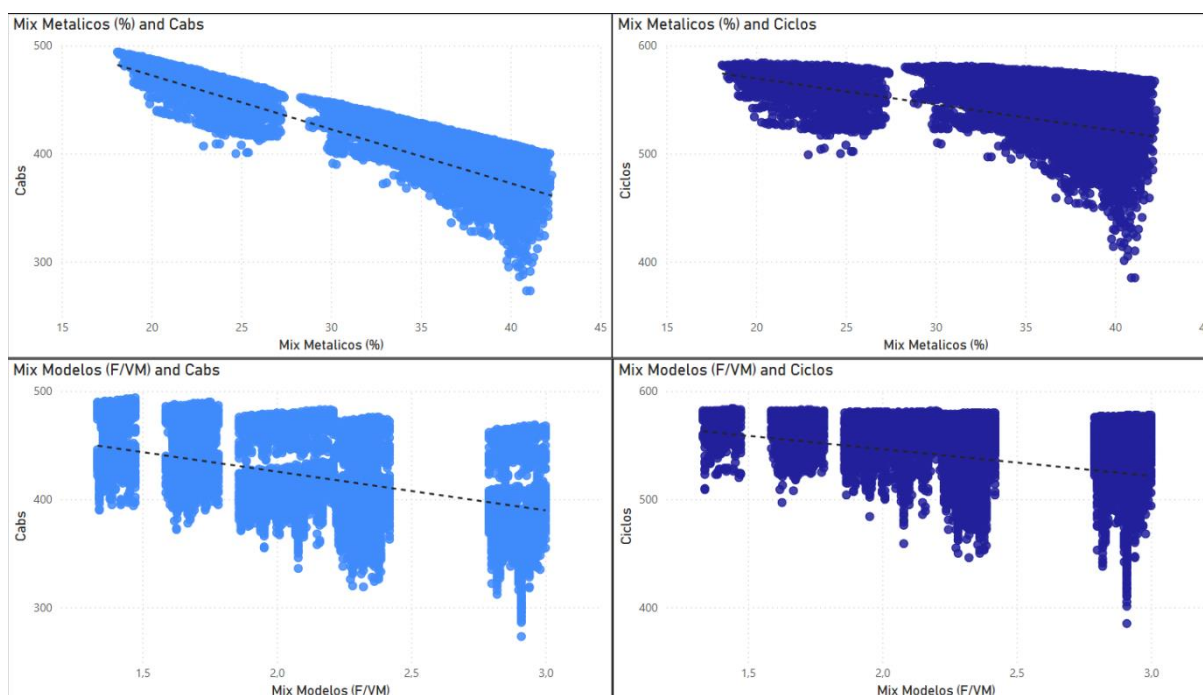
Analisando esses últimos gráficos e considerando novamente os demais dados dos processos, foi identificado que o aumento na participação de determinados modelos (segundo o *forecast* projetado) impacta o processo produtivo nos seguintes aspectos:

- a) Variação no tempo de ciclo: O tempo de ciclo médio varia entre 190 e 165 segundos, dependendo da proporção entre a soma dos modelos 3, 4, 5, 6, 7 e 8 em relação à soma dos modelos 1 e 2. Quanto maior a presença dos modelos 1 e 2, maior a capacidade produtiva, devido ao menor tempo de ciclo e à menor taxa de pintura metálica. O inverso ocorre com os modelos 3 a 8, que apresentam maior tempo de ciclo e maior proporção de acabamentos metálicos;

- b) Variação na produção de peças: A variação do tempo de ciclo, aliada à lógica de recirculação dos modelos metálicos, resulta em uma oscilação na produção diária, que pode variar de 155 a 130 peças, conforme a composição do mix. Foi identificada uma perda aproximada de 8,3 peças por dia para cada múltiplo da soma de modelos 3 a 8 sobre a soma de modelos 1 e 2, dentro do intervalo de proporção entre 1:1 e 3:1;
- c) Balanceamento de linha: A estação de aplicação, teoricamente, consegue operar com 100% de modelos 1 e 2, o que resulta em um impacto positivo na capacidade. No entanto, cenários com 100% de modelos 3 a 8 exigem uma quantidade mínima de modelos 1 e 2 para manter a estabilidade do processo e evitar queda significativa na capacidade produtiva. A proporção ideal identificada é de, no máximo, 2,5 unidades da soma de modelos 3 a 8 para cada 1 unidade da soma dos modelos 1 e 2.

Por fim, foram coletados os resultados (*outputs*) das simulações e gerados gráficos para a condição "Absoluto", considerando diferentes combinações de modelos e variantes correlacionadas. Os gráficos representam a distribuição das iterações para a produção de peças (em azul claro) e para os ciclos (em azul escuro), sendo divididos entre os parâmetros globais da variante (gráficos superiores) e o mix de modelos (gráficos inferiores). Os dados foram linearizados para melhor representatividade, e os recortes dos gráficos são apresentados a seguir:

FIGURA 35 - RESULTADOS DE VARIAÇÃO ENTRE MODELOS E VARIANTES NO IMPACTO EM PEÇAS E CICLOS



FONTE: Os autores (2025).

Com base nos dados obtidos a partir dos gráficos de distribuição apresentados, conclui-se que o aumento da participação da variante de cores metálicas, no intervalo de 20% a 45%, impacta negativamente a capacidade produtiva. Esse impacto se manifesta por meio de uma perda contínua na quantidade de ciclos (representada pela equação linear $y = -2,6923x + 627,35$) e por uma redução mais acentuada na saída diária de produtos ($y = -5,1055x + 576,94$).

