

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

NÍCOLAS PEREIRA LOPES DA SILVA

**AVALIAÇÃO DE MELHORIAS EM UMA LINHA PRODUTIVA: UMA ABORDAGEM
BASEADA EM MODELAGEM E SIMULAÇÃO**

POÇOS DE CALDAS-MG

2025

NÍCOLAS PEREIRA LOPES DA SILVA

**AVALIAÇÃO DE MELHORIAS EM UMA LINHA PRODUTIVA: UMA ABORDAGEM
BASEADA EM MODELAGEM E SIMULAÇÃO**

Produto de Conclusão PIEPEX (PCP) apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Graduação no curso de Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal de Alfenas.

Área de concentração: engenharias.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique dos Santos

POÇOS DE CALDAS-MG

2025

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Silva, Nicolas Pereira Lopus da.

Avaliação de melhorias em uma linha produtiva: uma abordagem baseada em Modelagem e Simulação / Nicolas Pereira Lopus da Silva. - Poços de Caldas, MG, 2025.

61 f. : il. -

Orientador(a): Carlos Henrique dos Santos.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2025.

Bibliografia.

1. Simulação a eventos discretos. 2. Melhoria de processos. 3. Lean manufacturing. 4. Indústria de autopeças. 5. Flexsim. I. Santos, Carlos Henrique dos, orient. II. Título.

NÍCOLAS PEREIRA LOPES DA SILVA

**AVALIAÇÃO DE MELHORIAS EM UMA LINHA PRODUTIVA: UMA ABORDAGEM
BASEADA EM MODELAGEM E SIMULAÇÃO**

O Presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação do Produto de Conclusão PIEPEX (PCP) apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Graduação no curso de Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: engenharias.

Aprovado em: 19 de novembro de 2025.

Prof. Dr. Carlos Henrique dos Santos (Orientador e Presidente da banca)
Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dr. Fabio Ferraço (Avaliador)
Universidade Federal de Alfenas

Prof.a Dra. Julia Barros dos Santos (Avaliadora)
Universidade Federal de Alfenas

Dedico este trabalho ao meu irmão, a quem desejo inspirar a trilhar seus próprios caminhos e conquistas. Dedico também à minha mãe, pelo apoio incondicional e por sempre acreditar no meu potencial ao longo desta trajetória. Estendo ainda minha dedicatória ao meu orientador, Carlos Henrique, cuja orientação excepcional e dedicação foram fundamentais para a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me concedido saúde, coragem e perseverança para enfrentar os desafios desta caminhada. À minha família, pelo apoio constante, pela presença incondicional e pelo incentivo diário, fundamentais para a concretização desta conquista. À minha namorada, pela parceria, compreensão e presença em toda a trajetória, oferecendo apoio essencial nos momentos de maior desafio. Aos amigos, que estiveram ao meu lado compartilhando palavras de incentivo e proporcionando momentos de leveza em meio às dificuldades. Por fim, agradeço de forma especial ao meu orientador, Professor Carlos Henrique, cuja orientação dedicada, disponibilidade e competência foram essenciais para o desenvolvimento e aprimoramento deste trabalho.

"A melhor forma de prever o futuro é criá-lo."

(Peter Drucker)

RESUMO

A busca contínua por eficiência e redução de desperdícios é um pilar central na indústria moderna. Neste contexto, a Simulação a Eventos Discretos (SED) destaca-se como uma ferramenta poderosa para analisar, representar e otimizar sistemas produtivos complexos, permitindo a avaliação de cenários de melhoria antes de sua implementação real. Este trabalho teve como objetivo geral avaliar melhorias e otimizar um processo de manufatura em uma indústria de autopeças, utilizando a SED com o software Flexsim® e aplicando os princípios do *Lean Manufacturing* para nortear as ações. A pesquisa, caracterizada como um estudo de caso na empresa Luxparts, foca em uma célula produtiva responsável pela pré-montagem, solda e embalagem. A metodologia adotada segue as fases de Concepção, Implementação e Análise. Após as etapas iniciais que contemplam coleta de dados e informações dos processos, o modelo computacional 3D foi construído no FlexSim®, representando fielmente a lógica operacional, os recursos (operadores, máquinas) e o turno de trabalho. Primeiramente foi avaliado o cenário atual, onde foram evidenciadas ineficiências como gargalos nos processos, elevado percentual de ociosidade dos operadores, baixa utilização de recursos e acúmulo de estoque intermediário. A partir do estado atual, novos cenários foram testados, com mudanças na multifuncionalidade dos operadores, ajuste no fluxo de abastecimento das linhas e redefinição das configurações de estoques. Com base nos resultados, destaca-se os principais ganhos: aumento da produtividade diária de 1.650 para 2.300 unidades (crescimento de 39%) e redução acumulada dos estoques intermediários em até 56%. Essas melhorias evidenciaram ganhos em eficiência operacional e aderência aos princípios do *Lean Manufacturing*.

