

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

GABRIEL ALEJANDRO DE ARAÚJO SORIANO

**ANÁLISE DESCRITIVA POR MEIO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE
PRESCRIÇÕES DE MELHORIAS EM PROCESSOS INDUSTRIAIS**

JUIZ DE FORA

2025

GABRIEL ALEJANDRO DE ARAÚJO SORIANO

**ANÁLISE DESCRITIVA POR MEIO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE
PRESCRIÇÕES DE MELHORIAS EM PROCESSOS INDUSTRIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Orientador: Prof. D. Sc., Antonio Angelo Missiaggia Picorone

JUIZ DE FORA

2025

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

De Araújo Soriano, Gabriel Alejandro.

Análise Descritiva por meio de Simulação Computacional de Prescrições de Melhorias em Processos Industriais / Gabriel Alejandro De Araújo Soriano. -- 2025.

70 f.

Orientador: Antonio Angelo Missiaggia Picorone

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2025.

1. Simulação Computacional. 2. Mapeamento do Fluxo de Valor. 3. Flexsim. I. Missiaggia Picorone, Antonio Angelo, orient. II. Título.

GABRIEL ALEJANDRO DE ARAÚJO SORIANO

**ANÁLISE DESCRITIVA POR MEIO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL
DE PRESCRIÇÕES DE MELHORIAS EM PROCESSOS INDUSTRIAIS**

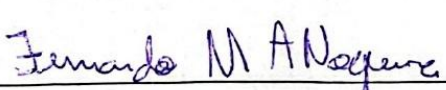
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado a Faculdade de Engenharia
da Universidade Federal de Juiz de Fora,
como requisito parcial para a obtenção do
título de Engenheiro de Produção.

Aprovada em 12 de agosto de 2025.

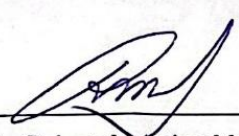
BANCA EXAMINADORA



D. Sc. Antonio Angelo Missiaggia Picorone (Orientador)
Universidade Federal de Juiz de Fora



D. Sc. Fernando Marques de Almeida Nogueira
Universidade Federal de Juiz de Fora



D. Sc. Roberto Malheiros Moreira Filho
Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que fizeram parte deste período de graduação. No meio acadêmico, todos os professores, todas as amizades que fiz e todos os desafios que enfrentei contribuíram para meu desenvolvimento, não apenas profissional, mas também pessoal. Amadurecer emocionalmente foi fundamental para concluir esta etapa da minha vida de forma plena e proveitosa.

Agradeço à Deus que esteve comigo em todos os momentos, que me colocou no caminho certo em etapas complicadas que passei e que me deu forças mentais e físicas para enfrentar os desafios que encontrei ao longo da minha graduação.

Agradeço à minha namorada, ao meu irmão e ao meu cachorro, que compartilharam comigo todos os momentos de alegria, dificuldade e amor ao longo do curso. Todas as experiências maravilhosas e únicas que vivi com eles ficarão marcadas para o resto da minha vida, com toda certeza.

Agradeço também ao meu pai, que me proporcionou a oportunidade de cursar a faculdade em outra cidade, arcando com os custos necessários e confiando que eu cumpriria essa responsabilidade, e à minha mãe, que me apoiou em todos os momentos da forma que pôde, me acompanhando a Juiz de Fora, fornecendo alimentação e garantindo que nada me faltasse. Agradeço ao meu professor e orientador Ângelo Picorone, que me auxiliou minuciosamente durante o último ano, com inúmeros encontros para ajustar todos os pontos necessários à conclusão deste trabalho.

Por fim, agradeço aos professores e colegas de Ciência da Computação que tive o prazer de conhecer e com quem compartilhei experiências acadêmicas e prazerosas, as quais contribuíram para construir uma memória afetiva valiosa sobre a faculdade como um todo.

RESUMO

Este estudo tem como objetivo oferecer uma análise quantitativa, por meio da simulação computacional, a um trabalho acadêmico de referência que se limite a abordagens teóricas e qualitativas. A escolha deste trabalho de referência foi baseada em alguns critérios previamente definidos, os quais o tornam adequado à modelagem computacional. O estudo selecionado propôs a reformulação do processo produtivo de uma indústria metalúrgica de pequeno porte, com base na abordagem da Produção Enxuta e no Mapeamento do Fluxo de Valor (MFV). Nesse contexto, o presente estudo busca realizar uma análise descritiva, integrando a simulação computacional, com o objetivo de avaliar, de forma quantitativa, os impactos das melhorias sugeridas para o sistema produtivo. Para isso, foram modeladas duas versões do sistema: a situação atual, representando o funcionamento real da fábrica, e a situação futura, incorporando as propostas de melhoria. A partir das saídas geradas pelos modelos, realizaram-se análises comparativas evidenciando os ganhos decorrentes das implementações. Os resultados obtidos por meio da simulação também foram confrontados com as expectativas do estudo acadêmico de referência. A modelagem computacional foi desenvolvida utilizando o software FlexSim®. Este estudo exemplifica a importância de se unir uma ferramenta quantitativa com uma qualitativa para trazer maior confiabilidade nas implementações propostas por meio da simulação, onde é possível testar diversos cenários sem incorrer em grandes custos.

Palavras-chave: Simulação computacional; Mapeamento do Fluxo de Valor; FlexSim;

ABSTRACT

This study aims to provide a quantitative analysis, through computer simulation, of an academic reference work that is limited to theoretical and qualitative assessments. The selection of this reference study was based on predefined criteria that made it suitable for computational modeling. The chosen study proposed the restructuring of the production process of a small-sized metallurgical industry, based on the Lean Manufacturing approach and Value Stream Mapping (VSM). In this context, the present study seeks to conduct a descriptive analysis by integrating computer simulation to quantitatively evaluate the impacts of the suggested improvements on the production system. To this end, two versions of the system were modeled: the current situation, representing the actual operation of the factory, and the future situation, incorporating the proposed improvements. Based on the outputs generated by the models, comparative analyses were carried out, highlighting the gains resulting from the implementations. The results obtained through the simulation were also compared with the expectations established in the academic reference study. The computational modeling was developed using FlexSim® software. This study exemplifies the importance of combining a quantitative tool with a qualitative one to provide greater reliability in the proposed implementations through simulation, where it is possible to test various scenarios without incurring significant costs.

Keywords: Computer simulation; Value Stream Mapping; FlexSim;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Metodologia para um estudo de simulação.....	32
Figura 2 - Simbologia utilizada na técnica IDEF-SIM.....	39
Figura 3 – Mapofluxograma da família de produtos no layout atual	46
Figura 4 – Mapeamento do Fluxo de Valor do estado atual.....	47
Figura 5 – Mapofluxograma da família de produtos no layout proposto	49
Figura 6 – Mapeamento do Fluxo de Valor do estado futuro.....	50
Figura 7 - Modelo conceitual em IDEF-SIM do estado atual.	54
Figura 8 – Representação visual do modelo computacional do estado atual desenvolvido no FlexSim®.....	57
Figura 9 – Configuração do recurso Time Table no FlexSim® para definição do turno de trabalho.	57
Figura 10 – Configuração da distribuição normal do tempo de ciclo no FlexSim® para a operação de Solda.....	58
Figura 11 – Definição da capacidade máxima do estoque intermediário antes da operação de Solda.	59
Figura 12 – Definição das Labels para controle da produção diária por setor no FlexSim®. .	59
Figura 13 – Exemplo de extração do tempo médio de permanência em estoque (AvgStaytime) no FlexSim®.....	60
Figura 14 - Modelo conceitual em IDEF-SIM do estado futuro.	62
Figura 15 – Representação visual do modelo computacional do estado futuro desenvolvido no FlexSim®.....	64
Figura 16 – Supermercados Kanban do modelo computacional do estado futuro.	65
Figura 17 – Programação dos triggers no setor de Corte e no Supermercado.....	66
Figura 18 – Definição da Label para controle da produção semanal nos setores de Tratamento de Superfície e Embalagem no FlexSim®.	67
Figura 19 – Estatísticas do recurso Sink e quantidade expedida durante a simulação do modelo do estado atual.	74
Figura 20 – Estatísticas do recurso Sink e quantidade expedida durante a simulação do modelo do estado futuro.	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise comparativa dos cinco trabalhos selecionados.	31
Tabela 2 - Tempos Médios de Permanência em cada Estoque do Processo.	56
Tabela 3 – Comparação entre os dados reais e os resultados do modelo para fins de validação	61
Tabela 4 – Resultados esperados pelos autores para os Tempos Médios de Permanência em cada Estoque/Supermercado.....	64
Tabela 5 – Tabela Comparativa dos Tempos Médios de Permanência nos Estoques por Etapa do Processo.	70
Tabela 6 – Tempo Médio de Permanência em Estoque (Modelo Futuro x Resultados Esperados).	72

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comparativo do Tempo Médio de Permanência nos Estoques (dias).....	70
Gráfico 2 – Comparativo entre modelo atual e modelo futuro: Lead Time Médio e Capacidade Efetiva.....	71
Gráfico 3 – Taxa de utilização por estação de trabalho do modelo do estado atual e futuro. .	72
Gráfico 4 – Comparativo de Tempos e Diferença Percentual por Estação (Modelo Futuro x Resultados Esperados).....	73

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

MFV	Mapeamento do Fluxo de Valor
SED	Simulação a Eventos Discretos

SUMÁRIO

<u>1. INTRODUÇÃO.....</u>	<u>23</u>
1.1 JUSTIFICATIVA.....	24
1.2 ESCOPO DO TRABALHO	25
1.3 ELABORAÇÃO DOS OBJETIVOS.....	27
1.4 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA	28
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	34
<u>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</u>	<u>35</u>
2.1 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	35
2.2 MODELO CONCEITUAL: DEFINIÇÃO E TIPOS.....	37
2.3 MODELO COMPUTACIONAL	40
2.4 SOFTWARES DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	41
2.5 SIMULAÇÃO EM AMBIENTES DE MANUFATURA	43
<u>3. ANÁLISE QUANTITATIVA DAS PROPOSTAS</u>	<u>45</u>
3.1 DESCRIÇÃO DO TRABALHO SELECIONADO	45
3.2 INTEGRAÇÃO DA SIMULAÇÃO AO MAPEAMENTO DO FLUXO DE VALOR....	51
3.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	73
<u>4. CONSIDERAÇÕES FINAIS</u>	<u>77</u>
<u>REFERÊNCIAS.....</u>	<u>78</u>

1. INTRODUÇÃO

A rápida evolução das tecnologias e a crescente competitividade entre as empresas impõem um nível de excelência cada vez maior nos processos produtivos. Para enfrentar esse desafio, a modelagem e simulação computacional se destacam como ferramentas essenciais, permitindo às empresas otimizar seus sistemas visualizando os resultados antes mesmo das implantações, sem a necessidade de interrupções dos processos produtivos, e minimizando os custos associados a essas mudanças (QUEIROZ; MIRANDA, 2013). Essa abordagem proporciona maior segurança e eficiência na análise e implementação de melhorias, visto que "a simulação permite avaliar diferentes cenários antes de qualquer ação ser tomada" (SAMPAIO; OLIVEIRA, 2013).

No caso de setores industriais, a complexidade dos processos, a variabilidade de demanda e as diferentes etapas de produção tornam o ambiente ideal para a aplicação de modelagem e simulação. A modelagem computacional oferece a oportunidade de representar virtualmente o comportamento de cada etapa do processo produtivo, enquanto a simulação permite testar cenários em condições controladas, algo que pode ser extremamente benéfico para o setor industrial como um todo, onde as empresas precisam de inovação para se manterem competitivas. Nesse contexto, a aplicação dessas tecnologias pode ajudar a organizar o fluxo produtivo, melhorar a qualidade do produto final e promover uma maior previsibilidade de resultados. De acordo com Banks e Chwif (2010), "visualizar o desempenho do sistema produtivo e antecipar problemas aumenta a eficiência operacional", algo essencial em um mercado que enfrenta desafios decorrentes da desorganização e informalidade.

Ao aplicar a modelagem e simulação computacional, busca-se estudar as melhorias previamente sugeridas, analisando quantitativamente seu impacto no processo produtivo. O foco está em verificar a viabilidade e os benefícios das mudanças propostas, garantindo possíveis benefícios como uma melhor capacidade produtiva, equilíbrio da carga de trabalho, minimização de ociosidade ou eliminação de gargalos. Como afirmado por Carneiro e Pinto (2010), "essas ferramentas fornecem uma visão sistêmica do processo, permitindo que medidas corretivas sejam tomadas de maneira proativa". Dessa forma, a empresa pode garantir um planejamento mais assertivo, eliminando ineficiências e otimizando suas operações de forma contínua.

1.1 JUSTIFICATIVA

A escolha do tema "Análise descritiva por meio de simulação computacional de prescrições de melhorias em processos industriais" se justifica pela necessidade de um embasamento quantitativo de propostas de melhorias e sugestões de alterações nos processos produtivos. Observa-se que muitos trabalhos acadêmicos, encontrados em repositórios, concentram-se em análises qualitativas que, embora relevantes, podem não fornecer, na percepção do autor, a confiabilidade necessária sobre a eficácia ou a viabilidade prática das propostas apresentadas. Além disso, observa-se que diversos estudos, principalmente aqueles que utilizam a ferramenta de Mapeamento de Fluxo de Valor (MFV), sugerem a integração da simulação computacional como forma de aprofundar a análise e embasar melhor as decisões. Dessa forma, este trabalho busca preencher essa lacuna, utilizando ferramentas de modelagem e simulação computacional para respaldar, de forma objetiva, as mudanças sugeridas, contribuindo para uma tomada de decisão mais confiável e embasada numericamente.

Ferramentas como a simulação computacional permitem testar melhorias e tomar decisões com base em dados reais, sem a necessidade de intervenções físicas no sistema. Em empresas menores, onde os recursos são limitados, a simulação computacional oferece uma forma de visualizar o sistema além de implementar mudanças, respondendo a questões tipo: “o que aconteceria se” (*what-if*), assim economizando recursos econômicos e tempo (PEREIRA, 2000).

Além disso, a simulação computacional pode revelar problemas ocultos ou não perceptíveis e oferecer soluções concretas para melhorá-los sem demandar altos investimentos financeiros ou tempo para testar diferentes abordagens no mundo real. Dessa forma, o uso de simulação pode servir como uma estratégia de crescimento e competitividade, oferecendo uma ferramenta acessível para inovação e eficiência operacional.

Segundo Torga (2007), a simulação computacional é uma poderosa ferramenta na análise de processos e sistemas complexos, tornando possível o estudo, a análise e a avaliação de situações que não seriam possíveis na vida real. Nesta linha de raciocínio, (1998, *apud* Torga, 2007) destaca as seguintes vantagens para o uso da simulação:

1. Possibilidade de se testar novos designs e layouts sem a implementação real dos recursos necessários;

2. Pode ser utilizada para explorar novas políticas de alocação de funcionários, procedimentos operacionais, tomadas de decisão, estruturas organizacionais, fluxos de informação e etc. Sem causar nenhuma ruptura no sistema real da organização;
3. A simulação permite a identificação de gargalos nos fluxos de informação, material e produto e realiza testes com o objetivo de aumentar cada taxa;
4. Permite a realização de testes de hipótese em relação a como e por que certos fenômenos ocorrem no sistema;
5. A simulação permite o controle do tempo. Assim, sistemas podem ser simulados por meses ou anos em questão de segundos e fornecer resultados visualizados em longo prazo. Além disso, pode-se diminuir a velocidade da simulação para a realização de estudos;
6. Permite adquirir conhecimento em relação a como o sistema funciona e a identificação de quais são as variáveis que mais afetam a performance do modelo;
7. A simulação significa em uma maior possibilidade de realização de experimentos com situações não familiares e responder a questões “e se”.

Tais vantagens destacam alguns dos benefícios que se pode obter com a prática da simulação em qualquer sistema produtivo. De uma forma geral, o presente trabalho busca fomentar e motivar o uso da modelagem e simulação computacional como instrumento para respaldar prescrições de melhoramentos nos sistemas produtivos.

1.2 ESCOPO DO TRABALHO

O presente trabalho tem como foco aplicar modelagem e simulação computacional para avaliar prescrições de mudanças em sistemas produtivos propostas em um estudo prévio, o qual se baseou unicamente em análises qualitativas da instalação. Diferentemente de abordagens voltadas para a identificação de problemas ou proposição de novas soluções, este trabalho buscou avaliar quantitativamente os impactos e a viabilidade de mudanças já recomendadas, proporcionando uma análise mais fundamentada sobre sua aplicabilidade prática.

Embora tenha sido realizada uma revisão bibliográfica com diversos trabalhos que atendiam aos critérios necessários para a integração com a modelagem computacional, foi selecionado apenas um deles como referência central desta pesquisa. Trata-se do estudo desenvolvido por Gerlach et al. (2017), onde foram feitas propostas de reformulação do processo produtivo de uma indústria metalúrgica de pequeno porte através da abordagem da

produção enxuta e do MFV. É importante levantar algumas informações iniciais que são necessárias para um primeiro entendimento e delimitação do escopo do trabalho as macroatividades sequenciais do processo estão representadas pelas etapas de Corte, Estampagem, Conformação, Solda, Tratamento de Superfície, Pintura, Secagem e Embalagem. Além disso, para uma melhor compreensão do sistema produtivo, os autores delimitaram para a análise apenas a família de produtos de maior volume de produção, uma vez que seus itens percorrem a maioria dos setores da fábrica. O Capítulo 3 apresenta uma descrição detalhada do trabalho de referência, do processo produtivo e das melhorias propostas para a metalúrgica.

Como o trabalho de referência não contempla, originalmente, modelos de simulação, algumas informações indispensáveis à modelagem precisaram ser estimadas com base em pressupostos coerentes com o processo produtivo.