Da mesma forma, o aumento da razão entre a soma dos modelos 3, 4, 5, 6, 7 e 8 em relação à soma dos modelos 1 e 2 — variando de uma proporção de 1:1 até 3:1 — também contribui para perdas significativas. Observa-se uma queda progressiva na quantidade de ciclos ($y = -24,699x + 599,1$) e uma redução ainda mais pronunciada na quantidade de peças produzidas ($y = -36,97x + 501,91$).

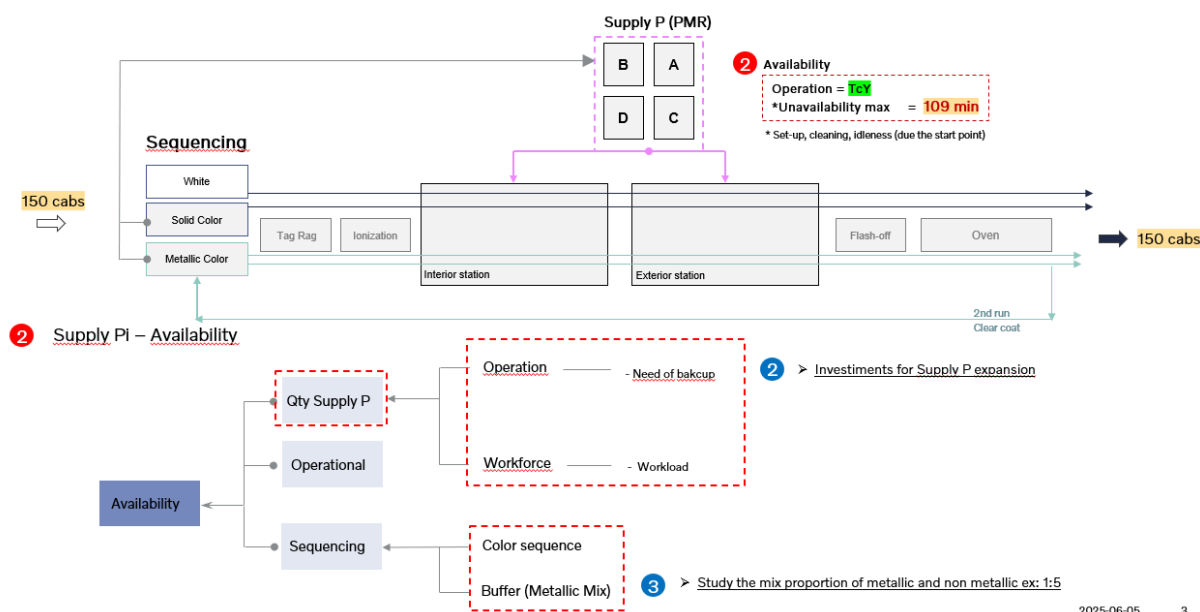
5.5.3 Aumento de Disponibilidade

Foi verificada a condição de disponibilidade dos equipamentos da linha de aplicação, incluindo robôs, estufas e transportadores, os quais foram considerados na simulação com base em suas médias históricas de disponibilidade. De acordo com uma avaliação preliminar, a substituição desses equipamentos não foi incluída no

escopo deste trabalho, uma vez que suas taxas de falha são baixas e não justificam investimentos adicionais no momento.

No entanto, identificou-se que as variações entre modelos e variantes de cor afetam diretamente o tempo de *setup* do equipamento responsável pelo fornecimento de tinta colorida (excluindo tinta branca e verniz). Atualmente, esse equipamento opera com quatro gabinetes, cada um capaz de armazenar uma lata de tinta. A cada lata utilizada, é possível realizar a aplicação em um único produto com cor diferenciada. Dependendo do modelo do produto, pode haver um retorno parcial de tinta ao gabinete, possibilitando sua reutilização em futuras aplicações, o que influencia diretamente no tempo e eficiência do *setup*.

FIGURA 36 - ILUSTRAÇÃO DO FLUXO DO ALIMENTADOR DE TINTAS COLORIDAS



FONTE: Os autores (2025).

Foram definidas as seguintes condições para medir o tempo de insaturação do processo de aplicação, considerando a indisponibilidade do equipamento de fornecimento de tinta:

- Condição 1: 3 gabinetes operacionais com mix de 20% de produtos metálicos (cenário atual com falha);
- Condição 2: 4 gabinetes operacionais com mix de 20% de produtos metálicos (cenário atual sem falha);
- Condição 3: 5 gabinetes operacionais com mix de 20% de produtos metálicos (cenário atual com investimento);

- d) Condição 4: 4 gabinetes operacionais com mix de 35% de produtos metálicos (cenário futuro sem investimento);
- e) Condição 5: 5 gabinetes operacionais com mix de 35% de produtos metálicos (cenário futuro com investimento);
- f) Condição 6: 6 gabinetes operacionais com mix de 35% de produtos metálicos (cenário futuro com investimento).

A seguir irão ser mostrados os resultados das simulações voltadas somente às condições comentadas:

FIGURA 37 - RESULTADOS DAS CONDIÇÕES DE GABINETES

1 FIFO_SupplyP FIFO_BlockTime=1:29:18.509 Existing_SupplyPs=1 FIFO_Presence=true FIFO_First=147 SupplyP_Total_Count=69 FIFO_CountUse=38 SupplyP1_Count=27 SupplyP1_Count1=true SupplyP1_Count11=151 SupplyP2_Count=21 SupplyP2_Count1=false SupplyP2_Count11=0 SupplyP3_Count=20 SupplyP3_Count1=false SupplyP3_Count11=0 SupplyP4_Count=0 SupplyP4_Count1=false SupplyP4_Count11=0 SupplyP5_Count=0 SupplyP5_Count1=false SupplyP5_Count11=0 SupplyP6_Count=0 SupplyP6_Count1=false SupplyP6_Count11=0 SupplyP7_Count=0 SupplyP7_Count1=false SupplyP7_Count11=0 SupplyP8_Count=0 SupplyP8_Count1=false SupplyP8_Count11=0	2 FIFO_SupplyP FIFO_BlockTime=58:23:2991 Existing_SupplyPs=4 FIFO_Presence=true FIFO_First=157 SupplyP_Total_Count=73 FIFO_CountUse=24 SupplyP1_Count=22 SupplyP1_Count1=false SupplyP1_Count11=0 SupplyP2_Count=20 SupplyP2_Count1=true SupplyP2_Count11=155 SupplyP3_Count=16 SupplyP3_Count1=false SupplyP3_Count11=0 SupplyP4_Count=13 SupplyP4_Count1=false SupplyP4_Count11=0 SupplyP5_Count=0 SupplyP5_Count1=false SupplyP5_Count11=0 SupplyP6_Count=0 SupplyP6_Count1=false SupplyP6_Count11=0 SupplyP7_Count=0 SupplyP7_Count1=false SupplyP7_Count11=0 SupplyP8_Count=0 SupplyP8_Count1=false SupplyP8_Count11=0	3 FIFO_SupplyP FIFO_BlockTime=0:00:00 Existing_SupplyPs=5 FIFO_Presence=false FIFO_First=123 SupplyP_Total_Count=73 FIFO_CountUse=12 SupplyP1_Count=22 SupplyP1_Count1=true SupplyP1_Count11=159 SupplyP2_Count=19 SupplyP2_Count1=true SupplyP2_Count11=163 SupplyP3_Count=14 SupplyP3_Count1=false SupplyP3_Count11=0 SupplyP4_Count=12 SupplyP4_Count1=false SupplyP4_Count11=0 SupplyP5_Count=6 SupplyP5_Count1=false SupplyP5_Count11=0 SupplyP6_Count=0 SupplyP6_Count1=false SupplyP6_Count11=0 SupplyP7_Count=0 SupplyP7_Count1=false SupplyP7_Count11=0 SupplyP8_Count=0 SupplyP8_Count1=false SupplyP8_Count11=0
4 FIFO_SupplyP FIFO_BlockTime=1:29:26.874 Existing_SupplyPs=4 FIFO_Presence=true FIFO_First=144 SupplyP_Total_Count=88 FIFO_CountUse=43 SupplyP1_Count=26 SupplyP1_Count1=true SupplyP1_Count11=144 SupplyP2_Count=23 SupplyP2_Count1=false SupplyP2_Count11=0 SupplyP3_Count=20 SupplyP3_Count1=false SupplyP3_Count11=0 SupplyP4_Count=16 SupplyP4_Count1=false SupplyP4_Count11=0 SupplyP5_Count=0 SupplyP5_Count1=false SupplyP5_Count11=0 SupplyP6_Count=0 SupplyP6_Count1=false SupplyP6_Count11=0 SupplyP7_Count=0 SupplyP7_Count1=false SupplyP7_Count11=0 SupplyP8_Count=0 SupplyP8_Count1=false SupplyP8_Count11=0	5 FIFO_SupplyP FIFO_BlockTime=23:19:000 Existing_SupplyPs=5 FIFO_Presence=false FIFO_First=141 SupplyP_Total_Count=90 FIFO_CountUse=13 SupplyP1_Count=22 SupplyP1_Count1=true SupplyP1_Count11=148 SupplyP2_Count=20 SupplyP2_Count1=false SupplyP2_Count11=0 SupplyP3_Count=19 SupplyP3_Count1=false SupplyP3_Count11=0 SupplyP4_Count=18 SupplyP4_Count1=true SupplyP4_Count11=146 SupplyP5_Count=11 SupplyP5_Count1=true SupplyP5_Count11=144 SupplyP6_Count=0 SupplyP6_Count1=false SupplyP6_Count11=0 SupplyP7_Count=0 SupplyP7_Count1=false SupplyP7_Count11=0 SupplyP8_Count=0 SupplyP8_Count1=false SupplyP8_Count11=0	6 FIFO_SupplyP FIFO_BlockTime=0:00:00 Existing_SupplyPs=6 FIFO_Presence=false FIFO_First=61 SupplyP_Total_Count=90 FIFO_CountUse=5 SupplyP1_Count=21 SupplyP1_Count1=false SupplyP1_Count11=0 SupplyP2_Count=20 SupplyP2_Count1=true SupplyP2_Count11=146 SupplyP3_Count=19 SupplyP3_Count1=true SupplyP3_Count11=148 SupplyP4_Count=16 SupplyP4_Count1=true SupplyP4_Count11=144 SupplyP5_Count=9 SupplyP5_Count1=false SupplyP5_Count11=0 SupplyP6_Count=5 SupplyP6_Count1=false SupplyP6_Count11=0 SupplyP7_Count=0 SupplyP7_Count1=false SupplyP7_Count11=0 SupplyP8_Count=0 SupplyP8_Count1=false SupplyP8_Count11=0

FONTE: Os autores (2025).

Com base na simulação realizada, utilizando os tempos de ciclo atualizados conforme a proposta de redução da Fase 2 (melhor cenário, conforme item 5.5.1) e considerando o *forecast* projetado (pior cenário, conforme o mix de modelos e proporção de metálicos indicado no item 5.5.2), foram avaliadas as condições previamente definidas.

Os resultados indicam que, com um mix de aproximadamente 25% de produtos metálicos, o cenário atual — com quatro gabinetes disponíveis — já apresenta bloqueios causados por indisponibilidade do equipamento de fornecimento de tinta. Para garantir o atendimento pleno da demanda futura, sem comprometimento

de performance ou perdas de produção, será necessário o investimento na adição de dois gabinetes, totalizando seis unidades operacionais.