Palavras-chave: simulação a eventos discretos; melhoria de processos; *lean manufacturing*; indústria de autopeças; Flexsim®.

ABSTRACT

The continuous pursuit of efficiency and waste reduction is central to modern industry. In this context, Discrete Event Simulation (DES) stands out as a powerful tool for analyzing, modeling, and optimizing complex production systems, allowing the evaluation of improvement scenarios before real implementation. This study aims to assess improvements and optimize a manufacturing process in an auto parts industry, using DES with Flexsim® software and Lean Manufacturing principles. This case study was conducted at Luxparts, focusing on a production cell responsible for pre-assembly, welding, and packaging. The methodology involved the phases of conception, implementation, and analysis. After collecting process data, a 3D computational model was built in FlexSim®, accurately representing the operational logic, resources (operators, machines), and work shifts. Initially, the current scenario was evaluated and inefficiencies such as process bottlenecks, high operator idleness, low resource utilization, and the accumulation of intermediate inventory were found. From this baseline, new scenarios were tested, introducing operator multifunctionality, improvements to the line supply flow, and inventory reconfiguration. The results revealed significant gains: daily productivity increased from 1,650 to 2,300 units (a 39% rise) and intermediate inventories were reduced by up to 56%. These improvements demonstrate significant gains in operational efficiency and adherence to Lean Manufacturing principles.

Keywords: discrete event simulation; process improvement; lean manufacturing; auto parts industry; Flexsim®.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Planta baixa da empresa Luxparts.....	22
Figura 2 - Procedimento para condução de projetos de simulação.....	24
Figura 3 - Elementos e Símbolos do IDEF-SIM.....	26
Figura 4 - IDEF-SIM	28
Figura 5 - Distribuição associada a etapa de pré-montagem	31
Figura 6 - Distribuição associada a etapa de solda.....	32
Figura 7 - Distribuição associada a etapa de embalagem.....	33
Figura 8 - Modelo Computacional	35
Figura 9 - Comparativo: Real vs Biblioteca gráfica vs Flexsim.....	36
Figura 10 - Propriedades da programação.....	37
Figura 11 - Tabela de turnos	38
Figura 12 - Lógica de chegada das matérias-primas	38
Figura 13 - Processor.....	39
Figura 14 - Queue	39
Figura 15 - Source.....	40
Figura 16 - Operator.....	41
Figura 17 - Modelo computacional completo.....	41
Figura 18 - Produção real vs Produção do modelo	43
Figura 19 - Capacidade produtiva no estado atual.....	44
Figura 20 - Dashboard do estado atual	45
Figura 21 - Dispatcher.....	48
Figura 22 - Dashboard do cenário multioperador	49
Figura 23 - Capacidade produtiva do cenário multioperador.....	51
Figura 24 - Dashboard do cenário estoques iniciais.....	52
Figura 25 - Capacidade produtiva do cenário estoques iniciais	53
Figura 26 - Dashboard do cenário chegada de caixas	54
Figura 27 - Capacidade produtiva do cenário chegada de caixas.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tempos e distribuições associadas.....	34
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SED	Simulação a Eventos Discretos
DES	<i>Discrete Event Simulation</i>
PA	Produto Acabado
PI	Produto Intermediário
TC	Tempo de Ciclo
IDEF-SIM	<i>Integration Definition for Function Modeling</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	14
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 SIMULAÇÃO A EVENTOS DISCRETOS (SED)	15
2.4 SED COMO APOIO AO <i>LEAN</i>	19
3 MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1 OBJETO DE ESTUDO.....	21
4 APLICAÇÃO	25
4.1.2. CONSTRUÇÃO DO MODELO CONCEITUAL	26
4.1.4. DOCUMENTAÇÃO DO MODELO CONCEITUAL	30
4.2. MODELAGEM COMPUTACIONAL/ IMPLEMENTAÇÃO	34
4.2.2. VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL	42
4.3.1 DESCRIÇÃO DO ESTADO ATUAL	44
4.3.2 EXECUÇÃO DE EXPERIMENTOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS	47
4.3.2.1. Cenário 1- operador multifuncional	47
4.3.2.2. Cenário 2 – estoques iniciais	51
5. DISCUSSÕES FINAIS E CONCLUSÕES	56
REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