Para representar a jornada de trabalho da fábrica, foram definidos turnos de 5 horas, de segunda a sexta-feira. Essa decisão justifica-se pelo fato de a simulação abranger apenas a principal família de produtos da metalúrgica, pressupondo que a fábrica não destina 100% do seu tempo produtivo a essa linha. Assim, não se consideraram turnos completos de 8 horas.

Adicionalmente, foram adotadas as seguintes premissas:

- Considerou-se uma máquina por etapa do processo, dado que não há informações específicas no trabalho de referência;

- Pressupôs-se a alocação de um operador por máquina, disponível em tempo integral, com exceção do setor de Solda no modelo computacional do estado atual (explicado a seguir);

- Para representar uma simulação estocástica, os Tempos de Ciclo (TC) e de Setup (TS) foram modelados com base em uma distribuição normal. Segundo Chwif e Medina (2006), quando não há dados suficientes para definir com precisão a variabilidade, é possível recorrer a distribuições estatísticas específicas, de acordo com as características do processo analisado. No nosso caso, a distribuição normal se torna adequada já que os tempos apresentam variação simétrica em torno de uma média, resultam da soma de diversas pequenas atividades e se aplicam a processos manuais e relativamente padronizados — características observadas neste estudo. Assim, a média adotada corresponde ao tempo de ciclo nominal de cada operação, enquanto o desvio padrão foi estimado em 5% desse valor, com o objetivo de representar variações realistas nos resultados da simulação.

- Em relação aos tempos de setup, apesar de o artigo mencionar sua existência, não há dados sobre sua frequência diária. Assim, estimou-se que o setor de Corte realiza dois setups por dia (troca de lâmina e lubrificação), enquanto os setores de Estampagem, Conformação,

Pintura e Secagem realizam um setup diário (para limpeza, ajustes e outras atividades). Já os setores de Tratamento de Superfície e Embalagem não requerem setups.

Como o artigo não especifica a demanda, a definição das quantidades de matéria-prima e de produto acabado entregues baseou-se na capacidade efetiva diária da operação no modelo. Assim, estimaram-se volumes de entrega e recebimento compatíveis com essa capacidade. Esta estimativa é essencial para garantir o escoamento da produção dentro do sistema simulado. Caso contrário, a produção se acumularia e os valores de saída correspondentes aos estoques não representariam, de fato, a realidade.

1.2.1 Informações que delimitam o escopo do modelo computacional do estado atual

Para o estudo em questão, foram desenvolvidos dois modelos computacionais: um representando o estado atual do sistema produtivo e outro contemplando as melhorias propostas. No entanto, algumas considerações são necessárias para delimitar adequadamente o escopo do modelo do estado atual.

Para este modelo, algumas adaptações específicas foram necessárias. Antes da operação de Solda, ocorre uma formação de estoque intermediário que representa um dos pontos críticos do processo. Como o tempo de ciclo da Conformação (60 segundos) é o dobro do tempo de ciclo da Solda (30 segundos), para modelar a formação de estoque entre essas etapas, a Solda precisaria operar com disponibilidade perto de 50%. Assim, como o artigo não especifica exatamente a disponibilidade parcial do operador, estimou-se que o mesmo esteja disponível apenas 40% do tempo total de cada turno de trabalho. Nesse período, o operador atuaria em intervalos distribuídos ao longo do turno, de modo que o somatório corresponda a essa disponibilidade estimada. Nos 60% restantes, o operador estaria dedicado a outra família de produtos não contemplada no escopo deste estudo.

Para evitar o crescimento descontrolado do estoque intermediário entre Conformação e Solda, foi definida uma capacidade máxima de 750 unidades para esse ponto de acúmulo. Quando esse limite é atingido, o processo anterior (Conformação) é bloqueado.

1.3 ELABORAÇÃO DOS OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é aplicar a modelagem e simulação computacional para oferecer respaldo numérico a melhorias sugeridas em algum outro estudo acadêmico, avaliando

quantitativamente a viabilidade e os impactos das propostas formuladas pelo estudo acadêmico de referência. Esse enfoque busca fortalecer a fundamentação de decisões estratégicas, destacando a relevância da simulação como ferramenta para análise objetiva de mudanças previamente recomendadas.

Os objetivos específicos são:

1. elaborar um modelo conceitual do processo produtivo existente, ou seja, antes das alterações de melhorias propostas, mapeando etapas e recursos;
2. desenvolver um modelo computacional que permita simulações do sistema real existente (situação antes);
3. elaborar um modelo conceitual do processo produtivo proposto, ou seja, com as recomendações finais resultantes;
4. desenvolver um modelo computacional que permita simulações do sistema real proposto (situação depois);
5. analisar os dados gerados pelo modelo computacional simulado a fim de comparar com os resultados obtidos no trabalho acadêmico em questão;
6. conclusão do trabalho, destacando os pontos concordantes e discrepantes entre as propostas de melhorias sugeridas pelos autores do trabalho de referência e os resultados obtidos pelas simulações realizadas.

1.4 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA

O presente trabalho se caracteriza como uma pesquisa experimental, uma vez que visa a comparação e validação de um modelo prescritivo, desenvolvido com base em uma metodologia teórica, por meio de simulação a partir de um modelo computacional. A pesquisa experimental, como metodologia científica, busca observar, testar e validar hipóteses por meio de experimentos controlados ou simulações computacionais, com o objetivo de obter resultados que possam ser reproduzidos e validados, além de gerar conhecimentos que possam ser aplicados para a melhoria de processos e sistemas.

Primeiramente, foi realizada uma revisão bibliográfica abrangente sobre simulação computacional e suas aplicações na área de produção. Isso permitiu uma compreensão aprofundada de como se dá a construção do modelo computacional a partir do objeto de estudo escolhido.

Após a revisão teórica, foram avaliados alguns softwares de simulação. Esta etapa envolveu a pesquisa sobre as funcionalidades, limitações, e facilidades de aprendizado de cada programa, considerando aspectos como acessibilidade, curva de aprendizado e adequação à estética de um processo produtivo.

1.4.1 Definição do trabalho de referência

Na sequência, realizou-se a definição do trabalho de referência que foi utilizado como objeto de estudo. Para isso, foram estabelecidos quatro critérios que o estudo selecionado deveria atender a fim de ser considerado apto à integração com a simulação computacional:

- Ter como foco um processo produtivo de uma empresa, preferencialmente, no setor manufatureiro;
- Apresentar propostas de melhoria específicas e bem definidas;
- Disponibilizar dados suficientes ou passíveis de estimativa para a construção dos modelos conceitual e computacional — incluindo informações sobre etapas do processo, recursos envolvidos, tempos e quantidades.
- O estudo não poderia ter utilizado simulação computacional previamente nem ter implementado as melhorias de forma prática, mantendo-se no nível teórico, de modo que a simulação pudesse assumir o papel de testar a aplicabilidade das propostas apresentadas.

Com esses critérios em mente, foram identificados diversos trabalhos com potencial de adequação. Nesta etapa foi utilizada Inteligência Artificial para a checagem dos critérios, considerando-se que este é um tipo de tarefa que a máquina desempenha muito bem, devido ao seu rápido processamento e capacidade de leitura automatizada.

Os trabalhos que atendiam aos quatro critérios passaram por uma avaliação mais aprofundada, com leitura detalhada de seu conteúdo. Essa leitura teve como objetivo assegurar que eventuais lacunas de dados ou inconsistências não inviabilizassem a construção dos modelos, evitando surpresas que pudessem comprometer o desenvolvimento da pesquisa.

Como resultado dessa etapa, restaram cinco trabalhos em setores industriais distintos, todos adequados aos critérios. Então, para apoiar a escolha final, foi elaborada uma tabela comparativa contendo, além dos quatro critérios inicialmente definidos, informações adicionais

relevantes para mitigar os riscos ao longo da execução do projeto. A tabela a seguir apresenta os principais aspectos considerados na seleção entre os cinco trabalhos avaliados:

<i>Critério / Elemento</i>	<i>Nogueira e Oliveira (2024) - Cerâmica</i>	<i>Pessoa (2014) - Confecção</i>	<i>Alessio et al. (2024) - Alimentos</i>	<i>Gerlach et al. (2017) - Metalúrgica</i>	<i>Carminati (2021) - Cânulas Médicas</i>
<i>Setor / Tipo de Empresa</i>	Cerâmica vermelha (tijolos)	Confecção de roupas masculinas	Indústria alimentícia (massas/salgados)	Metalúrgica (mobiliário e estruturas)	Produtos médicos (cânulas)
<i>Tipo de Processo Produtivo</i>	Contínuo (extrusão, secagem, queima)	Discreto (corte, costura, lavagem, acabamento)	Discreto (mistura, corte, embalagem, congelamento)	Discreto (corte, solda, pintura, embalagem)	Discreto (solda, trefilagem, corte, embalagem)
<i>Propostas de Melhoria</i>	Kanban, automação da paletização, TPM, embalagem automática	Redução de estoques, fluxo contínuo, kanban, reorganização dos setores	Automatização parcial, controle de estoque, diversificação da produção	Redesenho de layout, supermercado s de peças, corredores otimizados	Produção puxada, supermercados , layout celular, fluxo contínuo

Tabela 1 – Análise comparativa dos cinco trabalhos selecionados.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

<i>Critério / Elemento</i>	<i>Nogueira e Oliveira (2024) - Cerâmica</i>	<i>Pessoa (2014) - Confeção</i>	<i>Alessio et al. (2024) - Alimentos</i>	<i>Gerlach et al. (2017) - Metalúrgica</i>	<i>Carminati (2021) - Cânulas Médicas</i>
<i>Simulação já usada no trabalho?</i>	Não	Não	Não	Não	Não
<i>Mudanças foram aplicadas?</i>	Não	Não	Não	Não	Não
<i>Dados disponíveis para simulação?</i>	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
<i>Indicadores disponíveis</i>	<i>Lead time, uptime, perdas por paradas, produtividade por máquina</i>	<i>Lead time, agregação de valor, estoques intermediários</i>	<i>Lead time, produção por turno, consumo de matéria-prima</i>	<i>Lead time, distância percorrida, desperdícios</i>	<i>Lead time, TAV, tempo de troca, produtividade por célula</i>
<i>Perdas mapeadas (Lean)?</i>	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
<i>Complexidade do processo</i>	Média a alta	Média	Média	Média	Alta
<i>Adequação para Modelagem e Simulação Computacional</i>	Excelente	Boa	Boa	Excelente	Excelente
<i>Simulação sugerida pelos autores?</i>	Implícita	Implícita	Sim	Implícita	Implícita
<i>Risco de retrabalho no TCC</i>	Baixo	Baixo	Muito baixo	Baixo	Baixo
<i>Ponto Forte</i>	Diagnóstico profundo com dados ricos e MFV bem estruturado	Clareza nos gargalos e MFV completo	Alinhamento direto com simulação + proposta moderna da Indústria 4.0	Layout antes e depois bem descritos, dados quantitativos	Alto detalhamento técnico, ideal para simulação com foco em qualidade
<i>Ponto de Atenção</i>	Necessidade de entender processos térmicos	Parte do processo é terceirizada	Processo simples pode limitar complexidade do modelo	Pode exigir suposições logísticas	Setor regulado exige cuidado na simulação

Tabela 2 – Análise comparativa dos cinco trabalhos selecionados (continuação).
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Com base nessa análise comparativa, foi selecionado o trabalho desenvolvido por Gerlach et al. (2017), que se destacou por apresentar uma proposta de reformulação do processo produtivo de uma indústria metalúrgica de pequeno porte através da abordagem da produção enxuta e do uso de ferramentas como o mapeamento do fluxo de valor (MFV). Este estudo não apenas atende aos critérios definidos, como também oferece um conjunto de melhorias teoricamente fundamentadas, mas ainda não validadas por métodos quantitativos — justificando, assim, sua escolha como objeto desta pesquisa.

Já para as etapas de modelagem, a metodologia adotada neste trabalho foi inicialmente baseada nas etapas para a construção de modelos computacionais propostas por Shannon (1998) e sistematizadas por Law (2003). Complementarmente, este estudo também se inspira na metodologia de integração da Simulação a Eventos Discretos (SED) ao MFV, proposta por Queiroz e Miranda (2013), a qual será detalhada na Seção 1.4.3.

1.4.2 Etapas clássicas da simulação

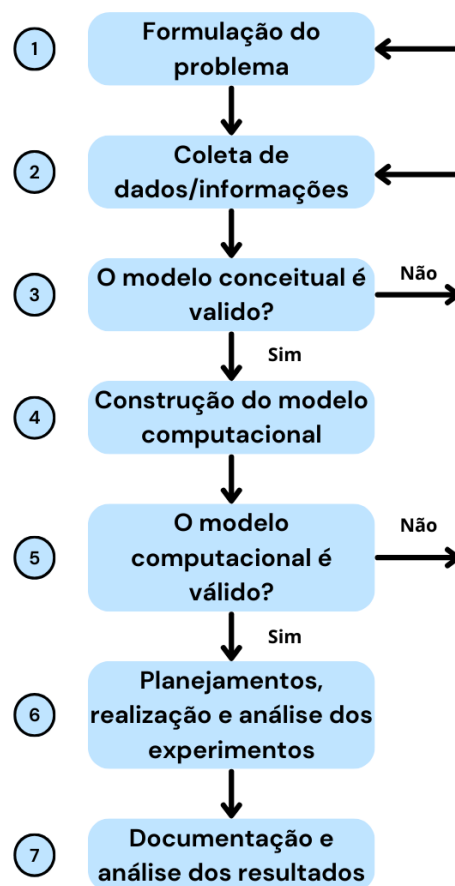


Figura 1 - Metodologia para um estudo de simulação

Fonte: Adaptado de LAW (2003)

O primeiro passo do processo da simulação computacional foi definir claramente o problema que se deseja resolver. Essa formulação é crucial, pois delimita o foco da simulação e define os objetivos específicos que se deseja alcançar, como a otimização da produção, a redução de gargalos ou a minimização de ociosidades.

Na fase de Coleta de Dados/Informações, os dados utilizados neste trabalho foram provenientes do estudo acadêmico selecionado para análise. Como já mencionado, é importante que o trabalho escolhido apresente um nível suficiente de detalhamento para sua modelagem e simulação computacional. Além disso, as propostas de melhoria devem ser suficientemente claras e objetivas, permitindo sua correta implementação no modelo e a análise. Essa etapa é fundamental para garantir a fidelidade do processo de validação e a geração de resultados consistentes.

Com os dados em mãos, constrói-se um modelo conceitual, que é uma representação simplificada do sistema real. Esse modelo serve como um guia para as fases posteriores e pode ser representado por diagramas de blocos ou fluxogramas que descrevem o processo produtivo e suas interações.

Após a construção do modelo conceitual, realiza-se uma validação preliminar para garantir que ele representa adequadamente o sistema real. Se for considerado inválido, ajusta-se o modelo e retorna-se a esta fase até que ele seja aprovado.

Com o modelo conceitual validado, inicia-se a construção do modelo computacional no software de simulação escolhido. Esta fase envolve a tradução dos elementos do modelo conceitual em parâmetros e códigos computacionais que simulem o processo produtivo.

O modelo computacional deve passar por uma verificação rigorosa para garantir que suas saídas sejam consistentes com a realidade. Se for detectado algum erro ou discrepância, ajusta-se o modelo até que ele passe a representar o sistema com precisão.

Após a validação do modelo computacional, será incorporada a etapa de experimentação conforme descrita por Law (2003). Durante a experimentação, o sistema é ajustado com as alterações sugeridas e será definido o tempo necessário para se obter resultados aceitáveis na simulação e o número de replicações necessárias para alcançar uma amostragem estatisticamente significativa. Para cada execução da simulação e posterior análise, serão tomadas decisões sobre a duração das simulações e o número de replicações a serem realizadas. Essa abordagem permitirá avaliar, de maneira robusta e quantitativa, os impactos das melhorias propostas no processo produtivo, garantindo que os resultados obtidos sejam confiáveis e representativos do comportamento real do sistema ajustado.

Nesta etapa, realiza-se uma análise detalhada dos resultados obtidos com as simulações. São documentadas as observações e gerados relatórios que descrevem as simulações, suas implicações e os possíveis impactos das melhorias propostas, comparando-os com os resultados obtidos no trabalho acadêmico de referência.

Por fim, com base nas conclusões obtidas a partir das simulações, serão indicados os pontos concordantes e discrepantes entre as propostas de melhorias sugeridas pelos autores do trabalho utilizado como referência e os resultados simulados.

1.4.3 Integração com a metodologia MFV–Simulação

Adicionalmente, este trabalho inspira-se na metodologia proposta por Queiroz e Miranda (2013), que integra a SED ao MFV como ferramenta de apoio à implantação da produção enxuta. A adoção dessa metodologia mostra-se particularmente valiosa neste estudo, uma vez que o trabalho de referência utilizado como base para a modelagem adota o MFV como ferramenta central de análise e proposição de melhorias.

Essa metodologia é estruturada em três fases: concepção, implementação e análise dos resultados, sendo uma abordagem complementar à de Law (2003).

Na fase de concepção, define-se o objetivo do estudo, seleciona-se a família de produtos e constrói-se o modelo conceitual com base no mapeamento do estado atual e futuro. Essa etapa também envolve a modelagem dos dados de entrada e a validação do modelo conceitual.

Na fase de implementação, desenvolve-se o modelo computacional no software de simulação escolhido, com a verificação e validação do modelo conforme sua aderência à realidade.