5.5.4 Proposta de Otimização

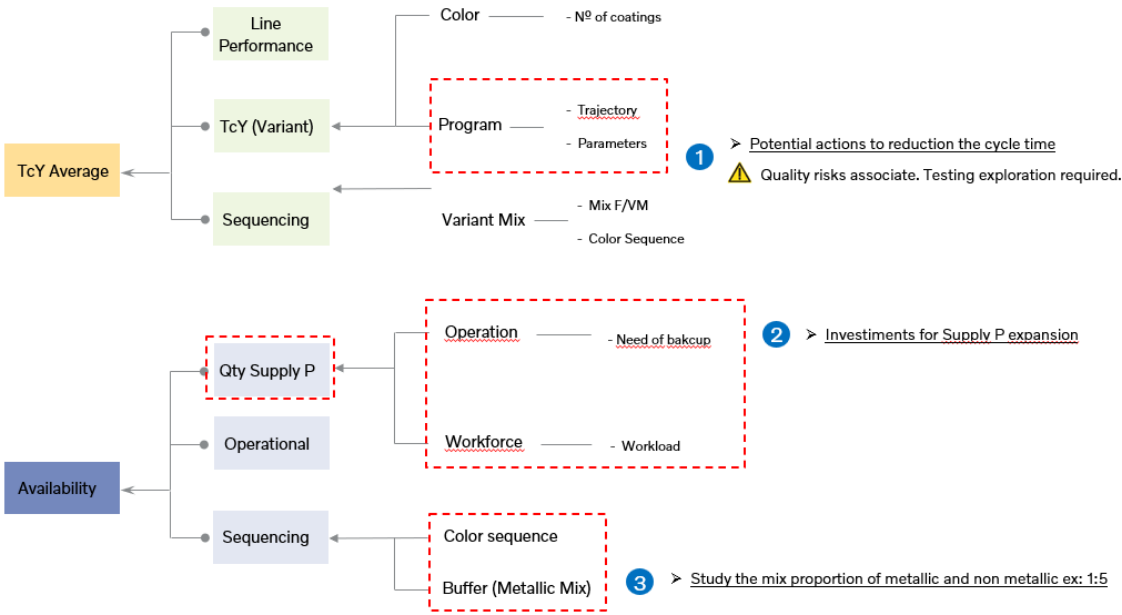
A avaliação da efetividade das propostas de otimização é um passo fundamental para garantir que as mudanças sugeridas gerem os resultados desejados. A partir das medidas a serem inseridas na simulação, será possível verificar se as mudanças propostas para otimização da linha foram efetivas.

Como cenário futuro de validação, considerou-se um mix de produção representando a pior condição próxima da realidade: uma proporção de 1,8:1 entre a soma dos modelos 3, 4, 5, 6, 7 e 8 em relação aos modelos 1 e 2, com uma participação geral de 30% de cores metálicas. Diante dessa configuração, a proposta de otimização inclui a redução do tempo médio de ciclo na aplicação por robôs, de 387 para 260 segundos, além da aquisição de dois gabinetes adicionais para o *setup* de cores, totalizando seis unidades.

Para acompanhar essa otimização, as demais estações da linha de aplicação devem operar com *takt time* inferior ao novo tempo de ciclo proposto. Estações manuais, estufas e transportadores já apresentam margem para essa redução, seja por meio de ajustes operacionais, seja por rebalanceamento de recursos atualmente ociosos. Além disso, o tempo de cura atual dos produtos permite tais ajustes sem comprometer a qualidade final.

As propostas estão detalhadas nas figuras a seguir:

FIGURA 38 - FRENTES DE MODIFICAÇÃO DE PROCESSO PARA ADEQUAÇÃO DE LINHA PARA FORECASTS FUTUROS



FONTE: Os autores (2025).

FIGURA 39 - PROPOSTA DE REDUÇÃO DE TEMPO DE CICLO DOS ROBÔS POR VARIANTE DE MODELO E VARIANTE DE COR

Cobertura	Modelo	%	AS-IS c/transf. (s)	TO-BE c/transf. (s)
Solido	VML1H1	16.99%	295	175
Solido	VML2H1	14.24%	306	186
Solido	FH_SLP	2.48%	341	221
Solido	FH_HSLP	30.55%	345	225
Solido	FH-XHSLP	0.00%	342	222
Solido	FM_SLP	1.64%	315	195
Solido	FM_DAY	6.89%	241	121
Solido	FM_HSLP	1.28%	343	223
Metalico	VML1H1	0.35%	507	357
Metalico	VML2H1	1.76%	517	367
Metalico	FH_SLP	0.19%	606	456
Metalico	FH_HSLP	22.12%	602	452
Metalico	FH-XHSLP	0.67%	653	503
Metalico	FM_SLP	0.36%	544	394
Metalico	FM_DAY	0.44%	443	293
Metalico	FM_HSLP	0.05%	562	412
			387	260

FONTE: Os autores (2025).

Como listado no Capítulo 3.9, os critérios de avaliação utilizados para analisar o desempenho da linha de pintura sob os cenários propostos incluem:

- Aumento da Capacidade Produtiva (UPH - *Units Per Hour*): Medir o volume de produtos que a linha é capaz de processar por unidade de tempo após a implementação das melhorias propostas. O objetivo é aumentar o *throughput* da linha;
- Redução dos Tempos de Espera: Analisar a diminuição do tempo que os produtos ficam parados em filas (WIP) ou em *buffers* antes de serem processados pela próxima estação. A minimização dos tempos de espera diretamente contribui para a fluidez do processo e balanceamento da linha;

c) Redução da Taxa de Ocupação das Restrições: Verificar se a implementação das melhorias diminui a taxa de utilização das estações identificadas como restritivas, indicando que a restrição está sendo aliviada e que o fluxo de produção está mais balanceado;