A busca por melhoria operacional é uma preocupação constante para empresas de todos os setores no mundo todo. Melhorar processos, ganhar eficiência e reduzir desperdícios são metas que estão sempre no radar dos gestores (Slack; Chambes; Johnston, 2008). No entanto, alcançar esses objetivos não é tarefa simples, uma vez que os sistemas operacionais costumam ser complexos, repletos de variáveis interdependentes, e inseridos em ambientes dinâmicos, onde mudanças, incertezas e variações acontecem o tempo todo. Como apontam Sakurada e Miyake (2009), essas características tornam os processos difíceis de prever e gerenciar usando apenas métodos tradicionais de análise. É justamente neste contexto que ferramentas de apoio, como a Simulação a Eventos Discretos (SED), ganham destaque, ajudando a entender o sistema como um todo e a identificar oportunidades reais de melhoria antes que mudanças sejam implementadas no mundo real (Law, 2007).

A SED é uma ferramenta poderosa para representar e analisar sistemas complexos, permitindo estudar seu comportamento e desempenho sem a necessidade de intervir diretamente nas operações reais. Em termos simples, trata-se de criar modelos computacionais que reproduzem, de forma simplificada, os principais processos e eventos que ocorrem no mundo físico (Kelton, Sadowski & Zupick, 2010). Segundo Chwif e Medina (2015), a simulação é essencial para entender sistemas cujos processos envolvem incertezas, interdependências e variabilidade, características frequentemente presentes em operações industriais, logísticas e de serviços.

Banks et al. (2010) reforça que a SED é amplamente usada em diversos setores justamente porque possibilita testar cenários, antecipar problemas e avaliar estratégias sem gerar custos reais ou riscos operacionais. Sakurada e Miyake (2009) destacam que sua principal contribuição está na capacidade de identificar gargalos, melhorar fluxos e apoiar decisões gerenciais com base em evidências sólidas.

Dessa forma, a SED não apenas apoia a tomada de decisão, mas também promove um entendimento mais profundo dos sistemas estudados, facilitando a construção de soluções robustas e eficazes. Pretendeu-se com o seguinte trabalho explorar os conceitos, aplicações e impactos da SED, demonstrando como sua

aplicação pode gerar melhorias significativas no desempenho de processos organizacionais.

Além disso, destaca-se o importante papel da SED para apoiar a implementação de práticas do *Lean Manufacturing* conforme apontado por Baril et al. (2016). O *Lean*, também conhecido como Manufatura Enxuta, se baseia na redução dos desperdícios e otimização dos processos segundo Womack, Jones e Roos (1990). Neste contexto, a literatura destaca que a SED permite testar os impactos de soluções *Lean* antes de sua aplicação prática, além de servir como um recurso de treinamento sobre a filosofia e incentivar o engajamento da equipe na proposição de melhorias para o sistema.

Alguns exemplos de uso da SED para apoio aos conceitos *Lean* são apresentados em Souza et al. (2018), Maciel et al. (2024) e Robinson et al. (2012).

Este trabalho aborda a análise da utilização da SED em uma empresa do ramo de autopeças localizada no sul de Minas Gerais. A aplicação do recurso em questão, se deu em uma célula de produção específica, responsável pela pré-montagem, solda e embalagem de uma das linhas de produtos desta empresa.

O presente trabalho avalia cenários em busca de melhorias a partir do uso da SED. Além disso, conta-se com a filosofia *Lean* como apoio essencial na redução dos desperdícios dentro de uma linha produtiva, guiando os cenários que foram testados via SED. Neste caso, são exemplificadas as propostas sugeridas. Sendo assim, destacam-se os objetivos geral e específicos do trabalho, tal como apresentado nas seções seguintes.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi propor melhorias e otimizar um processo de manufatura por meio da adoção da SED utilizando o *software* Flexsim. Além disso, foram adotados os princípios do *Lean* para nortear as ações, destacando os principais desafios e os resultados obtidos. Destacam-se também os seguintes objetivos específicos:

- a) Modelar e validar o cenário atual;
- b) Avaliar a existência de desperdícios e oportunidades de melhoria no cenário atual;
- c) Propor melhorias por meio de cenários;

d) Avaliar resultados quanto aos impactos causados e sua viabilidade.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho é composto por cinco capítulos. O primeiro capítulo aborda uma introdução ao tema, adentrando o seu contexto e explorando seus objetivos gerais e específicos. O segundo capítulo, traz o referencial teórico, apresentando a SED, bem como este recurso dá apoio ao *Lean*. Já o terceiro capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados, além de descrever o objeto de estudo, para que no quarto capítulo, seja demonstrado a aplicação da abordagem proposta e discussão dos resultados. Por fim, o quinto capítulo traz as conclusões acerca do que foi desenvolvido e complementa com possíveis sugestões e discussões finais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 SIMULAÇÃO A EVENTOS DISCRETOS (SED)

A simulação é uma técnica que permite representar, por meio de modelos computacionais ou matemáticos, o comportamento de sistemas reais ao longo do tempo. Trata-se de uma ferramenta poderosa na análise e no apoio à tomada de decisões, principalmente em contextos complexos ou incertos, nos quais a experimentação direta seria inviável, onerosa ou arriscada (Banks et al., 2010).

Em essência, simular é criar um ambiente controlado no qual se possa observar e testar o desempenho de um sistema diante de diferentes condições operacionais, sem a necessidade de interromper o processo real. Isso permite identificar gargalos, avaliar alternativas de melhoria, prever impactos de mudanças e, conseqüentemente, reduzir custos e riscos associados à implementação de soluções no ambiente físico (Law; Kelton, 2007).

Neste cenário, Uriarte, Ng e Moris (2018) mostram que a Simulação a Eventos Discretos (SED) é a abordagem mais utilizada para apoio à tomada de decisões em sistemas nos quais o estado muda em pontos específicos no tempo, geralmente como resultado da ocorrência de eventos. Exemplos típicos incluem processos industriais, linhas de produção, sistemas logísticos, filas de atendimento e operações hospitalares, conforme apontam Tako e Robinson (2010).

Dessa forma, existem muitos exemplos onde a SED é aplicada em diversas áreas e em múltiplos níveis de decisão, indo desde o nível operacional até as instâncias estratégicas da gestão (Jahangirian et al., 2010).

2.2 ETAPAS SED

Quando se trata da execução de projetos com o uso da SED, a literatura apresenta uma variedade de métodos disponíveis (Montevechi et al., 2015). Segundo Banks et al. (2010), há etapas recorrentes que costumam ser adotadas em diferentes estudos que utilizam essa abordagem, sendo elas:

I. **Formulação do problema:** Esta é a etapa inicial no desenvolvimento de projetos de simulação, na qual é fundamental assegurar uma definição clara e precisa do problema antes de avançar para as fases subsequentes. Balci (2012) destaca a importância da chamada "credibilidade da formulação do problema", que se refere ao grau de rigor e precisão na definição do problema a ser tratado;

II. **Definição dos objetivos e planejamento geral:** Os objetivos estabelecem as questões que a simulação busca responder. Em relação ao planejamento, é necessário estimar os recursos exigidos para a execução do projeto (Banks et al., 2010). Law (2009) enfatiza que um modelo de simulação deve ser desenvolvido com base em um conjunto específico de objetivos, pois um modelo válido para um objetivo pode não ser adequado para outro;

III. **Modelagem conceitual:** Trata-se da primeira representação do problema, sendo uma etapa crucial no projeto de simulação, onde se abstrai o processo real em um modelo conceitual. Existem diversos métodos e ferramentas para essa representação (ROBINSON, 2008);

IV. **Coleta de dados:** Esta fase envolve a identificação e obtenção dos dados necessários para a simulação, estreitamente ligada ao modelo conceitual. A identificação de dados consiste em determinar quais conjuntos de dados e suas características desejadas (como precisão e formato) são necessários. Já a coleta refere-se ao processo de obtenção desses dados (Ongoo e Hill, 2014);

V. **Modelagem computacional:** Diz respeito à transformação do modelo conceitual em um modelo computacional, utilizando linguagens de simulação ou *softwares* específicos. O mercado é dominado por simuladores que estão cada vez mais customizados para áreas específicas, como manufatura, engenharia e serviços (Chwif; Medina, 2015);

VI. **Verificação do modelo:** Conforme Sargent (2013), essa etapa assegura que a implementação do modelo computacional está correta e livre de erros de programação;