A fase de análise compreende a execução de experimentos e simulações dos diferentes cenários futuros, com o objetivo de responder a perguntas do tipo “o que acontece se...”, apoiando decisões sobre quais melhorias são mais vantajosas.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em quatro capítulos. O primeiro capítulo introduz o contexto da pesquisa, justificando sua importância. O escopo do trabalho é delimitado, explicando os limites e o foco do estudo. Em seguida, os objetivos são apresentados, definindo

o que se pretende alcançar. A metodologia também foi descrita, abordando como foi feita a revisão bibliográfica e o passo a passo para o desenvolvimento do modelo computacional até sua utilização na obtenção dos resultados.

O capítulo dois apresenta uma revisão bibliográfica, apresentando e analisando referências teóricas relacionadas ao MFV, modelagem conceitual, computacional, simulação de eventos discretos. Aqui, são discutidos alguns dos estudos existentes sobre o tema, além dos materiais utilizados para apoiar o desenvolvimento do presente trabalho.

O terceiro capítulo descreve o desenvolvimento do trabalho, detalhando a análise qualitativa das propostas de melhorias prescritas no trabalho de referência.

Por último, o quarto capítulo apresenta os resultados obtidos em relação ao objetivo central do estudo. Nele, são discutidas as análises e conclusões a partir dos resultados, avaliando se os objetivos específicos foram alcançados e sugerindo possíveis direções para pesquisas futuras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda os fundamentos teóricos necessários para a aplicação da simulação computacional em sistemas produtivos. Inicialmente, são discutidos os conceitos e classificações da simulação. Em seguida, detalham-se a construção, verificação e validação de modelos computacionais, além da importância do modelo conceitual no processo de simulação. Na sequência, apresentam-se os principais softwares utilizados, evidenciando suas funcionalidades e aplicabilidades. Por fim, é dado destaque para a aplicação da simulação em ambientes de manufatura. Essa revisão também inclui exemplos de estudos que demonstram a eficácia da simulação em manufaturas.

2.1 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A simulação computacional é uma ferramenta eficiente atual, que possibilita a análise de sistemas complexos. Também possibilita através da animação em ambiente virtual, que seja visualizado qual será o comportamento, por exemplo, de uma linha de fabricação, sem que as mudanças no ambiente real sejam feitas, possibilitando-se assim economia de recursos pela não interrupção das linhas, bem como maior liberdade na escolha de alternativas (PEREIRA, 2000).

De acordo com Chwif e Medina (2010), um modelo é, assim, uma abstração da realidade, que se aproxima do verdadeiro comportamento do sistema, mas sempre mais simples do que o sistema real. Por outro lado, se o modelo construído apresenta uma complexidade maior do que a do próprio sistema, não temos um modelo, mas, sim, um problema.

Pereira (2000) ressalta que a simulação também se mostra como um instrumento importante para responder às perguntas tipo *what if*, ou seja, o que aconteceria se no lugar de uma máquina gargalo se dispusesse duas, o que aconteceria se o número de operadores fosse alterado, etc. A resposta a essas perguntas, mesmo antes de se ter o sistema real funcionando, e com grande confiabilidade é outra grande vantagem da simulação computacional.

O autor reforça que mesmo para os sistemas já em funcionamento, há a possibilidade de se testar aumentos de produção utilizando-se como fonte de dados para a simulação, os dados coletados das linhas existentes, podendo-se inferir a necessidade de aquisição de mais equipamentos ou a contratação de mais operadores, tendo em vista melhorar a produtividade ou um aumento de demanda.

Para Strack (1984), a simulação não é uma teoria, mas uma metodologia de resolução de problemas. Nesse sentido, trata-se de um método de análise que não gera soluções por si só, como os modelos analíticos, mas servem como técnica ou ferramenta para “atuar da mesma maneira” que o sistema estudado, de onde são obtidos dados estatísticos de desempenho para análise.

2.1.1 Simulação estática e dinâmica

Para Law e Kelton (2000), simulação estática é a representação de um sistema em um dado momento. A simulação dinâmica é a representação de um sistema no decorrer do tempo. Esse tipo de simulação é apropriado para a análise de sistemas de manufatura e serviços que sofrem influência do tempo.

2.1.2 Simulação determinística e estocástica

Os modelos de simulação são determinísticos quando as variáveis de entrada assumem valores exatos, assim, os resultados (saídas) desse tipo de simulação serão sempre iguais independentemente do número de replicações. Os modelos estocásticos permitem que as variáveis de entrada assumam diversos valores dentro de uma distribuição de probabilidades a

ser definida pelo modelador. Os resultados gerados pelos modelos estocásticos são diferentes a cada replicação, em função da natureza aleatória das variáveis de entrada no modelo.

2.2 MODELO CONCEITUAL: DEFINIÇÃO E TIPOS

O modelo conceitual é uma abstração do sistema real, projetado para representar suas principais características e permitir a compreensão, análise e simulação do processo em estudo. Esses modelos conceituais são ferramentas iniciais que ajudam a definir as variáveis, as interações entre os elementos do sistema e as hipóteses do modelo, sendo importantes para a posterior formulação de modelos matemáticos ou computacionais. Diversos tipos de modelos conceituais podem ser aplicados, dependendo da natureza do sistema e dos objetivos do estudo, como, por exemplo: fluxogramas, diagramas de blocos, diagrama de causa e efeito, Mapeamento de Fluxo de Valor, diagrama do ciclo de atividade (ACD - *Activity Cycle Diagram*), IDEF-SIM (*Integrated Definition Methods – Simulation*), etc.

Os fluxogramas de processo, também conhecidos como diagramas de fluxo, são representações gráficas que utilizam símbolos padronizados para mapear o fluxo de atividades, materiais ou informações dentro de um processo. Esses diagramas são muito utilizados para modelos conceituais de ambientes fabris, onde se busca representar os processos produtivos estudados. Além disso, são particularmente úteis para identificar gargalos, redundâncias e oportunidades de melhoria. Em Torga (2007), um diagrama de fluxo foi aplicado para representar os fluxos de produção e logística dos itens de acordo com o sistema puxado e os níveis de criticidade indicados pelos cartões kanban. Também em LEAL et al. (2024), diagramas de fluxos foram utilizados para detalhar o fluxo produtivo desde a chegada do material até o empacotamento do produto final, mapeando os subprocessos e evidenciando as interações entre máquinas, operadores e estoques.

Já os diagramas de blocos representam sistemas ou processos como um conjunto de componentes ou etapas interligadas por linhas que indicam o fluxo de informação, energia ou materiais. São amplamente utilizados nas engenharias para modelar sistemas complexos de forma simplificada. Um caso prático é descrito por Santos Junior (2016), onde o Diagrama de Blocos foi utilizado para modelar e simular o sistema fotovoltaico isolado, abrangendo as etapas

de geração, conversão e controle. No ambiente Simulink/Matlab®, foram criados blocos representando o painel fotovoltaico, o conversor *push-pull* e o inversor trifásico, permitindo a análise do comportamento dinâmico do sistema e a verificação da eficácia dos controladores propostos.

O diagrama de causa e efeito, também conhecido como diagrama de Ishikawa ou espinha de peixe, é uma ferramenta gráfica utilizada para identificar, organizar e categorizar as causas potenciais de um problema ou efeito específico. Este diagrama facilita a análise de problemas complexos, permitindo que equipes identifiquem as causas raiz e implementem ações corretivas eficazes. A estrutura do diagrama se assemelha a uma espinha de peixe, onde a "cabeça" representa o efeito ou o problema a ser resolvido, enquanto as "espinhas principais" simbolizam as categorias das causas. As subespinhas, por sua vez, representam causas secundárias e terciárias.

Um modelo conceitual largamente utilizado na manufatura enxuta, é o MFV. Ele é uma técnica visual utilizada para analisar e melhorar o fluxo de materiais e informações necessários para produzir um produto ou serviço. Focado na eliminação de desperdícios, essa ferramenta é central no Lean Manufacturing. Uma aplicação do MFV pode ser vista em Sagayama et al. (2018), onde o modelo foi utilizado para visualizar o fluxo de pacientes no ambulatório de marca-passo, desde a chegada até o término do atendimento. O MFV permitiu identificar atividades que não agregam valor e propor melhorias no fluxo, como a eliminação de deslocamentos desnecessários de médicos, o que resultou na redução de ociosidade e no aumento da capacidade de atendimentos.

Outro modelo conceitual muito utilizado no estudo de simulação computacional é o ACD, que é uma ferramenta gráfica utilizada para representar o ciclo de atividades em sistemas discretos, destacando as relações sequenciais, as interdependências e a lógica de fluxo entre as atividades. A lógica principal do ACD baseia-se no conceito de "ciclo de vida" dos recursos, que passam de estados de "espera" para "atividade" e, posteriormente, retornam a "espera" após a conclusão de cada atividade. Essa abordagem torna o ACD uma ferramenta especialmente útil para sistemas de produção, logística, atendimento ao cliente, serviços de saúde e outros ambientes de processos interativos e complexos.

O IDEF-SIM é uma extensão da família de métodos IDEF, projetada especificamente para modelagem e simulação de sistemas complexos. Ele combina elementos gráficos e textuais para descrever processos com ênfase em detalhes operacionais e interações.

A figura 1 apresenta os principais elementos e a simbologia adotada segundo a metodologia IDEF-SIM, servindo como base para a construção do modelo do processo produtivo.

Elementos	Simbologia	Técnica de origem
Entidade		IDEF3
Funções		IDEFØ
Fluxo da entidade		IDEFØ e IDEF3
Recursos		IDEFØ
Controles		IDEFØ
Regras para fluxos paralelos e/ou alternativos	 &	Regra 'E'
	 X	Regra 'OU'
	 O	Regra 'E/OU'
Movimentação		Fluxograma
Informação explicativa		IDEFØ e IDEF3
Fluxo de entrada no sistema modelado		-
Ponto final do sistema		-
Conexão com outra figura		-

Figura 2 - Simbologia utilizada na técnica IDEF-SIM

Fonte: Adaptado de Leal et. al. (2009)

Pesquisas recentes, como a de Rodrigues et al. (2020), aplica o IDEF-SIM para mapear e documentar o fluxo de processos da empresa têxtil, permitindo a criação de um modelo conceitual validado pelo coordenador de produção. Esse modelo serviu de base para a simulação computacional no ProModel®, viabilizando a análise e proposição de melhorias no layout e na produtividade.

Além desses, outras ferramentas como mapas mentais, diagramas de fluxo de dados (DFD) e mapas de processos também são amplamente utilizados. Mapas mentais organizam informações hierarquicamente, sendo comuns em *brainstorming* e planejamento estratégico. Diagramas de fluxo de dados são focados na representação do fluxo de informações em sistemas de software, enquanto mapas de processos documentam e analisam fluxos operacionais em

empresas de serviços e manufatura. Estudos como o de Pereira e Rocha (2020) exploraram mapas de processos para otimizar operações em um hospital, destacando melhorias no fluxo de pacientes.

Para o presente trabalho, foi adotado o IDEF-SIM como opção de modelo conceitual.

2.3 MODELO COMPUTACIONAL

Este capítulo apresenta o processo de construção, verificação e validação do modelo computacional. São descritas as etapas seguidas para desenvolver o modelo, os princípios teóricos adotados e as técnicas empregadas para assegurar sua precisão e fidedignidade em relação ao sistema real.

2.3.1 Construção do modelo computacional

Como mencionado na seção “1.4 Definição da metodologia”, este trabalho irá basear a construção do modelo computacional no passo a passo recomendado por Shannon (1998) e resumido por Law (2003).

Os princípios a serem considerados na modelagem de sistemas, segundo Silva (2005), envolvem a busca por simplicidade e parcimônia, ajustando a complexidade conforme necessário, sem exageros que comprometam o entendimento. Além disso, a coleta de dados deve ser orientada pelo modelo, evitando desvios desnecessários. O modelador deve adotar uma postura flexível e organizada, lidando com a natureza desordenada do processo de modelagem de maneira estratégica seguindo os seguintes princípios (SILVA, 2005):

- O modelo precisa ser claro, ainda que derive de ideias complexas. Não é necessário que os modelos sejam tão complexos quanto a realidade.
- É importante ser econômico, iniciando com simplicidade e acrescentando complexidade apenas quando for indispensável.
- Evitar modelos muito grandes devido à dificuldade de compreensão. A solução é dividir esses modelos extensos.
- A escolha dos dados a serem coletados deve ser guiada pelo modelo. O modelador não deve se "encantar pelos dados".

- O comportamento do modelador na construção do modelo deve ser como se estivesse resolvendo problemas, já que a modelagem é, de certo modo, um processo desordenado.

2.3.2 Validação do modelo computacional

De acordo com Harrel et al. (2000), a forma mais comum de validação do modelo computacional é comparar os resultados do modelo com os do sistema real. O autor destaca que o objetivo da validação é diminuir os riscos associados às decisões tomadas com base no modelo, porém deve-se buscar um equilíbrio entre custo, esforço e risco envolvidos.

Já Sargent (2004) afirma que há diversas técnicas para validar um modelo, que vão desde uma simples visualização até métodos estatísticos avançados, sendo comum combinar mais de uma técnica. As técnicas de validação mais utilizadas são:

1. Verificação da animação do modelo para garantir que o aspecto visual e o funcionamento estão de acordo com o sistema real;
2. Comparação com outros modelos já validados, simulando entradas cujas saídas esperadas são conhecidas para avaliar os resultados;
3. Testes de degeneração e condições extremas, observando se o modelo reflete as mesmas características do sistema real, como o acúmulo de peças em uma fila durante o funcionamento de uma máquina;
4. Validação por aparência, onde especialistas no sistema são consultados para opinar sobre a aparência final do modelo;
5. Testes utilizando dados históricos do sistema real, comparando-os com os resultados do modelo para verificar sua precisão;
6. Análise da sensibilidade de resposta e alterações nos dados de entrada e posterior comparação com o sistema real;
7. Realização de testes de Turing, nos quais gestores do sistema avaliam a consistência entre o modelo computacional e o sistema real.

2.4 SOFTWARES DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Atualmente, o mercado conta com uma grande diversidade de pacotes de software para simulação, capazes de atender a diferentes demandas, desde a modelagem de processos simples,

como para obtenção de soluções para um tráfego em rotatória (MOITA; ALMEIDA, 2012) e na simulação de filas em um supermercado (SAMPAIO; OLIVEIRA, 2013), até simulações mais complexas, como o planejamento de uma nova linha de manufatura de uma empresa do setor de autopeças (BRIGHENTI, 2006). O desafio está em escolher o software que melhor atenda às necessidades específicas da empresa, levando em conta fatores como orçamento disponível, capacitação técnica da equipe e o tempo necessário para o desenvolvimento do projeto. Dentre as diversas opções de softwares, pode-se citar o Arena¹, FlexSim², ProModel³, Simul8⁴ e o AnyLogic⁵.

Um dos mais utilizados atualmente é o Arena, amplamente reconhecido por sua versatilidade em simulações de eventos discretos e sua aplicação em processos industriais, logísticos e serviços. Sua flexibilidade permite modelar desde linhas de produção até redes de transporte, sendo frequentemente citado em estudos acadêmicos pela facilidade de integração com dados estatísticos e capacidade de gerar resultados detalhados (BANKS et al., 2010).

O FlexSim, se destaca por oferecer uma interface gráfica tridimensional intuitiva, permitindo que os usuários visualizem e analisem o fluxo produtivo de forma mais interativa. Sua capacidade de integração com layouts 3D torna-o especialmente valioso para estudos que envolvem otimização de espaço e simulação de diferentes configurações de layout fabril (LAW, 2015).

O ProModel é frequentemente escolhido em ambientes industriais para a otimização de processos produtivos devido à sua robustez na análise de cenários e integração com ferramentas de planejamento estratégico, como sistemas ERP (*Enterprise Resource Planning*).

O Simul8, por sua vez, tem ganhado espaço pelo seu foco em facilidade de uso e rápida construção de modelos, sendo amplamente utilizado em simulações operacionais de curto prazo. Adicionalmente, o AnyLogic surge como uma solução híbrida, combinando simulações baseadas em eventos discretos, agentes e dinâmicas de sistemas, tornando-se uma escolha popular em estudos de logística e *supply chain*.

A literatura acadêmica enfatiza que a escolha do software ideal deve considerar os objetivos do estudo, o nível de complexidade do sistema modelado e as capacidades analíticas

¹ <https://paragon.com.br/arena/>

² <https://www.flexsim.com/>

³ <https://www.belge.com.br/promodel-intro.php>

⁴ <https://www.simul8.com/>

⁵ <https://www.anylogic.com/>

necessárias. Conforme Law e Kelton (2015), cada ferramenta possui vantagens específicas, e a decisão deve equilibrar fatores como custo, curva de aprendizado, capacidade gráfica e compatibilidade com os dados do sistema estudado. Esses softwares continuam a evoluir, acompanhando as demandas da Indústria 4.0, como a integração com *big data* e inteligência artificial, reforçando sua importância como suporte à tomada de decisão em sistemas produtivos.

Para o presente trabalho foi utilizado o software FlexSim para a modelagem computacional.

2.5 SIMULAÇÃO EM AMBIENTES DE MANUFATURA

Para Duarte (2003), a simulação computacional pode ser uma ferramenta vantajosa para se aplicar no âmbito de uma manufatura para minimizar o tempo de implantação de projetos, evitando rupturas na cadeia produtiva, identificando gargalos e testando as soluções para eliminá-los, simulando cenários de quebra de máquinas ou aumento de produção e testando os planos de contingência, testando alterações de processo, testando rotas alternativas de movimentação de materiais, novos métodos de trabalho, novas configurações, sem necessitar de investimentos ou paradas no sistema;

De acordo com Banks (2005), a simulação é uma das ferramentas mais amplamente utilizadas em sistemas de manufatura do que em qualquer outro campo. Alguns motivos são:

- O aumento da produtividade e qualidade na indústria é um resultado direto da automação. Como os sistemas de automação são cada vez mais complexos, estes só podem ser analisados pela simulação;
- Os custos de equipamentos e instalações são relativamente altos;
- Os custos dos computadores estão cada vez mais baixos e os processadores mais rápidos;
- Melhorias nos softwares de simulação reduziram o tempo de desenvolvimento de modelos.
- A disponibilidade de animação resultou em maior compreensão e utilização dos gestores da manufatura.