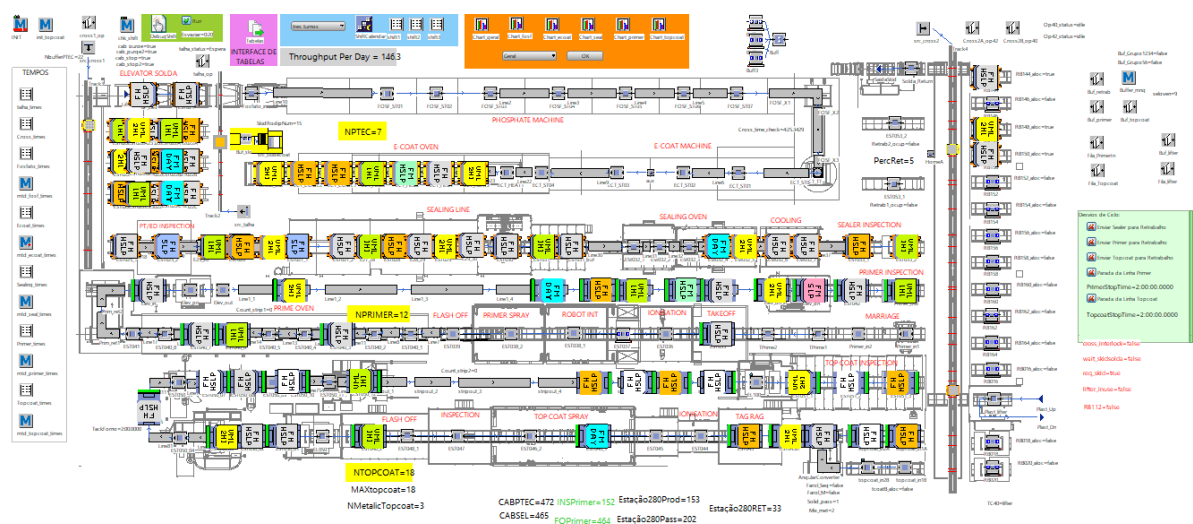
Após a modelagem completa da linha de pintura com as propostas de modificação previamente definidas, iniciou-se a fase de validação por meio de simulação. Essa simulação abrangeu uma semana inteira de produção, respeitando os horários estabelecidos no calendário de turnos (*Shift Calendar*). Ao final desse período de observação, foram coletados os dados referentes ao número de unidades produzidas diariamente na saída do processo final, bem como informações sobre a recirculação de produtos na linha de aplicação de tinta.

Para avaliar a efetividade das propostas de otimização, foram considerados os seguintes critérios:

- Aumento da capacidade produtiva (UPH – *Units Per Hour*): ganho de capacidade com pelo menos 200 ciclos por dia e uma saída mínima de 150 peças diárias;
- Redução dos tempos de espera: diluição ou estabilização dos bloqueios anteriormente identificados em outras etapas do processo;
- Redução da taxa de ocupação das restrições: verificação da diminuição dos bloqueios na estação anteriormente considerada gargalo e identificação de um novo ponto de restrição, caso existente.

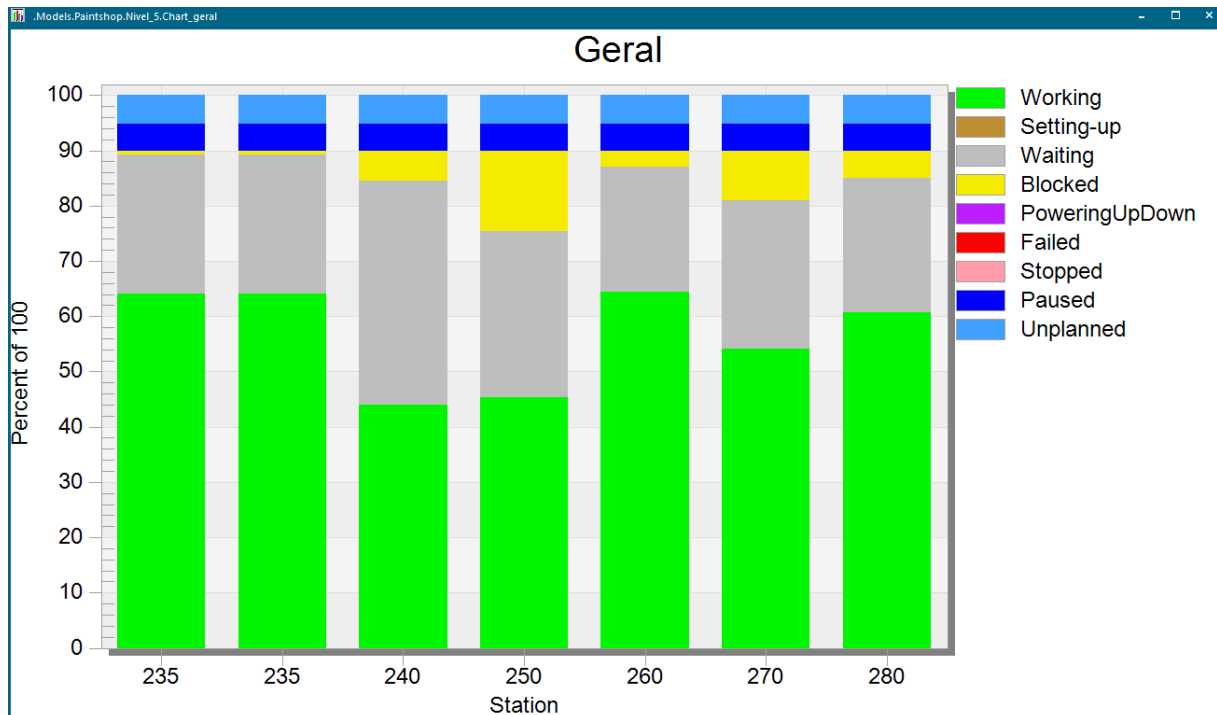
Os resultados dessas análises estão apresentados nas figuras a seguir, extraídas diretamente do software utilizado.

FIGURA 40 - SIMULAÇÃO EM 3 DIAS APÓS AS MODIFICAÇÕES



FONTE: Os autores (2025).

GRÁFICO 3 - STATUS DAS ESTAÇÕES PÓS MELHORIAS



FONTE: Os autores (2025).

FIGURA 41 - VOLUME PRODUZIDO POR DIA PÓS MELHORIAS

Estação280Prod=153

Estação280Pass=202

FONTE: Os autores (2025).

Realizando a mesma análise desses novos indicadores de volume, ocupação da linha e o gráfico de status das estações, realizadas nas seções 5.2 e 5.3, respectivamente, é possível destacar os seguintes pontos:

- A linha apresentou uma média diária de 153 produtos finalizados e 202 ciclos realizados;
- 49 produtos com acabamento metálico passaram pela estação de aplicação de tinta (diferença entre Estação280Pass e Estação280Prod);
- Isso corresponde a 32,6% de participação de cores metálicas no volume total processado;

- d) Houve atendimento integral da meta de *forecast* para o ano de 2026 e atendimento parcial das metas projetadas para 2027;
- e) Observou-se uma redução no percentual de saturação e bloqueio da estação 270, que anteriormente concentrava o principal gargalo da linha, demonstrado pela diminuição da barra amarela no gráfico;
- f) Contudo, ocorreu formação de bloqueios na estação 250 (entrada da linha de primer), ponto que não foi contemplado pela modificação implementada.

Diante desses resultados, conclui-se que a intervenção realizada no gargalo da estação 270 mostrou-se eficaz dentro do escopo desse estudo. No entanto, para projetos futuros de otimização ou expansão de capacidade, recomenda-se a análise de novos pontos críticos no processo de pintura, onde novos gargalos tendem a surgir, como, por exemplo, na linha de primer.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo a simulação e modelagem da linha de pintura de uma indústria, com foco na otimização de processos e resultados. Através da metodologia proposta, foi possível mapear detalhadamente o fluxo produtivo, identificar o gargalo principal e simular diferentes cenários de otimização.

Verificou-se que, com o auxílio do software *Tecnomatix Plant Simulation*, as possíveis soluções e melhorias na produção foram analisadas e processadas com êxito, obtendo resultados positivos para as sugestões de melhoria efetuadas. A simulação computacional, ao permitir a compreensão do comportamento da linha e a detecção de gargalos e problemas de concepção sem a necessidade de intervenções físicas onerosas e disruptivas, demonstrou ser uma ferramenta inestimável. Isso mostra que 'vale a pena' investir em simulação, pois ela minimiza riscos e acelera o processo de tomada de decisão. As mudanças na empresa poderiam, portanto, ser efetuadas com maior segurança.

Embora o levantamento de dados no dia a dia tenha apresentado dificuldades devido às interrupções do processo, o trabalho foi considerado assertivo, fornecendo uma base sólida para a continuidade e aprimoramentos no processo de produção da empresa analisada. Conclui-se, assim, que o uso de softwares para simulação é uma excelente ferramenta para o aperfeiçoamento de processos, não apenas na área industrial, mas em qualquer domínio que envolva fluxos complexos.

É importante ressaltar que a simulação desenvolvida neste trabalho atua como um Modelo Digital (Digital Model - DM) da linha de pintura, onde os dados da operação real são inseridos manualmente para a análise e simulação. Para que este modelo evolua para um Gêmeo Digital completo, seria necessária a implementação de sistemas de aquisição automática de dados (como IoT e RFID) para alimentar a simulação em tempo real, permitindo uma interação bidirecional e o controle da linha física a partir do modelo virtual, conforme discutido na seção 2.1.5. Este trabalho estabelece as bases para essa evolução futura, demonstrando os benefícios já alcançáveis com um modelo digital bem construído."

Essas modificações deixam claro o status atual da sua simulação (Modelo Digital) e o potencial de evolução para um Gêmeo Digital, sem desvalorizar o trabalho já realizado. Lembre-se de revisar o restante do documento para garantir que o fluxo e a terminologia estejam consistentes com essas mudanças

7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade e aprofundar os resultados obtidos neste trabalho, sugere-se as seguintes recomendações para pesquisas futuras:

Simulação de Otimização do Sequenciamento (*Scheduling*): Explorar o impacto de diferentes regras de sequenciamento de veículos na linha de pintura, especialmente na estação de aplicação de tinta. A aplicação de algoritmos de otimização poderia ser simulada para encontrar a sequência ideal de produtos que minimize os tempos de espera e maximizem o rendimento, considerando o mix de cores e modelos.

Análise de Investimento para Propostas de Otimização: Quantificar os custos associados às propostas de otimização (por exemplo, adição de robôs, novas tecnologias de secagem) e realizar uma análise de viabilidade econômica, como ROI (Retorno sobre o Investimento) e *payback*, para embasar a decisão de implementação.

Modelagem de Variabilidade de Processo: Incluir na simulação a variabilidade intrínseca dos tempos de processo (por exemplo, distribuição de tempos em vez de apenas a média) e a probabilidade de falhas de equipamentos ou retrabalhos, para tornar o modelo ainda mais robusto e preditivo.

Integração com Dados em Tempo Real: Investigar a possibilidade de integrar o modelo de simulação com dados de produção em tempo real (conceito de Gêmeo Digital avançado), permitindo um monitoramento contínuo e a capacidade de prever problemas antes que ocorram na linha física.

Otimização do Consumo de Energia: Analisar, por meio da simulação, o consumo de energia nas diferentes estações e propor otimizações para a redução do uso energético, alinhando-se aos princípios de sustentabilidade industrial.