Um exemplo relevante, já citado neste trabalho, é o estudo de Torga (2007), que utilizou a simulação e otimização em um sistema puxado de produção de uma empresa do setor automobilístico localizada no sul de Minas Gerais.

Neste estudo, o autor buscou otimizar as quantidades de kanbans verdes de uma linha de produção composta por sete peças, modelando o sistema para avaliar diferentes configurações de estoque e melhorar a eficiência operacional.

Os resultados indicaram uma redução de 20% nos estoques, demonstrando a eficiência da combinação entre simulação e otimização no contexto de sistemas produtivos. A adoção do modelo conceitual e a integração de ferramentas computacionais permitiram não apenas validar os cenários simulados, mas também destacar a utilidade científica da abordagem. Esse exemplo reforça o potencial da simulação como uma abordagem quantitativa para avaliar e implementar melhorias em sistemas industriais, especialmente em ambientes de manufatura com alta variabilidade e demandas críticas.

Outro caso significativo foi o estudo realizado por Leal et al. (2024), que analisou o processo de manufatura de fitas adesivas dupla face em uma célula produtiva no Polo Industrial de Manaus, com o objetivo de propor melhorias operacionais. Os resultados do estudo foram expressivos: houve uma redução de 42,1% no tempo total de produção e um aumento de 72,73% na produtividade, além de uma significativa diminuição do estoque em processo e otimização do layout. A reorganização fabril, combinada com a introdução de uma nova embaladora, triplicou a capacidade produtiva da célula estudada, evidenciando a eficácia da abordagem de simulação e modelagem na resolução de problemas produtivos e na melhoria de sistemas industriais.

Esses estudos reforçam o papel da simulação computacional como ferramenta indispensável para a análise de cenários e implementação de melhorias em ambientes de manufatura, contribuindo diretamente para o aumento da eficiência e competitividade das operações industriais.

3. ANÁLISE QUANTITATIVA DAS PROPOSTAS

3.1 DESCRIÇÃO DO TRABALHO SELECIONADO

Para a aplicação da modelagem e simulação computacional, foi selecionado o estudo desenvolvido por Gerlach et al. (2017), intitulado “Proposta de melhoria de layout como fator para a otimização do processo produtivo organizacional”. O objeto de pesquisa deste trabalho se trata de uma indústria metalúrgica de pequeno porte, fundada em 1995, especializada na produção de soluções para instalações comerciais. A sede da empresa está localizada no estado do Rio Grande do Sul, em um pavilhão com, aproximadamente, 2.000 m², e conta com cerca de 30 colaboradores, além de uma equipe de vendas responsável por atender empresas de diversos portes, incluindo supermercados, farmácias, lojas de eletrodomésticos, materiais de construção, calçados, livrarias, padarias e depósitos.

O estudo desenvolvido pelos autores tem como principal objetivo a proposição de melhorias no processo produtivo, com ênfase na reformulação do layout industrial e do processo produtivo da metalúrgica, orientada pelos princípios da produção enxuta e pelo uso de ferramentas como MFV.

Para uma melhor compreensão do sistema produtivo, os autores selecionaram a família de produtos de maior volume de produção, uma vez que seus itens percorrem a maioria dos setores da fábrica. Essa escolha, segundo os autores, possibilita uma análise mais abrangente do fluxo de materiais e informações ao longo do processo. A partir dessa família, o estudo apresenta os MFV do estado atual e do estado futuro, com o intuito de identificar os principais gargalos, desperdícios e oportunidades de melhorias dentro do contexto produtivo analisado.

3.1.1 Layout atual

O layout atual da fábrica foi identificado por Gerlach et al. (2017) como um dos principais gargalos da operação. Ao longo do tempo, a planta passou por diversas expansões não planejadas, resultando em má distribuição de máquinas e equipamentos, uma vez que não houve a realização de um estudo de layout voltado à otimização do fluxo de pessoas, matéria-prima e produtos. Essa configuração inadequada gerou uma série de problemas que impactam diretamente a eficiência do processo produtivo, identificados pelos autores como:

- Ausência de áreas de trabalho e armazenagem demarcadas, bem como de sinalização nos corredores de circulação de pessoas;
- Falta de delimitação dos centros de trabalho e das vias de circulação, o que torna o fluxo interno confuso e desorganizado;
- Inexistência de um padrão definido para o fluxo das peças no processo produtivo, dificultando o controle visual e a organização da fábrica;
- O trajeto percorrido pela família de produtos de maior volume totaliza 151 metros, indicando movimentações excessivas e desnecessárias dentro da planta.

Na Figura 2 apresenta-se o Mapofluxograma da família de produtos no layout atual, que ilustra de forma visual os deslocamentos e a complexidade do trajeto percorrido:

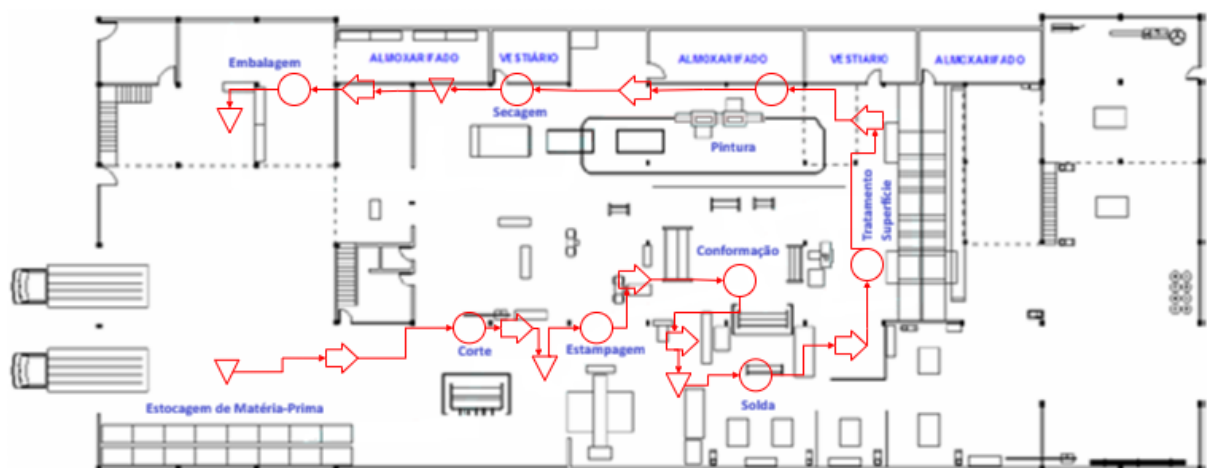


Figura 3 – Mapofluxograma da família de produtos no layout atual
Fonte: Adaptado de Gerlach et al. (2017).

3.1.2 Mapeamento do Fluxo de Valor do estado atual

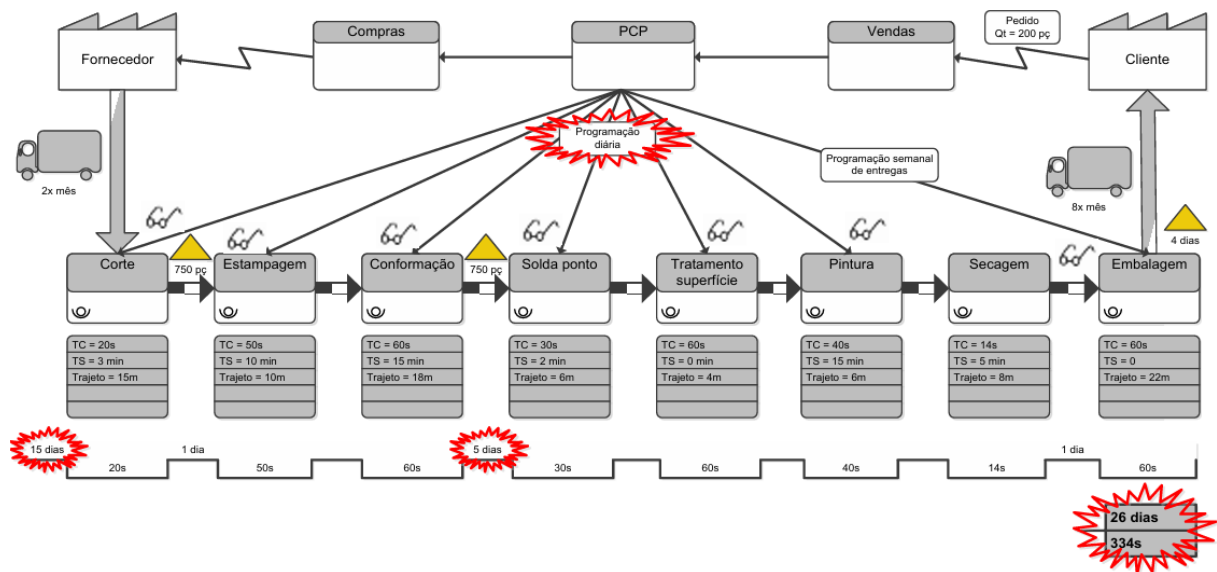


Figura 4 – Mapeamento do Fluxo de Valor do estado atual
Fonte: Gerlach et al. (2017).

A partir do MFV do estado atual, os autores identificaram os supostos principais gargalos e desperdícios presentes no processo produtivo. Os elementos destacados em vermelho são chamados de *Kaizen Burst*, termo utilizado no MFV para indicar oportunidades de melhoria (ROTHER; SHOOK, 1999). Esses marcadores funcionam como sinalizadores que orientam as propostas desenvolvidas pelos autores com base nos princípios da filosofia da produção enxuta. Abaixo, são apresentados os pontos mais relevantes observados durante a análise pelos autores:

- O PCP realiza uma programação diária da produção, em que cada setor processa de forma não relacionada ao processo subsequente. Como cada área trabalha em ritmos distintos e sem alinhamento com as etapas seguintes, formam-se estoques em processo entre as operações — ponto destacado no *Kaizen Burst* relacionado à programação da produção.
- O fornecimento de matéria-prima ocorre apenas duas vezes ao mês, o que exige a formação de estoques elevados para garantir a continuidade da produção nos demais dias. Esse aspecto é sinalizado por um *Kaizen Burst* voltado à redução do tempo médio de estoque de matéria-prima, atualmente em torno de 15 dias.
- Como não existe coordenação entre os setores, nas etapas onde existe desbalanceamento operacional causado pela diferença dos tempos de ciclo, como é o caso do Corte (20s)

e da Estampagem (50s), acumula-se bastante material em processo, resultando em um tempo médio de permanência de, aproximadamente, um dia;

- O setor de solda representa um ponto crítico do processo. Por não contar com um operador dedicado exclusivamente à atividade, o processamento ocorre de forma intermitente. Com isso, peças que chegam ao setor tendem a se acumular em grandes volumes, permanecendo, em média, cinco dias até serem processadas — situação destacada por um *Kaizen Burst* associado à necessidade de redução desse tempo de espera.

A combinação desses fatores, aliada a um layout pouco funcional, resulta em um *lead time* total de, aproximadamente, 26 dias para a produção da família de produtos analisada, o que é representado por um *Kaizen Burst* direcionado à diminuição do tempo total de atravessamento do processo. Esse cenário evidencia desperdícios relevantes, como espera, transporte desnecessário, estoques intermediários elevados e movimentações excessivas de materiais e pessoas.

3.1.3 Proposta de novo layout

Com base na identificação dos principais gargalos do layout existente, os autores desenvolveram uma proposta de reorganização da planta fabril, fundamentada nos princípios da produção enxuta. A seguir, são apresentadas as principais alterações implementadas no layout proposto e seus impactos sobre o processo produtivo.

A reconfiguração setorial posicionou os setores de corte, estampagem e conformação em proximidade, com corredores de pelo menos dois metros de largura para facilitar o fluxo de materiais e operadores. Foram criadas áreas denominadas "supermercados", estoques organizados para etapas subsequentes do processo, localizados estrategicamente entre setores como solda e pintura, otimizando a transferência e o controle visual dos itens em processo. A Figura 4 ilustra o Mapofluxograma da família de itens com maior volume de produção no layout proposto:

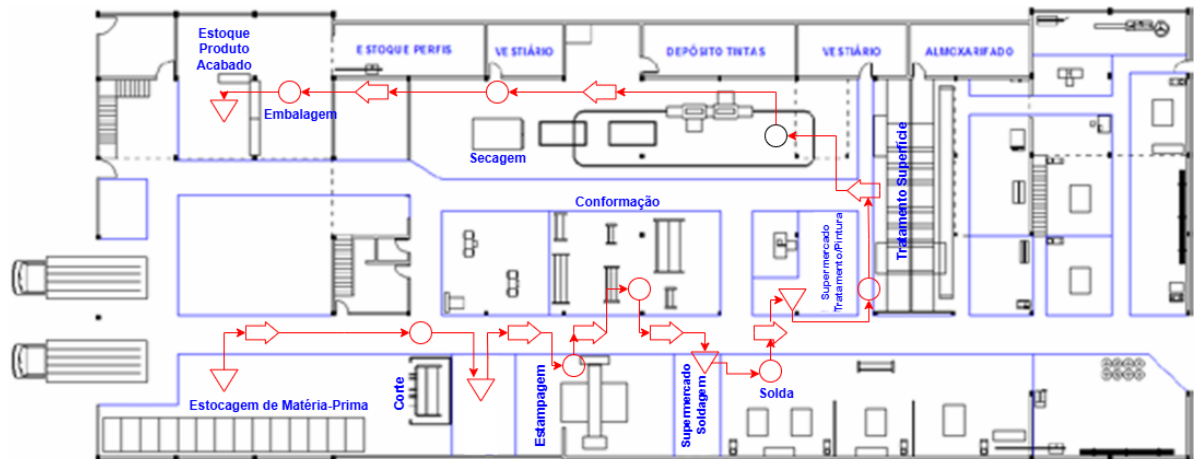


Figura 5 – Mapofluxograma da família de produtos no layout proposto
 Fonte: Adaptado de Gerlach et al. (2017).

No novo trajeto, os produtos iniciam no corte, seguem para estampagem e conformação, setores agora mais próximos, e depois são encaminhados para a solda, que passou a contar com uma área 30% maior e fluxo mais contínuo, apoiado pelo supermercado criado. Em seguida, os itens passam pelo tratamento de superfície, pintura e secagem, todos dispostos centralmente na planta, favorecendo o atendimento tanto da produção seriada quanto da linha de produtos especiais. Finalmente, os itens são embalados e armazenados em área apropriada.

Essa proposta de reorganização do layout, segundo os autores, busca melhorias no processo produtivo, como a redução da distância percorrida pelos produtos de 151 para 122 metros, maior organização dos setores com delimitação clara dos centros de trabalho e corredores de circulação, além de uma configuração mais flexível e adaptável, que facilita futuras expansões e adequações da planta.

3.1.4 Mapeamento do Fluxo de Valor do estado futuro

Com base nas análises realizadas e nos fundamentos da produção enxuta, os autores elaboraram o MFV do estado futuro da operação, conforme indica a Figura 5:

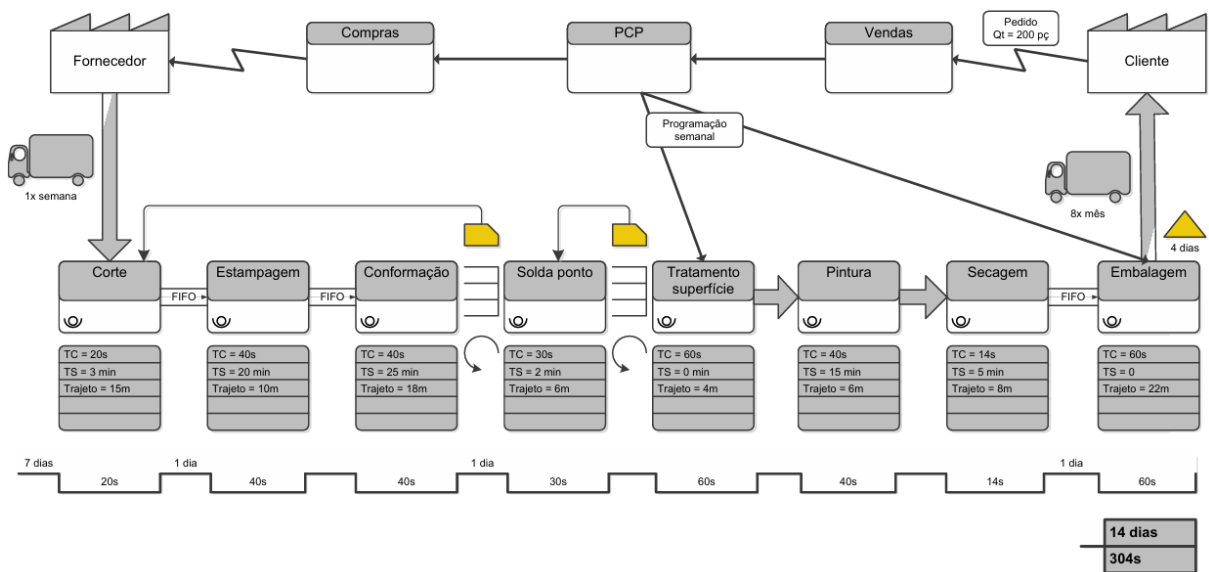


Figura 6 – Mapeamento do Fluxo de Valor do estado futuro.
Fonte: Gerlach et al. (2017).

É importante destacar os principais pontos considerados na elaboração do mapa de estado futuro, que refletem as melhorias propostas pelos autores e os resultados esperados com sua implementação:

- A chegada de matéria-prima, que anteriormente ocorria apenas duas vezes ao mês, passaria a ocorrer uma vez por semana, o que, conforme os autores, promoveria maior regularidade no abastecimento e proporcionaria um controle de estoque mais eficiente.
- Após o setor de conformação, seria introduzido um supermercado para as peças destinadas à soldagem e outro posicionado antes do setor de tratamento de superfície. Esses supermercados, por se tratarem de estoques regulados com quantidade máxima definida, seriam esperados como mecanismos de apoio ao controle visual em um sistema de produção puxada, contribuindo para a redução do estoque em processo.
- O PCP, que antes era realizado com base em uma programação diária da produção onde cada setor envolvido processava de forma não coordenada, passaria a ser feito com uma programação semanal para os setores de Tratamento de Superfície e Embalagem. Com isso, esperava-se que todo o fluxo produtivo passasse a ser puxado a partir da necessidade de material no Tratamento de Superfície, direcionando a produção até a etapa final da operação.

Com base nas modificações propostas no layout e na reorganização do fluxo de materiais, os autores estimaram que o *lead time* total da produção da família de produtos

pudesse ser reduzido de 26 para 14 dias, o que representaria, segundo a expectativa dos autores, uma possível diminuição de 46% no tempo total de atravessamento do sistema produtivo.

Também foi projetada, como resultado das melhorias propostas, uma redução no tempo efetivamente dedicado a atividades que agregam valor ao produto, passando de 334 segundos para 304 segundos.

3.2 INTEGRAÇÃO DA SIMULAÇÃO AO MAPEAMENTO DO FLUXO DE VALOR

Este trabalho se inspirou na abordagem proposta por Queiroz e Miranda (2013), que desenvolveram uma metodologia para integrar a Simulação a Eventos Discretos (SED) ao MFV. Trata-se de um modelo que orienta o planejamento e a implantação de sistemas de produção enxuta. A proposta fornece uma base metodológica sólida ao combinar a visualização estratégica do MFV com a análise quantitativa e detalhada da simulação computacional, ampliando a confiabilidade e a eficácia das decisões de melhoria no ambiente industrial.

3.2.1 Escolha do modelo conceitual

Embora o MFV seja utilizado como ferramenta de diagnóstico e representação macro do sistema produtivo, sua aplicação direta como modelo conceitual para simulação de eventos discretos apresenta algumas limitações que podem dificultar a construção do modelo computacional futuramente. Por ser essencialmente estático e baseado em médias, o MFV não contempla a dinâmica do sistema, como a variabilidade dos tempos de processo, formação de filas, lógica condicional, disponibilidade de recursos e eventos assíncronos.

Além disso, o MFV não possui uma estrutura formal capaz de representar, com a profundidade necessária, os elementos lógicos e operacionais que regem o funcionamento detalhado do sistema produtivo.

Dessa forma, apesar do MFV tenha sido utilizado como base preliminar para a identificação de gargalos e oportunidades de melhoria, optou-se por desenvolver um modelo conceitual específico e mais adequado às particularidades da simulação computacional proposta. Para isso, foi utilizada a notação IDEF-SIM. Essa abordagem permite representar de maneira estruturada e lógica os fluxos, decisões, estoques, operadores e variabilidades presentes

no sistema, sendo mais adequada aos objetivos de uma simulação computacional de eventos discretos.

3.2.2 Escolha do software

Apesar de tantas opções de softwares para a elaboração dos modelos computacionais, optou-se pela utilização do software FlexSim®. A decisão em adotar o FlexSim® partiu do fato de que ele oferece uma interface visual, interativa e altamente detalhada, além de ser intuitiva. Isso facilita o desenvolvimento do modelo, bem como a representação visual do sistema produtivo. Essa característica torna o processo de modelagem mais ágil e acessível, sem comprometer o nível de realismo e detalhamento das simulações.

O FlexSim® também oferece elementos essenciais à SED, como lógica condicional, possibilidade de adicionar códigos de programação, alocação e restrição de recursos, formação de filas, controle de estoques, entre outras ferramentas que foram utilizadas neste trabalho.

Adicionalmente, o software oferece indicadores de desempenho, geração de gráficos e outras análises estatísticas, que possibilitaram a validação do modelo do estado atual e futuro, bem como a análise comparativa das saídas dos modelos.

Por fim, destaca-se que o FlexSim® disponibiliza uma versão educacional que, mediante justificativa acadêmica, é viabilizada sua utilização em modelagens que ultrapassam as limitações da versão gratuita, diferentemente de outras plataformas que apresentam maiores restrições ou processos de licenciamento menos acessíveis.

3.2.3 Modelo conceitual para o MFV do estado atual

3.2.3.1 IDEF-SIM

Como um dos objetivos deste trabalho, a modelagem conceitual para o fluxo produtivo do estado atual foi desenvolvida utilizando a técnica IDEF-SIM. Embora o modelo IDEF-SIM represente os aspectos qualitativos do sistema, os dados quantitativos como tempos de ciclo e de setup foram incluídos por meio de uma tabela auxiliar, com o objetivo de facilitar a visualização e compreensão do modelo e servindo de base para a modelagem computacional posterior.

Para representar uma simulação estocástica, os Tempos de Ciclo (TC) e de Setup (TS) foram modelados com base em uma distribuição normal. Segundo Chwif e Medina (2006), quando não há dados suficientes para definir com precisão a variabilidade, é possível recorrer a distribuições estatísticas específicas, de acordo com as características do processo analisado. No nosso caso, a distribuição normal se torna adequada já que os tempos apresentam variação simétrica em torno de uma média, resultam da soma de diversas pequenas atividades e se aplicam a processos manuais e relativamente padronizados — características observadas neste estudo. Assim, a média adotada corresponde ao tempo de ciclo nominal de cada operação, enquanto o desvio padrão foi estimado em 5% desse valor, com o objetivo de representar variações realistas nos resultados da simulação.

Com base na simbologia apresentada durante a revisão bibliográfica deste estudo, a Figura 7 ilustra o modelo conceitual em IDEF-SIM desenvolvido para representar o fluxo de produção da família de itens com maior volume de fabricação da indústria metalúrgica.

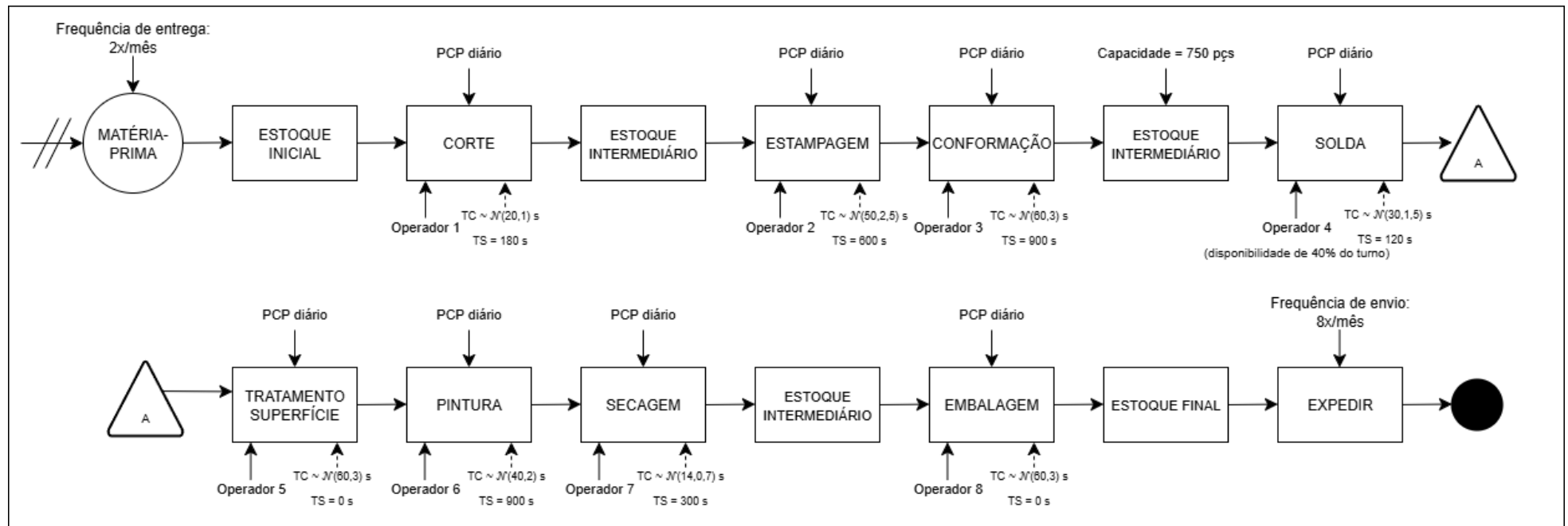


Figura 7 - Modelo conceitual em IDEF-SIM do estado atual.
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O sistema representa o fluxo de produção de uma família de produtos em uma metalúrgica, com as seguintes etapas sequenciais:

- Fornecimento de Matéria-Prima: Entrega 2 vezes por mês.
- Corte: Corta a matéria-prima em peças.
- Estampagem: Realiza estampagem nas peças cortadas.
- Conformação: Dá forma às peças estampadas.
- Solda Ponto Superfície: Une as peças por solda.
- Tratamento Superfície: Aplica tratamento químico ou térmico.
- Pintura: Aplica pintura nas peças.
- Secagem: Seca as peças pintadas.
- Embalagem: Embala as peças para envio ao cliente.
- Entrega ao Cliente: Entrega 8 vezes por mês.

Além do fluxo físico de materiais, o fluxo de informações que sustenta o processo produtivo segue a seguinte sequência: o pedido do cliente é encaminhado ao setor de Planejamento e Controle da Produção (PCP), que elabora o programa de produção diário e, a partir dele, são geradas as instruções específicas para cada etapa operacional.

3.2.3.2 Dados adicionais

Os tempos médios de permanência dos materiais nos pontos de estoque ao longo do processo — dados essenciais para a validação do modelo e relacionados às oportunidades de melhoria identificadas pelos *Kaizen Bursts* no mapa do estado atual — foram organizados na tabela 2, com o objetivo de facilitar a visualização e a compreensão do sistema.

Ponto de Estoque	Tempo Médio de Permanência
<i>Matéria-prima</i>	15 dias
<i>Após corte</i>	1 dia
<i>Após conformação</i>	5 dias
<i>Após secagem</i>	1 dia
<i>Produto acabado</i>	4 dias

Tabela 3 - Tempos Médios de Permanência em cada Estoque do Processo.

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.3.3 Recursos operacionais

Nem todas as informações necessárias para a modelagem estavam disponíveis no artigo de referência utilizado como base. Isso se deve ao fato de que o trabalho original não considerava a utilização da SED, limitando o detalhamento de parâmetros operacionais fundamentais. Diante disso, foi necessário estimar alguns valores com base em premissas realistas e coerentes com o contexto produtivo observado. Todas as estimativas adotadas foram devidamente justificadas e serão reavaliadas caso se verifique uma discrepância significativa entre os resultados obtidos na simulação e os dados apresentados no estudo original.

Para fins de modelagem, consideraram-se as seguintes premissas:

- Máquinas: foi assumida a existência de uma máquina por etapa do processo, uma vez que o artigo não fornecia informações específicas sobre a capacidade instalada ou quantidade de equipamentos por operação.
- Operadores: adotou-se a premissa de um operador por máquina, disponível em tempo integral ao longo do turno de trabalho. A única exceção é a etapa de solda, onde o operador está disponível apenas 40% do tempo de turno. Nos 60% restantes, o operador atua em outra família de produtos que não integra o escopo desta modelagem, sendo, portanto, considerado como indisponível para o sistema simulado.

3.2.4 Simulação e validação para o MFV do estado atual

3.2.4.1 Modelo computacional do estado atual

Conforme mencionado anteriormente, utilizou-se o software FlexSim® para a criação do modelo computacional. A figura 8 apresenta a esquematização visual do modelo desenvolvido para o mapeamento do estado atual, implementado no software.

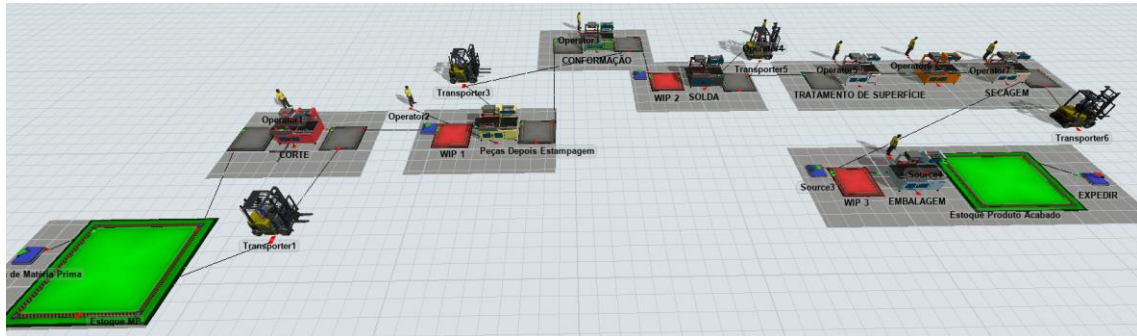


Figura 8 – Representação visual do modelo computacional do estado atual desenvolvido no FlexSim®.
Fonte: Elaborado pelo autor com base na modelagem no FlexSim®.

Para representar a jornada de trabalho da fábrica, foram definidos os turnos de trabalho com duração de 5 horas, de segunda-feira à sexta-feira. Essa decisão se deve ao fato de que a simulação trata apenas da maior família de produtos da metalúrgica, ou seja, presume-se que a fábrica não dedica 100% do seu tempo para esta família, portanto, não serão alocadas as 8 horas de trabalho por turno. Para esta configuração, foi utilizado o recurso *Time Table*, onde é possível definir a disponibilidade da operação conforme o turno de trabalho. A figura abaixo representa o *Time Table* configurado para a operação:

Day (select rows)	00:00	03:00	06:00	09:00	12:00	15:00	18:00	21:00
Mon								
Tue								
Wed								
Thu								
Fri								
Sat								
Sun								

Figura 9 – Configuração do recurso *Time Table* no FlexSim® para definição do turno de trabalho.
Fonte: Elaborado pelo autor com base na modelagem no FlexSim®.

Como explicado no escopo deste trabalho, os tempos de ciclo de cada processo foram modelados por meio de uma distribuição normal, com média igual ao tempo de ciclo nominal

de cada processo e desvio padrão correspondente a 5% desse valor. Isso permite simular a variabilidade natural do processo produtivo. Por exemplo, se uma operação possui tempo de ciclo médio de 60 segundos, o desvio padrão será de 3 segundos, ou seja, aproximadamente, 68% dos tempos estarão concentrados entre 57s e 63s. O FlexSim® oferece diversas opções de distribuições estatísticas, e a figura 10 mostra como essa configuração foi aplicada à operação de Solda.

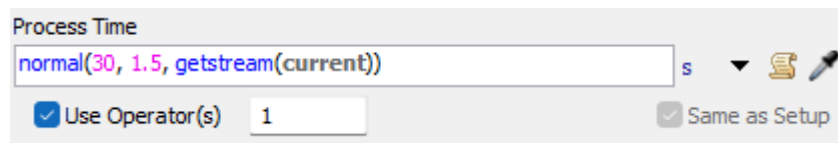


Figura 10 – Configuração da distribuição normal do tempo de ciclo no FlexSim® para a operação de Solda.
Fonte: Elaborado pelo autor com base na modelagem no FlexSim®.

Também foi considerada a disponibilidade parcial do operador da Solda, uma vez que ele não atua exclusivamente nessa operação. Conforme mencionado no escopo deste trabalho, como o tempo de ciclo da Solda (30s) é metade do tempo de ciclo da Conformação (60s), para representar a formação de estoque nesta etapa do processo, a Solda precisa estar indisponível pelo menos metade do tempo de turno de trabalho. Portanto, para a modelagem, o operador da solda ficará disponível somente 40% do tempo de turno. Nesse período, o operador atuaria em intervalos distribuídos ao longo do turno, de modo que o somatório corresponda a essa disponibilidade estimada. Nos 60% restantes, o operador estaria dedicado a outra família de produtos não contemplada no escopo deste estudo. Nos outros 60% do tempo, ele atuará fora do sistema modelado (em outra família de produtos, que não faz parte do escopo). Isso também foi feito utilizando o recurso *Time Table*, onde foi criada uma configuração exclusiva para a Solda representando a disponibilidade da operação.

Para evitar o crescimento ilimitado do o Estoque Intermediário foi limitado a uma capacidade máxima de 750 unidades. Quando esse limite é atingido, o processo anterior (Conformação) é bloqueado, impedindo o acúmulo contínuo. A figura 11 representa como isso foi configurado dentro do software.

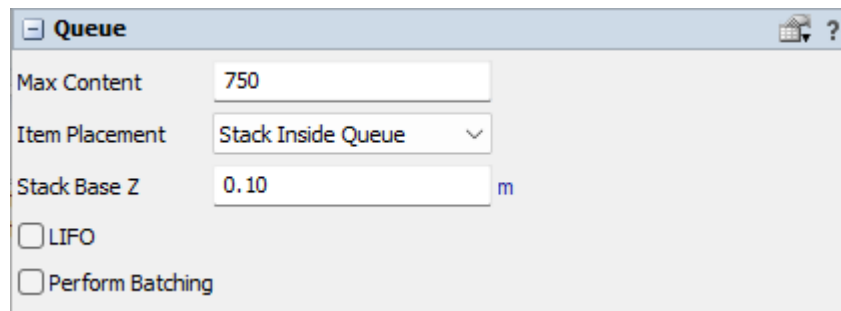


Figura 11 – Definição da capacidade máxima do estoque intermediário antes da operação de Solda.
Fonte: Elaborado pelo autor com base na modelagem no FlexSim®.