Estas abordagens futuras podem fornecer insights ainda mais profundos e práticos para a gestão e otimização da linha de pintura.

8 REFERÊNCIAS

AMORIN, Larissa; RODRIGUES, Thales Volpe; SILVA JUNIOR, José Ferreira da. Melhoria de eficiência produtiva de uma linha de produção: um estudo de caso em uma indústria de produtos médicos. ***Brazilian Journal of Production Engineering***, São Mateus, ES, v. 6, n. 7, p. 68–89, 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/bjpe/article/view/33081>. Acesso em: 13 maio 2025. DOI: <https://doi.org/10.47456/bjpe.v6i7.33081>.

ASSAD NETO, Anis et al. Modeling production disorder: Procedures for digital twins of flexibility-driven manufacturing systems. ***International Journal of Production Economics***, v. 260, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108846>.

BANGSOW, Steffen. ***Tecnomatix Plant Simulation: modeling and programming by means of examples***. 2. ed. Springer, 2010.

BARINO, Raphael Sepulveda; CUNHA, Claudia Brito da. Otimização de área de armazenagem para abastecimento de linha de produção: estudo de caso em uma manufatura no setor de pneumáticos. ***Revista Eletrônica Multidisciplinar UNIFACEAR***, [S. l.], v. 2, n. 12, p. 1–14, 2024. Disponível em: <https://revista.unifacear.edu.br/rem/article/view/608>. Acesso em: 13 maio 2025.

CORALLO, Angelo et al. Shop floor digital twin in smart manufacturing: a systematic literature review. ***Sustainability (Switzerland)***, v. 13, n. 23, p. 12987, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su132312987>.

DINIZ, Ana Carolina Parise. **O uso de ferramentas de simulação humana para a avaliação de cargas físicas de trabalho: uma análise comparativa entre a aplicação em ambiente real na indústria aeronáutica e ambiente digital**. 2014. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

FERNANDES, Marcelo Augusto Barbosa. **Simulação computacional aplicada ao planejamento e projeto da área de armação de carrocerias na**

indústria automobilística. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Automotiva) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. DOI: <https://doi.org/10.11606/D.3.2009.tde-30122014-163334>. Acesso em: 13 maio 2025.

FULLER, Aidan et al. Digital twin: enabling technologies, challenges and open research. **IEEE Access**, v. 8, p. 108952–108971, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>.

GLAESSGEN, Edward; STARGEL, David. The digital twin paradigm for future NASA and U.S. Air Force vehicles. In: **Aerospace Conference**, 2012 IEEE. [S. l.]: IEEE, 2012. p. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2012-1818>.

GONZALEZ, José Henrique da Costa Queiroz. **Virtualização e simulação de processos produtivos em Plant Simulation: estudo de caso em setor de lentes no Polo Industrial de Manaus**. 2021. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2021.

GRAESSLER, I.; POEHLER, A. Integration of a digital twin as human representation in a scheduling procedure of a cyber-physical production system. In: **IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management – IEEM**, 2017. [S. l.]: IEEE, 2017. p. 289–293. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEM.2017.8289898>.

GRIEVES, Michael. Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises. **International Journal of Product Development**, v. 2, n. 1/2, p. 71–89, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJPD.2005.006669>.

KUTZ, Vladimir et al. Synchronizing physical factory and its digital twin through an iIT middleware. **Proceedings of the Estonian Academy of Sciences**, v. 68, n. 4, p. 364–370, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3176/proc.2019.4.03>.

MA, Xin et al. Artificial intelligence enhanced interaction in digital twin shop-floor. **Procedia CIRP**, v. 100, p. 858–863, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.031>.

MEIRA, Marcelo da Silva. **Otimização de produção de uma linha de montagem mista na indústria automotiva por meio de programação matemática**. 2015. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

PASIANOTTO, Henrique Klesse et al. Unveiling the future of smart manufacturing: a review of scientific articles on digital twin shop floor and optimization analyses. In: **SIMEA 2023 – 31º Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva**. [S. l.]: AEA, 2023. p. 1–19.

PANIAGO, D.; SILVEIRA, T.; ZEURI, R. **A utilização do software ARENA na simulação de linha de produção de uma empresa fabricante de plástico, para determinação de gargalo na linha de produção, análise de probabilidade do processo e simulação de diferentes cenários e suas consequências em entrega e eficiência da linha**. 2024. (Manuscrito não publicado).

POZZEBON, Bruna. **Proposta de modelo de simulação na indústria automotiva como ferramenta da indústria 4.0** [recurso eletrônico]. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

Otimização de Área de Armazenagem para Abastecimento de Linha de Produção: Estudo de Caso em uma Manufatura no Setor de Pneumáticos. **Revista Eletrônica Multidisciplinar UNIFACEAR**, [S. l.], v. 2, n. 12, p. 1–14, 2024. Disponível em: <https://revista.unifacear.edu.br/rem/article/view/608>. Acesso em: 13 maio. 2025.

RANDON, Gabriel; CECCONELLO, Ivandro. **Simulação como tecnologia habilitadora da Indústria 4.0: uma revisão da literatura**. *Scientia cum Industria*, v. 7, n. 2, p. 117–125, 2019.

RIBEIRO, Angela A.; GRECA, Ileana M. Simulações computacionais e ferramentas de modelização em educação química: uma revisão de literatura publicada. **Química Nova**, v. 26, n. 4, p. 542–549, 2003.

SANTOS, Carlos Henrique dos et al. A decision support tool for operational planning: a digital twin using simulation and forecasting methods. **Production**, v. 30, p. 1–17, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-6513.20200018>.

SANTOS, Eliton Smith dos. **Simulação computacional no auxílio à tomada de decisão nos processos industriais: utilizando a ferramenta Tecnomatix Plant Simulation 9.0**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.