Além disso, observou-se que a formação de fila após a etapa de Corte ocorre de forma natural, devido à diferença entre os tempos de ciclo das etapas subsequentes. Enquanto o Corte apresenta um tempo de ciclo de 20 segundos, a Estampagem, etapa imediatamente posterior, possui um tempo de ciclo de 50 segundos, resultando em uma taxa de processamento inferior e, consequentemente, na acumulação de peças na fila de espera.

Em relação aos tempos de setup, embora o artigo utilizado como base mencione a existência desses tempos, não há detalhamento sobre a frequência diária. Diante disso, estimou-se que o setor de Corte realiza dois setups por dia (troca de lâmina e lubrificação), enquanto os setores de Estampagem, Conformação, Pintura e Secagem realizam um setup diário (para limpeza, ajustes e outras atividades). Já os setores de Tratamento de Superfície e Embalagem não requerem setups.

Para a programação diária da produção, considerando que os setores não operam de forma coordenada, foi criada uma *Label* para cada setor, que representa a quantidade a ser produzida por dia conforme a definição do Planejamento e Controle da Produção (PCP). A figura 12 apresenta a configuração dessas *Labels* no modelo. Cada setor processa peças até atingir a quantidade estipulada para o dia, momento em que o processamento é automaticamente interrompido. O PCP programa a produção diária de acordo com a remessa em cada entrega de produto.



Figura 12 – Definição das Labels para controle da produção diária por setor no FlexSim®.
Fonte: Elaborado pelo autor com base na modelagem no FlexSim®.

O tempo de aquecimento foi definido por meio de uma simulação preliminar, executada até que os níveis de estoque apresentassem estabilidade, para que sejam desconsiderados os efeitos iniciais irreais que poderiam contaminar os resultados da simulação. Para este modelo, o tempo de aquecimento definido foi de 8 semanas, do dia 05/05 até o dia 30/06. Somente após esse intervalo é que os dados passaram a ser coletados para análise.

Conforme definido no modelo conceitual, a chegada da matéria-prima ocorre a cada 15 dias, enquanto as entregas dos produtos são realizadas duas vezes por semana. Para definir as quantidades de matéria-prima e de produto acabado, considerou-se a capacidade efetiva diária da operação no modelo, observada, em média, de 240 unidades. Assim, a produção semanal gira em torno de 1200 unidades. Dessa forma, como as entregas de produtos são feitas duas vezes por semana, estima-se que sejam transportadas, em média, 600 unidades por remessa, atendendo a uma distribuição normal de média 600 e desvio padrão de 30. Da mesma maneira, como o recebimento de matéria-prima ocorre quinzenalmente, a cada entrega são recebidas, em média, 2400 unidades. Conforme explicado anteriormente no escopo deste trabalho, esta estimativa é essencial para garantir o escoamento da produção dentro do sistema simulado.

3.2.4.2 Validação do modelo

Seguindo a metodologia proposta por Queiroz e Miranda (2013), a validação do modelo consiste na comparação entre os dados de saída do modelo computacional e os dados obtidos a partir do MFV do estado atual.

Como as oportunidades de melhoria, demarcadas pelos *Kaizen Bursts* no mapa do estado atual, focaram em reduzir os desperdícios evidenciados pelo tempo de estoque em processo, as métricas para validação do modelo serão o *Lead Time Total* e os Tempos Médios de Permanência em Estoque, os quais representaram grande parte dos *Kaizen Bursts*.

Para isso, foi realizada a simulação de um período de 26 semanas (de 30/06 a 28/12), e essas métricas foram levantadas individualmente, com base na análise estatística fornecida pelo FlexSim®. A figura 13 exemplifica esse processo, apresentando o valor de *AvgStaytime* referente ao estoque anterior à operação de Solda.

Staytime		
Min	Max	Avg
0.00	503586.50	368694.03

Figura 13 – Exemplo de extração do tempo médio de permanência em estoque (*AvgStaytime*) no FlexSim®.

Fonte: Elaborado pelo autor com base na modelagem no FlexSim®.

Com os respectivos dados em mãos para cada estoque, foi elaborada a Tabela 4, contendo os valores das métricas utilizadas para a validação do modelo.

<i>Local do Estoque</i>	<i>Tempo Médio em Estoque Simulado (segundos)</i>	<i>Tempo Médio em Estoque Simulado (dias)</i>	<i>Tempo Médio em Estoque MFV (dias)</i>	<i>Erro %</i>
<i>Estoque de Matéria-Prima</i>	1411800	16,34	15	8,93%
<i>WIP 1 (após o Corte)</i>	82800	0,96	1	4,00%
<i>WIP 2 (antes da Solda)</i>	368400	4,26	5	14,80%
<i>WIP 3 (antes da Embalagem)</i>	80600	0,93	1	7,00%
<i>Estoque de Produto Acabado</i>	331400	3,85	4	3,75%
<i>Lead Time Total</i>	2275776	26,34	26	1,31%

Tabela 4 – Comparação entre os dados reais e os resultados do modelo para fins de validação

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, considerando o pequeno valor do erro calculado nas comparações, o modelo computacional foi considerado validado.

3.2.5 Modelo conceitual para o MFV do estado futuro

A modelagem conceitual para o mapeamento do fluxo de valor do estado futuro também foi realizada utilizando a notação IDEF-SIM. Para a elaboração desse modelo, foram consideradas todas as propostas de melhoria sugeridas por Gerlach et al. (2017), as quais serão testadas com o objetivo de embasar quantitativamente sua eficácia ou viabilidade prática. Essas propostas também servirão de base para a modelagem computacional do estado futuro. Com base na simbologia anteriormente apresentada, a figura 14 ilustra o modelo conceitual em IDEF-SIM desenvolvido para representar o MFV do estado futuro.

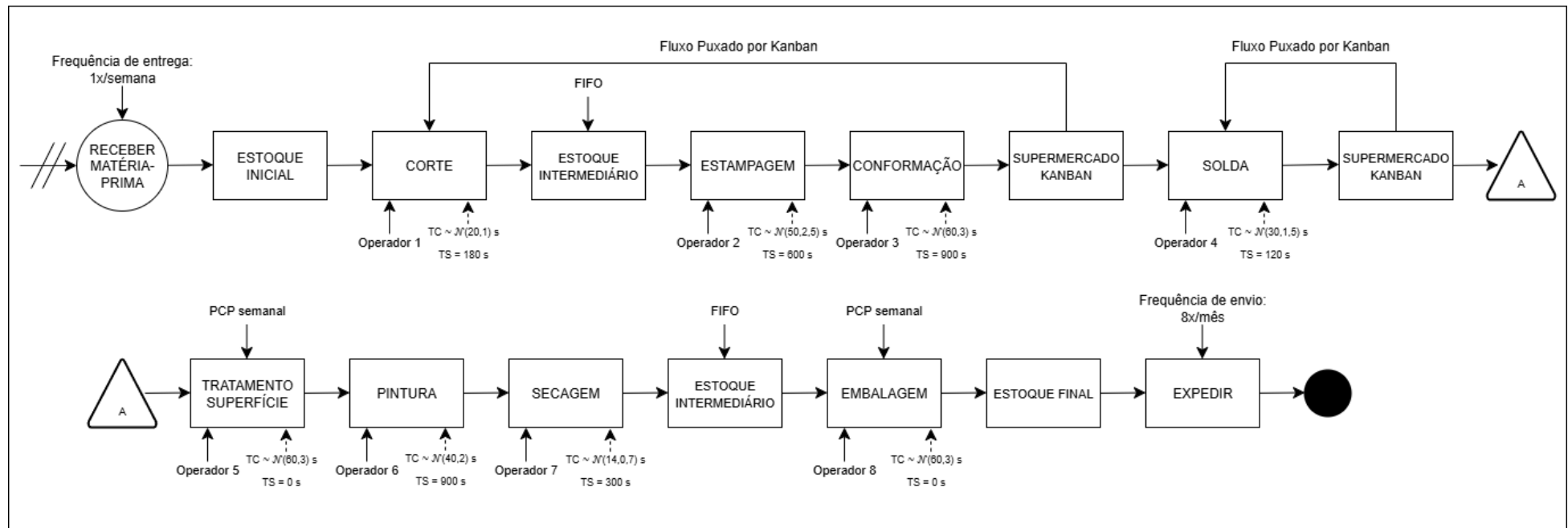


Figura 14 - Modelo conceitual em IDEF-SIM do estado futuro.
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Ressaltam-se as propostas sugeridas que fundamentaram a elaboração deste modelo conceitual:

- A frequência de entrega da matéria-prima, que anteriormente ocorria apenas duas vezes por mês, foi alterada para uma vez por semana.
- Foram implementados dois pontos de armazenagem do tipo supermercado: um anterior à operação de Solda e outro situado antes do Tratamento de Superfície. Quando o nível no Supermercado antes da Solda fica abaixo de um determinado limite, ele envia um sinal para o setor de Corte, que reinicia a produção. A peça então percorre as etapas de Estampagem e Conformação até que o Supermercado seja reabastecido. Da mesma forma, ocorre com o Supermercado antes do Tratamento de Superfície: toda vez que o Supermercado atingir um valor mínimo, ele solicita produção na Solda.
- O PCP passará a operar com uma programação semanal direcionada aos setores de Tratamento de Superfície e Embalagem. Assim, a necessidade de material no setor de Tratamento de Superfície puxará o fluxo produtivo anterior à operação e direcionará a produção até a Embalagem e a outras etapas finais da operação.
- A metodologia FIFO (*First In, First Out*) foi incorporada aos Estoques Intermediários remanescentes (depois do Corte e antes da Embalagem), garantindo que os produtos mais antigos no estoque sejam os primeiros a sair, antes dos mais recentes. Essa abordagem evita o acúmulo excessivo de materiais, assegurando que os itens não permaneçam estagnados por longos períodos no estoque.
- O redimensionamento dos centros de trabalho resultou em uma área maior para os operadores e também para circulação de peças. Com o novo posicionamento das máquinas, considera-se que houve um ganho em agilidade na execução das atividades. Os autores traduziram isso em um Tempo de Ciclo menor para algumas operações como Estampagem e Conformação, sendo essa alteração também aplicada no modelo computacional, e refletida na figura 14.

Diante da implementação das mudanças acima são esperados pelos autores os seguintes resultados:

- Redução do *lead time* total da produção da família de produtos, de 26 para 14 dias, o que representaria uma diminuição aproximada de 46% no tempo total de atravessamento do sistema produtivo.

- Diminuição dos tempos médios de permanência nos estoques e nos supermercados recém-implementados, conforme os valores apresentados na tabela abaixo:

<i>Ponto de Estoque</i>	<i>Tempo MFV Atual (dias)</i>	<i>Tempo MFV Futuro Esperado (dias)</i>	<i>Redução Percentual (%)</i>
<i>Matéria-prima</i>	15	7	53,3
<i>Após corte</i>	1	1	0
<i>Antes solda</i>	5	1	80
<i>Após secagem</i>	1	1	0
<i>Produto acabado</i>	4	4	0

Tabela 5 – Resultados esperados pelos autores para os Tempos Médios de Permanência em cada Estoque/Supermercado.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base neste modelo conceitual, foi desenvolvido o modelo computacional do estado futuro, com o objetivo de comparar suas saídas com os resultados esperados pelos autores a partir da implementação das melhorias propostas.

3.2.6 Simulação para o MFV do estado futuro

O modelo computacional do estado futuro foi igualmente desenvolvido por meio do software FlexSim®. A figura 15 apresenta a esquematização visual do sistema simulado para esse cenário, representando as modificações estruturais e operacionais incorporadas ao processo.

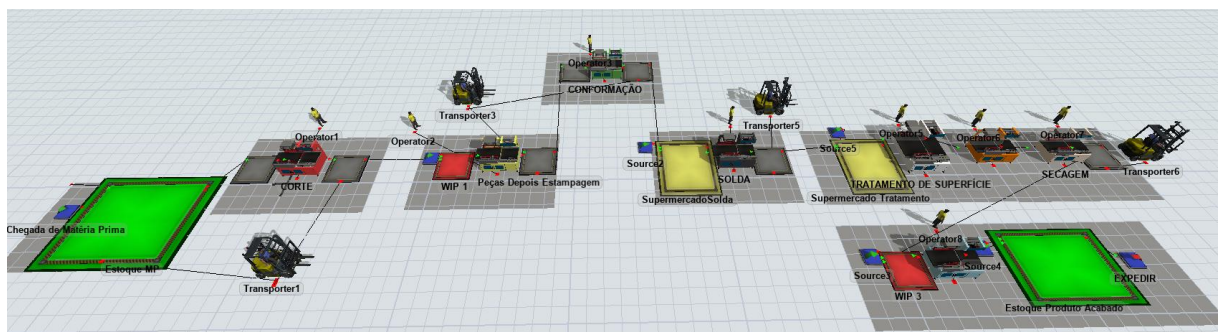


Figura 15 – Representação visual do modelo computacional do estado futuro desenvolvido no FlexSim®.

Fonte: Elaborado pelo autor com base na modelagem no FlexSim®.

Como o modelo do estado futuro representa o mesmo ambiente produtivo já analisado no estado atual, grande parte das configurações originais foram mantidas, a fim de preservar a consistência da simulação. Elementos estruturais como os turnos de trabalho definidos pelo *Time Table*, a aplicação de distribuições normais para os tempos de ciclo e a frequência diária dos setups nas máquinas permaneceram inalterados.

As modificações implementadas neste modelo concentram-se especificamente nas melhorias propostas, buscando refletir as mudanças esperadas com base nas oportunidades de aperfeiçoamento. Essas alterações são as seguintes:

Inicialmente, foram inseridas duas *Queues* representando os Supermercados *Kanban* conforme ilustrado na figura 16.

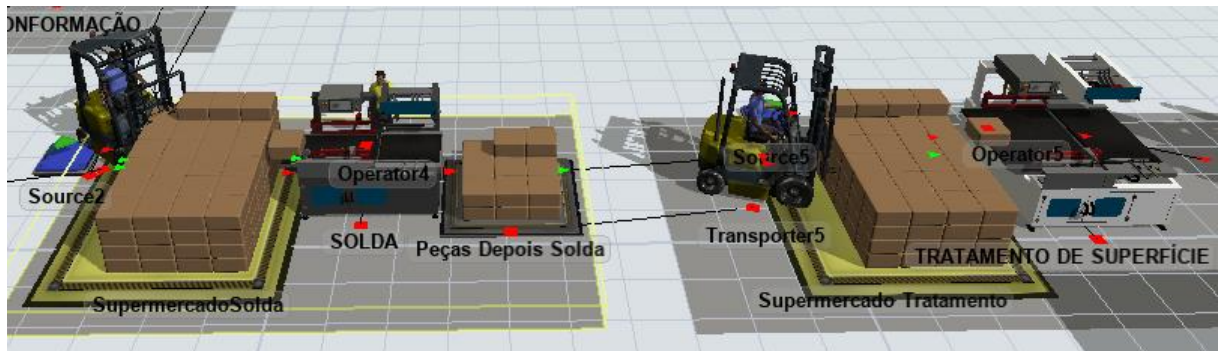


Figura 16 – Supermercados Kanban do modelo computacional do estado futuro.
Fonte: Elaborado pelo autor com base na modelagem no FlexSim®.

O primeiro deles foi posicionado antes do setor de Solda, substituindo o antigo estoque intermediário. Esse supermercado tem como função principal regular a produção no setor de Corte. Quando a quantidade de peças armazenadas cai abaixo de 100 unidades, um sinal *Kanban* é enviado ao Corte, que então inicia a produção. As peças produzidas percorrem as etapas de Estampagem e Conformação até que o supermercado seja reabastecido com 200 unidades. Ao atingir esse limite, a produção no Corte é automaticamente interrompida.

Esse ciclo se repete continuamente com o objetivo de manter o estoque em processo dentro de um determinado limite, garantindo que o setor de Corte produza apenas sob demanda. Essa lógica foi implementada no FlexSim® por meio do recurso de *trigger*, que permite executar comandos de programação em resposta a eventos específicos.

No caso do setor de Corte, foi utilizado o evento *On Entry*, que é acionado sempre que uma nova peça entra na operação. A cada entrada, o sistema verifica a quantidade atual no supermercado e, ao atingir 200 unidades, interrompe a produção. De forma análoga, a retomada

da produção ocorre quando o estoque no supermercado fica abaixo de 100 unidades. Neste caso, o evento considerado é o *On Exit* no próprio supermercado, ou seja, a checagem é feita toda vez que ocorre uma saída de produto, que envia uma mensagem ao setor de Corte. Esta mensagem é captada por um *trigger* do tipo *On Message*, reiniciando assim o processo produtivo.

As quantidades de 100 e 200 unidades foram definidas com base em estimativas realistas, já que o artigo de referência não especifica valores ideais. Esses limites foram escolhidos de modo a fazer sentido para o contexto simulado, considerando os níveis de estoque previamente observados no modelo do estado atual.

A figura 17 mostra como a programação foi implementada para cada gatilho.



Figura 17 – Programação dos triggers no setor de Corte e no Supermercado.

Fonte: Elaborado pelo autor com base na modelagem no FlexSim®.

Para definir o limite para o Supermercado colocado antes do Setor de Tratamento de Superfície foi considerado o tempo médio. Observe que esse limite de tempo não poderia ser alto, já que anteriormente não existia estoque intermediário neste ponto do processo. Assim,

optou-se por manter, em média, um nível de 100 unidades nesse supermercado. Logo, sempre que a quantidade de itens armazenados cair abaixo do limite estabelecido, o sistema acionará a produção no setor de Solda, que continuará processando materiais até que o supermercado seja reabastecido. Esta foi uma solução importante para lidar com o problema de não ter um operador dedicado em tempo integral, já que agora a operação da Solda não fica mais condicionada à disponibilidade do operador e sim ao sistema puxado por *Kanban*.

Para representar a mudança da programação diária para a programação semanal do PCP no modelo computacional, foi criada uma *Label* para os setores de Tratamento de Superfície e Embalagem, conforme exemplificado na figura 18.

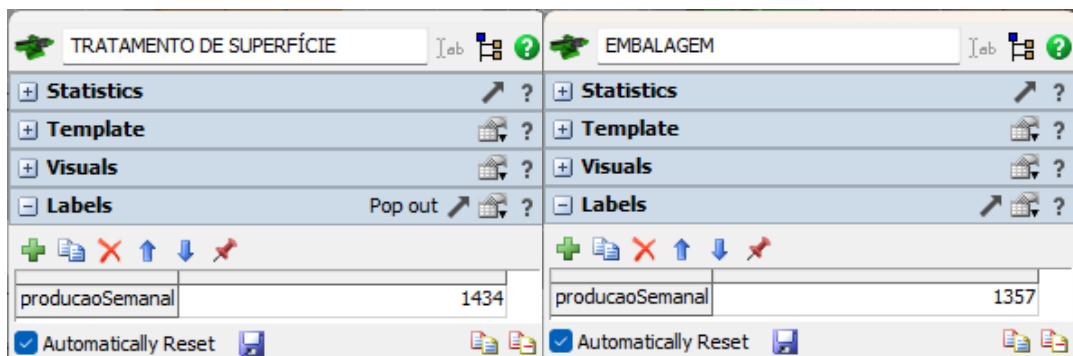


Figura 18 – Definição da Label para controle da produção semanal nos setores de Tratamento de Superfície e Embalagem no FlexSim®.

Fonte: Elaborado pelo autor com base na modelagem no FlexSim®.

A lógica de controle é semelhante àquela utilizada para o modelo computacional do estado atual, porém com foco em uma programação de produção semanal, em vez de diária, ou seja, cada setor processa as peças conforme a programação de produção planejada para toda a semana.

Assim, esses dois setores passam a direcionar o fluxo produtivo da fábrica, coordenando todas as atividades, reduzindo estoque em processo, já que as operações processam de acordo com a necessidade nestes setores. As etapas anteriores ao Tratamento são puxadas e as posteriores operam conforme a liberação dos produtos.

Além disso, assim como para o modelo anterior, o PCP passa a definir a programação de produção com base nas remessas previstas para cada semana, alinhando a fabricação ao ritmo de entrega dos pedidos.

De acordo com o modelo conceitual, a chegada de matéria-prima ocorre uma vez por semana, enquanto as entregas dos produtos são realizadas duas vezes por semana. Assim, as

quantidades de matéria-prima e de produtos finais foram definidas com base na mesma lógica adotada no modelo computacional anterior.

Considerando que as entregas são feitas duas vezes por semana, estima-se que cada remessa atenda a uma distribuição normal com média de 725 e desvio padrão de 36,25. Essa quantidade por entrega foi ajustada em relação ao modelo anterior devido ao aumento na capacidade efetiva diária da operação.

Da mesma forma, como o recebimento de matéria-prima ocorre semanalmente, cada entrega corresponde a, em média, 1.450 unidades.

Reforço que esta estimativa é importante para garantir o escoamento da produção e para garantir que as métricas de desempenho do estoque em processo não sejam comprometidas. Portanto, não implica em uma mudança real da demanda, mas sim uma adaptação feita exclusivamente para fins de modelagem.

A validação do modelo computacional do estado futuro não foi realizada, uma vez que seu propósito é justamente testar e comprovar os impactos das melhorias propostas. Aplicar os mesmos critérios de validação utilizados para o modelo do estado atual, como sugere a metodologia de Queiroz e Miranda (2013), não é adequado neste caso, pois não há dados reais com os quais as saídas possam ser comparadas. Validar o modelo com base em resultados que ainda se pretende confirmar comprometeria a lógica da análise, já que se estaria assumindo como verdade algo que ainda está em avaliação.

3.2.7 Avaliação quantitativa das melhorias propostas

Nesta seção será realizada uma comparação quantitativa entre os modelos computacionais do estado atual e do estado futuro, com o objetivo de avaliar os impactos das melhorias propostas. Além disso, serão confrontados os resultados obtidos na simulação com aqueles esperados pelos autores do estudo de referência, a fim de verificar a correspondência entre as previsões qualitativas e os dados simulados.

Cada modelo apresentou resultados coerentes com a lógica de organização da produção à qual se refere. O modelo do estado atual reproduz a estrutura vigente, marcada por ineficiências que resultam em desperdícios significativos, como excesso de estoque, transporte desnecessário, tempo de espera e movimentações não produtivas.

Por sua vez, o modelo do estado futuro foi elaborado com base nas propostas levantadas por meio do MFV, que buscou solucionar os problemas identificados nos *Kaizen Bursts*. Essas

propostas visavam adequar o sistema produtivo aos princípios da produção enxuta, proporcionando um fluxo mais eficiente e sincronizado com a demanda.

Contudo, vale destacar que tais melhorias partiram de uma análise predominantemente qualitativa. Embora bem fundamentadas, ainda careciam de comprovação quantitativa que validasse, com maior rigor, a eficácia das intervenções sugeridas.

Para essa avaliação, serão analisadas as seguintes métricas:

- Tempo médio de permanência em estoque por estação
- *Lead Time* médio
- Capacidade efetiva diária
- Taxas de utilização e ociosidade por estação

Importante destacar que o período de simulação utilizado para ambos os modelos foi idêntico, abrangendo 26 semanas, de 30 de junho a 28 de dezembro. Considerou-se uma jornada de trabalho composta por cinco dias úteis por semana, sem interrupções por feriados. Todas as demais informações específicas sobre a modelagem e validação dos modelos foram apresentadas nas seções anteriores.

3.2.7.1 Comparação quantitativa entre os modelos computacionais do estado atual e do estado futuro

3.2.7.1.1 Tempo médio de permanência em estoque por estação

A tabela 5 e o gráfico 1, apresentados a seguir, comparam os tempos médios de permanência nos estoques entre o modelo atual e o modelo futuro, considerando cada ponto de estoque ao longo do processo produtivo.

<i>Local do Estoque</i>	<i>Tempo Médio Modelo Atual</i>	<i>Tempo Médio Modelo Futuro</i>
<i>Estoque de Matéria-Prima</i>	1411800 s $\cong$ 16,34 dias	449.300 s $\cong$ 5,2 dias
<i>WIP 1 (após o Corte)</i>	82800 s $\cong$ 0,96 dias	74.100 s $\cong$ 0,86 dias
<i>WIP 2 / Supermercado 1 (antes da Solda)</i>	368400 s $\cong$ 4,26 dias	88.700 s $\cong$ 1,02 dias
<i>Supermercado 2 (Antes do Trat. de Superfície) *</i>	*	40.910 s $\cong$ 0,47 dias
<i>WIP 3 (antes da Embalagem)</i>	80600 s $\cong$ 0,93 dias	84.600 s $\cong$ 1 dia
<i>Estoque de Produto Acabado</i>	331400 s $\cong$ 3,85 dias	224.600 s $\cong$ 2,6 dias

*Incluído apenas no modelo futuro.

Tabela 6 – Tabela Comparativa dos Tempos Médios de Permanência nos Estoques por Etapa do Processo.
Fonte: Elaborado pelo autor.

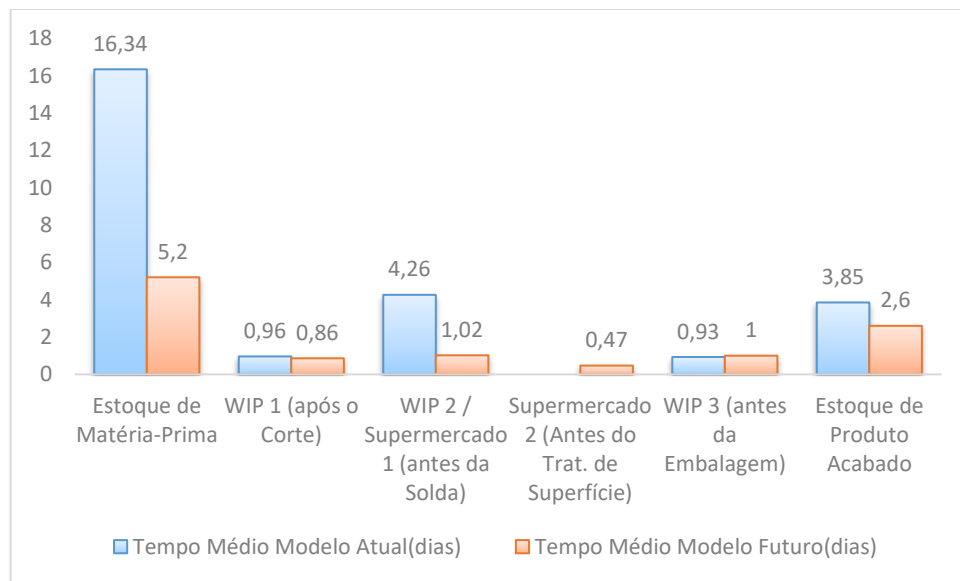


Gráfico 1 – Comparativo do Tempo Médio de Permanência nos Estoques (dias).
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.7.1.2 Lead Time Médio

O *Lead Time* médio caiu de 26,34 para 11,15 dias, representando uma redução de mais de 57% no tempo total de produção.

3.2.7.1.3 Capacidade Efetiva Diária

No modelo computacional do estado atual, ao longo dos 130 dias úteis simulados (26 semanas), foram expedidos 30.992 itens, resultando em uma capacidade efetiva diária de, em média, 238,4 unidades.

Já para o modelo computacional do estado futuro, foram expedidos 37.596 itens no mesmo período, o que representa uma capacidade efetiva diária de, em média, 289,2 unidades.

O gráfico 2 ilustra a comparação entre o *Lead Time* e a capacidade efetiva diária para cada um dos modelos simulados.

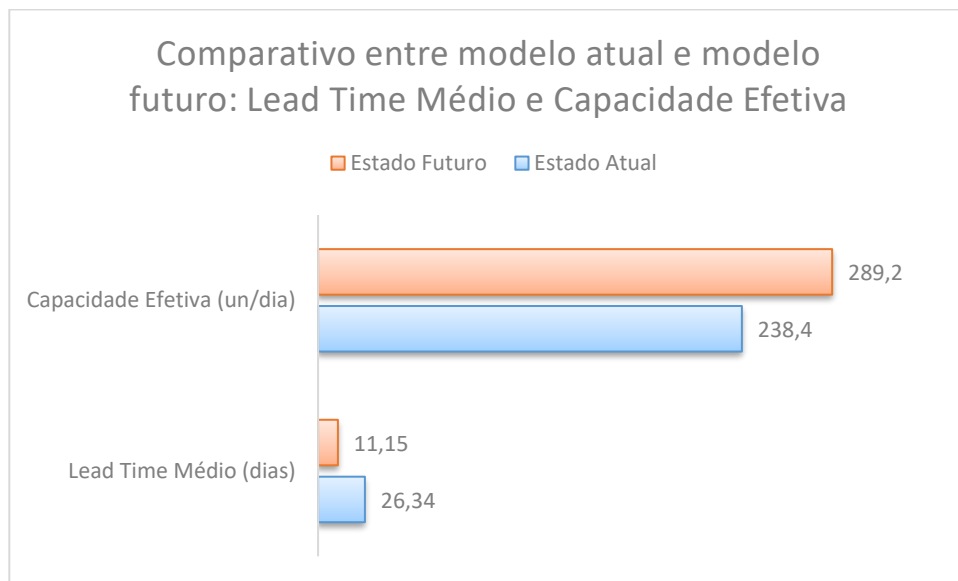


Gráfico 2 – Comparativo entre modelo atual e modelo futuro: Lead Time Médio e Capacidade Efetiva.
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.7.1.4 Taxas de utilização e ociosidade por estação

O gráfico abaixo apresenta as taxas de utilização dos setores levantados ao término da simulação, demonstrando os percentuais de tempo em que cada recurso permaneceu em processamento ou ocioso.

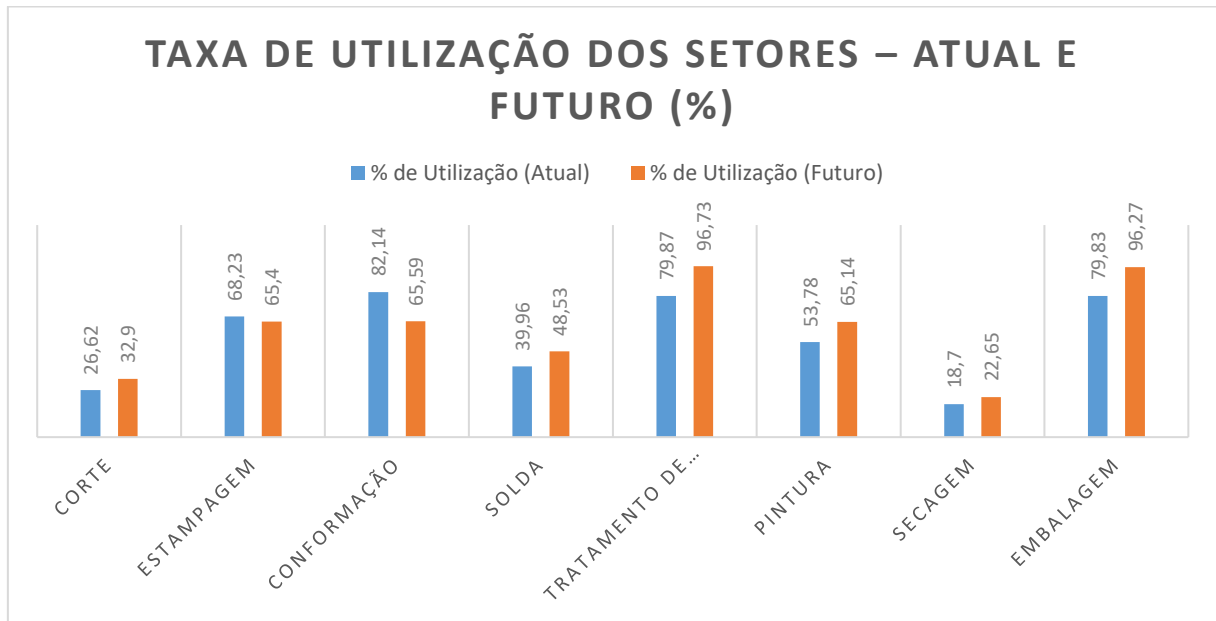


Gráfico 3 – Taxa de utilização por estação de trabalho do modelo do estado atual e futuro.
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.7.2 Comparação com os resultados esperados pelos autores no trabalho de referência

A tabela 9, em conjunto com o gráfico 4, apresentam a comparação das saídas do modelo do estado futuro com os resultados esperados pelos autores pelas melhorias propostas no MFV futuro.

<i>Estação / Estoque</i>	<i>Tempo Simulado (dias)</i>	<i>Tempo Esperado (dias)</i>	<i>Diferença Absoluta (dias)</i>	<i>Diferença Percentual (%)</i>
<i>Estoque de Matéria-Prima</i>	5,2	7	-1,8	-25,7
<i>WIP 1 (após Corte)</i>	0,86	1	-0,14	-14
<i>Supermercado 1 (antes da Solda)</i>	1,02	1	0,02	2
<i>Supermercado 2 (antes Trat. Superfície) *</i>	0,47			
<i>WIP 3 (antes da Embalagem)</i>	1	1	0	0
<i>Estoque de Produto Acabado</i>	2,6	4	-1,4	-35
<i>Lead Time Total</i>	11,15	14	-2,85	-20,4

*Incluído apenas no modelo futuro.

Tabela 7 – Tempo Médio de Permanência em Estoque (Modelo Futuro x Resultados Esperados).
Fonte: Elaborado pelo autor.

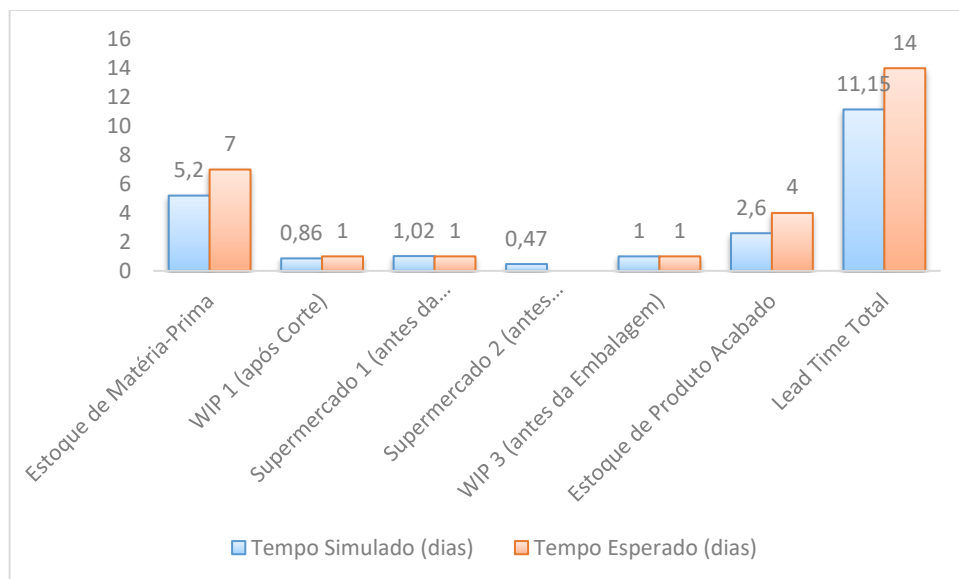


Gráfico 4 – Comparativo de Tempos e Diferença Percentual por Estação (Modelo Futuro x Resultados Esperados).