SANTOS, Tatiane Pinto dos. **Implementação de um sistema de controle de WIP em uma linha de montagem industrial: uma aplicação do software Plant Simulation**. 2024. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2024.

SILVA, Adriele Andrade et al. Uso do Plant Simulation para aumento de produtividade através do gerenciador de experimentos. **Revista Brasileira de Mecatrônica**, São Caetano do Sul, SP, v. 5, n. 1, p. 1–18, jul./set. 2022.

SOBRINO, Daynier Rolando Delgado et al. Into the early steps of Virtual Commissioning in Tecnomatix Plant Simulation using S7-PLCSIM Advanced and STEP 7 TIA Portal. **MATEC Web of Conferences**, v. 299, p. 02005, 2019.

TAO, Fei; ZHANG, Meng. Digital twin shop-floor: a new shop-floor paradigm towards smart manufacturing. **IEEE Access**, v. 5, p. 20418–20427, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2756069>.

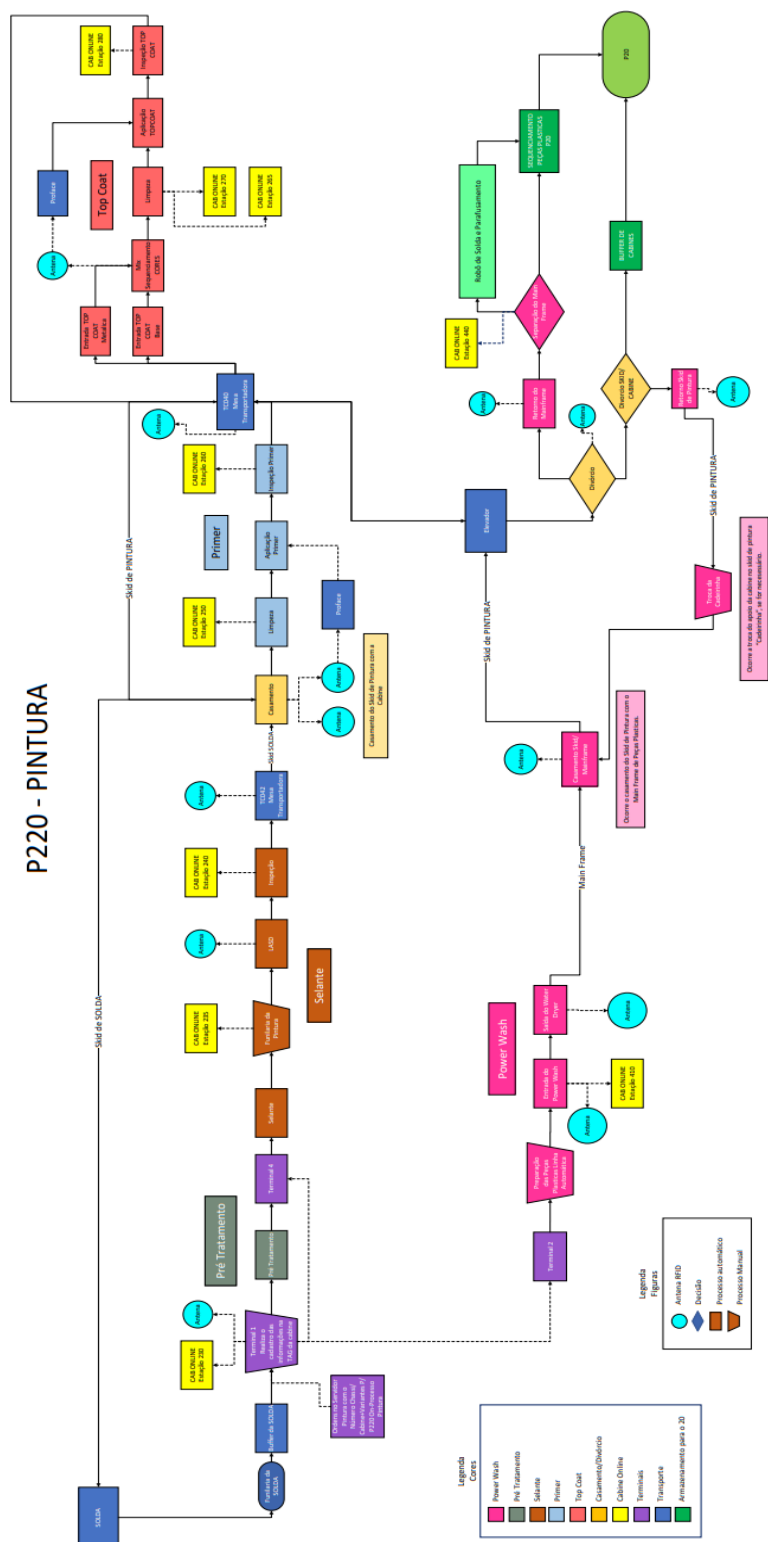
TLIBA, Khalil et al. Digital twin-driven dynamic scheduling of a hybrid flow shop. **Journal of Intelligent Manufacturing**, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-022-01922-3>.

USO DE SOFTWARE DE SIMULAÇÃO PARA MELHORIA INDUSTRIAL. **RECIMA21 – Revista Científica Multidisciplinar**, [S. l.], v. 5, n. 3, p. e534914, 2024. DOI: <https://doi.org/10.47820/recima21.v5i3.4914>. Disponível em:

<https://recima21.com.br/index.php/recima21/article/view/4914>. Acesso em: 13 maio 2025.

9 APÊNDICE 1

APÊNDICE 1 - FLUXOGRAMA DA LINHA DE PINTURA



FONTE: Os autores (2024).

APÊNDICE 2 - CRONOGRAMA

[illegible]

FONTE: Os autores (2024)

10 ANEXO 1