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com o levantamento dos dados quantitativos referentes aos modelos computacionais do estado atual e futuro, é necessário discutir os pontos mais importantes referentes aos resultados apresentados na seção anterior.

3.3.1 Tempo médio de permanência em estoque

Os estoques elevados indicados pelo modelo atual refletem ineficiências mapeadas no processo produtivo. Já os dados simulados para o estado futuro apresentam reduções significativas no tempo de permanência dos produtos em estoque em praticamente todas as etapas. O tempo no estoque de matéria-prima, por exemplo, caiu de 16,34 para 5,2 dias, o que evidencia uma redução do acúmulo inicial.

Adicionalmente, os tempos de permanência nos supermercados (1,02 e 0,47 dias) sugerem uma regulação mais eficiente do fluxo produtivo, especialmente nos pontos anteriores às etapas de Solda e Tratamento de Superfície. Esses valores indicam menor formação de estoques intermediários e maior sincronização entre as operações.

3.3.2 Lead Time Médio

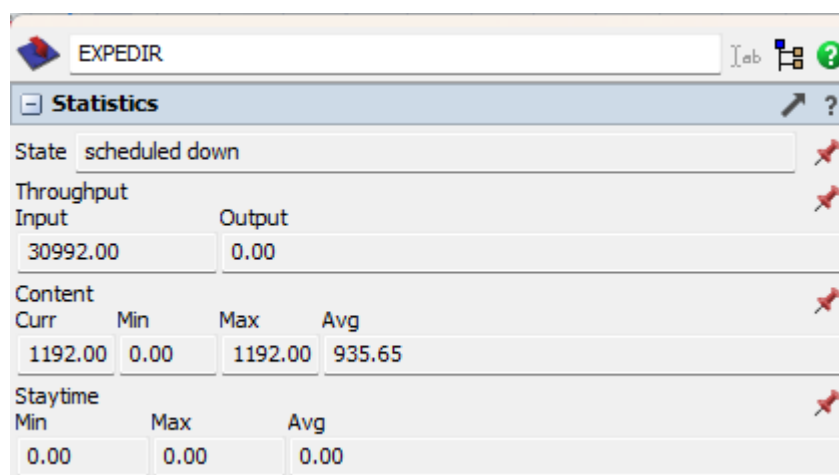
O Lead Time Médio de 26,34 dias no modelo do estado atual representa o tempo total entre a entrada da matéria-prima e a expedição do produto final. Esse valor reflete a soma dos tempos operacionais e das esperas associadas ao processo simulado.

No modelo do estado futuro, esse tempo foi reduzido para 11,15 dias, evidenciando um desempenho significativamente mais eficiente. A diferença entre os dois cenários representa uma melhoria quantitativa relevante em termos de tempo de atendimento e fluxo de produção.

3.3.3 Capacidade efetiva diária

Conforme observado no modelo do estado atual, apesar de outras máquinas do processo possuírem tempos de ciclo e setup mais longos, a Solda se configura como o verdadeiro gargalo da produção, pois é o recurso que permanece indisponível por mais tempo ao longo do dia — muitas vezes por falta de operador dedicado ou por interrupções. Isso acaba gerando o maior estoque intermediário da linha.

Dessa forma, a capacidade efetiva diária é representada pelo output diário da Solda. A figura 19, que traz as estatísticas do recurso *Sink*, mostra que, ao longo dos 130 dias úteis simulados (26 semanas), foram expedidos 30.992 itens, resultando em uma capacidade média diária de 238,4 unidades.



EXPEDIR				
Statistics				
State: scheduled down				
Throughput				
Input		Output		
30992.00		0.00		
Content				
Curr	Min	Max	Avg	
1192.00	0.00	1192.00	935.65	
Staytime				
Min	Max	Avg		
0.00	0.00	0.00		

Figura 19 – Estatísticas do recurso Sink e quantidade expedida durante a simulação do modelo do estado atual.
Fonte: Elaborado pelo autor com base na modelagem no FlexSim®.

Em relação ao modelo do estado futuro, a inserção de um Supermercado depois da Solda, com controle baseado em *Kanban*, passou a regular a produção sinalizando quando há ou não necessidade de produzir. O alívio deste gargalo elevou a capacidade efetiva diária da fábrica. A figura 20 apresenta as estatísticas relacionadas do recurso *Sink*, indicando que a quantidade de produtos expedidos para o modelo de estado futuro simulado foi de 37596 itens, configurando uma capacidade efetiva diária de 289,2 unidades.

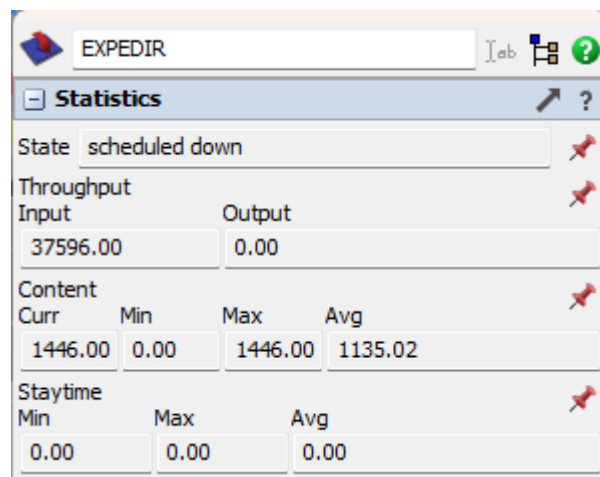


Figura 20 – Estatísticas do recurso Sink e quantidade expedida durante a simulação do modelo do estado futuro.
Fonte: Elaborado pelo autor com base na modelagem no FlexSim®.

3.3.4 Taxas de utilização e ociosidade por estação de trabalho

Algumas conclusões podem ser feitas a partir das taxas de utilização levantadas para o modelo do estado atual em cada uma das operações:

- Como o PCP adota uma programação diária não coordenada entre os setores, as etapas de Corte e Secagem — que possuem os menores Tempos de Ciclo (20 e 14 segundos, respectivamente) — apresentam as maiores taxas de ociosidade. Isso ocorre porque essas operações processam os itens em menor tempo comparado com os demais setores.
- A etapa de Solda é o gargalo do processo produtivo porque o operador responsável só executa as atividades em cerca de 40% do tempo disponível, o que limita o ritmo da produção. Para evitar a formação de estoque intermediário, seria necessário que o operador estivesse disponível, no mínimo, 50% do turno. Como o Tempo de Ciclo da Solda é metade dos Tempos de Ciclo das etapas de Conformação, Tratamento de Superfície e Embalagem, ao aumentar a disponibilidade do operador para mais de 50%, a Solda deixaria de ser o gargalo, transferindo essa restrição para os demais setores.

- Os setores de Estampagem e Conformação ficam ociosos por aproximadamente 33% e 20% do tempo, respectivamente. Isto ocorre porque a capacidade física do Estoque Intermediário antes da Solda atinge sua capacidade máxima, forçando a interrupção temporária da produção nesses setores.

Já para o modelo do estado futuro, as taxas de utilização e ociosidade analisadas permitem algumas considerações:

- Conforme apontado na análise do modelo computacional do estado atual, a etapa de Solda deixou de depender da disponibilidade do operador e passou a ser regulada pelo Supermercado *Kanban*. Com isso, a Solda deixou de ser o gargalo do processo, transferindo essa limitação para os setores com maior Tempo de Ciclo — Tratamento de Superfície e Embalagem — que agora operam quase em tempo integral.
- As ociosidades observadas nos demais setores são resultado das diferenças entre os Tempos de Ciclo de cada operação. Setores com Tempos de Ciclo mais curtos finalizam suas tarefas rapidamente, ficando à espera das etapas seguintes que demandam mais tempo para processar os itens.

3.3.5 Comparação com os resultados esperados pelos autores no trabalho de referência

Os resultados obtidos do modelo computacional do estado futuro com os esperados pelos autores indicam que os benefícios estimados estavam bem próximos dos resultados obtidos através da simulação. Os indicadores do modelo superaram as expectativas teóricas. As melhorias propostas, que estavam embasadas conceitualmente pelos princípios da produção enxuta e apoiadas pela ferramenta do MFV, foram integrados à simulação computacional e se demonstraram eficazes também do ponto de vista quantitativo.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo aplicou a modelagem e simulação computacional para oferecer respaldo numérico ao estudo acadêmico desenvolvido por Gerlach et al. (2017). A simulação foi integrada ao MFV com o objetivo de avaliar quantitativamente a viabilidade e os impactos das propostas formuladas pelo estudo acadêmico de referência. A modelagem conceitual foi elaborada por meio da notação IDEF-SIM, enquanto a modelagem computacional foi implementada no software FlexSim®.

Realizou-se uma comparação entre as saídas dos modelos computacionais do estado atual e do estado futuro, com o objetivo de medir os efeitos das melhorias propostas, além de comparar os resultados obtidos na simulação com aqueles esperados pelos autores do estudo de referência.

O estudo evidenciou a importância de integrar uma análise qualitativa, caso do MFV, com uma análise quantitativa, caso da simulação computacional, com a finalidade de estruturar e fundamentar propostas de melhoria a um processo produtivo de âmbito industrial.

Este estudo agrega valor à comunidade acadêmica ao demonstrar uma abordagem de preencher a lacuna do embasamento quantitativo que muitas vezes é pouco explorada na prática acadêmica. Embora a incorporação de técnicas como a SED demande maior complexidade, ela traz maior confiabilidade nas implementações propostas ao sistema analisado.

Como recomendação, destaca-se a importância do detalhamento e da acurácia dos dados utilizados na modelagem. Recomenda-se que, em trabalhos futuros, seja realizada uma análise de sensibilidade com o objetivo de determinar de forma mais precisa o desvio padrão a ser adotado nas distribuições normais. Esse cuidado contribui para a aproximação do modelo à realidade, reduz a necessidade de estimativas e proporciona maior confiabilidade na análise dos resultados.

REFERÊNCIAS

- ALESSIO, Laura; SINKERE, Letícia Moreira; SOUZA, Bárbara Bruna de; RIBEIRO, Danilo Ribamar Sá. ***Proposta de implementação de tecnologias da Indústria 4.0 em uma produção alimentícia utilizando o mapeamento de fluxo de valor***. Revista Foco, v. 17, n. 10, p. 01–35, 2024.
- BANKS, J.; CARSON, J.; BARRY, N. **Discrete-event simulation**. Prentice-Hall, New Jersey, 4.ed., 2005.
- BANKS, J.; CHWIF, L. (2010). “**Warnings about simulation**”, Journal of Simulation. Tecnológico de Monterrey, Monterrey, NL, México and Escola de Engenharia Maua, São Caetano do Sul, São Paulo, Brazil.
- BARROS, A. et al. ***Applications of Hybrid Simulation Models in Industry 4.0 Contexts***. Journal of Simulation Engineering, 2020.
- BATEMAN, R. E.; BOWDEN, R. O.; GOGG, T. J.; HARREL, C. R.; MOTT, J. R. A.; MONTEVECHI, J. A. B. (2013). **Sistemas de simulação: aprimorando processos de logística, serviços e manufatura**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier.
- BONABEAU, E. ***Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems***. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2002.
- BRIGHENTI, José Renato Nunes. **Simulação e otimização de uma linha de manufatura em fase de projeto**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006. Orientador: Prof. José Arnaldo Barra Montevechi.
- CARMINATI, Roseane de Oliveira. ***Aplicação do mapeamento do fluxo de valor em uma fábrica de cânulas***. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2021.
- CARNEIRO, W. M.; PINTO, L. R. (2010). **Comparação entre o desempenho dos modelos de teoria das filas e simulação computacional para estimar o atraso de linhas ferroviárias singelas**. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/spolm/sites/www.marinha.mil.br/spolm/files/73768.pdf>. Acessado em: 22/09/2016.
- CHWIF, Leonardo; MEDINA, Afonso C. **Modelagem e simulação de eventos discretos, teoria & aplicações**. 3. ed. São Paulo, 2010. 320 p.
- DUARTE, Roberto N. **Simulação Computacional: Análise de Uma Célula De Manufatura em Lotes do Setor de Auto-Peças**. 2003. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Engenharia de Itajubá. Itajubá, 2003.

GERLACH, Gustavo et al. **Proposta de melhoria de layout como fator para a otimização do processo produtivo organizacional**. *Revista de Administração da UFSM*, Santa Maria, v. 10, p. 41–55, 2017. Edição especial. DOI: 10.5902/1983465925157.

HARREL, Charles R.; GHOSH, Biman K.; BOWDEN, Royce. **Simulation Using ProModel**. McGraw-Hill, 2000.

LAW, A.; KELTON, D. **Simulation modeling and analysis**. New York, McGraw-Hill, 2000.

LAW Averill M. **How to conduct a successful simulation study**. Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference, 2003.

LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation Modeling and Analysis**. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2015.

LEAL, F.; OLIVEIRA, M.; ALMEIDA, D.; MONTEVECHI, J. **Desenvolvimento E Aplicação De Uma Técnica De Modelagem Conceitual De Processos Em Projetos De Simulação: O IDEF-SIM**. XXIX Encontro Nacional De Engenharia De Produção, 2009.

LEAL, L. K. B., et al. **Análise e modelagem computacional do processo de manufatura de fitas adesivas em uma empresa do Polo Industrial de Manaus: uma aplicação no software FlexSim®**. *Exacta*, v. 22, n. 1, p. 197-237, 2024.

LIMA, Alafan Jeferson da Costa; NOGUEIRA, Ricardo Jorge da Cunha Costa; OLIVEIRA, Marcelo Albuquerque de. **Mapeamento do fluxo de valor como proposta de melhoria no segmento de cerâmica vermelha**. *Revista Foco*, v. 17, n. 10, p. 1-20, 2024. DOI: 10.54751/revistafoco.v17n10-158.

MOITA, Márcia Helena Veleda; ALMEIDA, Ely Sena de. **Aplicação de simulação para obtenção de soluções ao tráfego em rotatória da cidade de Manaus**. *Universidade Federal do Amazonas (UFAM)*, Manaus, 2011. Submetido em 8 jul. 2011; revisado em 20 dez. 2011; aceito em 26 jan. 2012.

PEREIRA, I. C. **Proposta de sistematização da simulação para fabricação em lotes**. *Dissertação mestrado em engenharia de produção*. UNIFEI, Itajubá, MG, 2000.

PESSÔA, Mariana Patricia Cruz. **Proposta de melhoria no processo produtivo de uma indústria de confecção de médio porte com base em uma abordagem Lean**. 2014. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção Mecânica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

QUEIROZ, Jose A.; MIRANDA, Rafael C. XXXIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. 2013, Salvador. **Integração Da Simulação A Eventos Discretos Ao Value Stream Mapping: Uma Proposta Metodológica**. Salvador, BA, 17 p.

Rodrigues, T. V., Queiroz, L. M. S., Silva Junior, J. da, Sanjulião, L. K. A. F., & Oliveira, N. P. (2020). **Simulation layout proposal in a Brazilian textile industry**. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 6(5), 10-23.

ROTHER, Mike; SHOOK, John. **Learning to see: value stream mapping to create value and eliminate muda**. Brookline: The Lean Enterprise Institute, 1999. Versão 1.2.

Sagayama, J. L., Mattos, C. A., Chang Junior, J., Ribeiro, A. C. B., & Fernandes, A. M. S. (2018). **Cadeia de valor de um hospital: Propostas de melhorias e avaliação por intermédio da simulação a evento discreto e avaliação econômica.** *Anais do Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP)*.

SAMPAIO, P. G. V.; OLIVEIRA, S. D. (2013). **Estudo de modelagem e simulação de filas num supermercado associado à análise de cenários.** In: XXXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Salvador, BA, Brasil.

Santos Junior, F. A. F. (2016). **Modelagem, análise e experimentação de sistema fotovoltaico isolado baseado em plataforma de simulação com diagrama de blocos** (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, PB, Brasil.

SHANNON R. E., **Introduction to the art and science of simulation.** Proceedings of the Winter Simulation Conference, 1998.

SILVA, Wesley A. **Otimização de parâmetros da gestão baseada em atividades aplicada em uma célula de manufatura.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Itajubá, 2005.

STERMAN, J. D. **Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World.** Irwin McGraw-Hill, 2000.

STRACK, Jair. **GPSS: modelagem e simulação de sistemas.** Rio de Janeiro: LTC, 1984.

TORGA, Bruno Lopes Mendes. **Modelagem, Simulação e Otimização em Sistemas Puxados de Manufatura.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

ANEXO A - TERMO DE AUTENTICIDADE



UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA

Termo de Declaração de Autenticidade de Autoria

Declaro, sob as penas da lei e para os devidos fins, junto à Universidade Federal de Juiz de Fora, que meu Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia de Produção é original, de minha única e exclusiva autoria. E não se trata de cópia integral ou parcial de textos e trabalhos de autoria de outrem, seja em formato de papel, eletrônico, digital, áudio-visual ou qualquer outro meio.

Declaro ainda ter total conhecimento e compreensão do que é considerado plágio, não apenas a cópia integral do trabalho, mas também de parte dele, inclusive de artigos e/ou parágrafos, sem citação do autor ou de sua fonte.

Declaro, por fim, ter total conhecimento e compreensão das punições decorrentes da prática de plágio, através das sanções civis previstas na lei do direito autoral¹ e criminais previstas no Código Penal², além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, 18 de Agosto de 20 25.

Gabriel Alejandro de Araújo Soriano

201849036

NOME LEGÍVEL DO ALUNO (A)

Matrícula

158.711.077-61

ASSINATURA

CPF

¹ LEI N° 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998. Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.

² Art. 184. Violar direitos de autor e os que lhe são conexos: Pena - detenção, de 3 (três) meses a 1 (um) ano, ou multa.