VII. **Validação do modelo:** Considerando que os modelos de simulação são frequentemente usados para apoiar decisões de impacto, é essencial garantir a validade e a precisão dos resultados. Sargent (2014) explica que a validação assegura que o modelo produza resultados suficientemente corretos para a aplicação proposta. Diversas técnicas qualitativas e quantitativas, objetivas e subjetivas, podem ser empregadas, dependendo do contexto e da equipe do projeto (Chwif; Medina, 2015; Sargent; Goldsman; Yaacoub, 2016);

VIII. **Definição de experimentos:** Balci (2012) define essa fase como o planejamento detalhado da execução da simulação, visando obter respostas específicas. O planejamento deve considerar as inferências desejadas e os custos estimados para a realização dos experimentos;

IX. **Simulação de cenários e análise:** Esta etapa consiste na execução dos experimentos planejados e na análise dos indicadores de desempenho do sistema simulado, que servem de base para a tomada de decisões (Banks et al., 2010);

X. **Documentação do projeto:** A documentação adequada do projeto em diferentes níveis é fundamental para garantir a comunicação e o aprendizado ao longo do desenvolvimento. Além disso, é essencial para avaliar a qualidade, manutenção, reutilização e reprodução do modelo e de seus resultados (Oscarson; Moris, 2002; Triebig; Klügl, 2009);

XI. **Implementação:** Refere-se à fase em que as decisões são tomadas com base nos resultados da simulação. Segundo Banks et al. (2010), o êxito nesta etapa está diretamente relacionado à qualidade das etapas anteriores.

2.3 VANTAGENS DA SED

Rodič (2017) destaca que a SED está consolidada tanto na prática quanto na pesquisa científica, tendo evoluído significativamente ao longo dos anos. Entre os benefícios da ferramenta, Greasley e Owen (2016) ressaltam sua capacidade de investigar o comportamento de sistemas complexos, possibilitando um melhor entendimento por meio do suporte computacional e da realização de experimentos. Banks et al. (2010) complementam que a SED permite aos tomadores de decisão analisar de forma segura e confiável procedimentos, regras e fluxos de sistemas reais, além de testar modificações estruturais sem comprometer recursos. A ferramenta também possibilita experimentar alterações em layouts e sistemas de transporte, compreender fenômenos que impactam o sistema, avaliar interações e hipóteses, além de realizar análises flexíveis relacionadas à percepção do tempo, ajustando a velocidade operacional do sistema simulado (Banks et al., 2010; Sharma, 2015).

Outro ponto positivo da SED é o seu aspecto gráfico e visual, que, segundo Robinson et al. (2014), promove maior engajamento dos participantes, especialmente em problemas complexos ou mal definidos, facilitando a implementação de melhorias. Turner et al. (2016) reforçam que quanto maior o realismo dos modelos, maior a compreensão dos envolvidos e a qualidade da análise. Eles também destacam a integração da simulação com tecnologias emergentes, como a Realidade Virtual, que, por meio de escaneamento 3D e sensores, proporciona imersão e manipulação interativa dos modelos, alinhando-se às demandas da indústria moderna.

Além disso, a SED apresenta grande potencial em ensino e treinamento, conforme apontam Baril et al. (2016) e Opacic e Sowlati (2016). Monks, Robinson e Kotiadis (2014) afirmam que a simulação como ferramenta de apoio a experimentações contribui para a aprendizagem e a compreensão dos envolvidos, promovendo soluções mais eficazes. A reutilização de modelos em projetos com tempo limitado é ainda uma estratégia que favorece o aprendizado e a análise futura (Monks; Robinson; Kotiadis, 2014; Gogi; Tako; Robinson, 2016).

Quanto à integração com outras ferramentas, April et al. (2014) destacam que a SED se sobressai em situações complexas, devido à sua capacidade de combinar-

se com métodos de otimização, tornando-se uma alternativa robusta para análises complexas. Prajapat e Tiwari (2017) apontam o uso crescente de inteligência artificial em conjunto com a simulação, enquanto Reséndiz et al. (2018) reforçam que essa combinação tem sido fundamental para o desenvolvimento e a robustez da SED como ferramenta de apoio à decisão.

2.4 SED COMO APOIO AO *LEAN*

No contexto da engenharia de produção, a simulação tem sido amplamente empregada como ferramenta de apoio à melhoria contínua. Entre suas aplicações destacam-se: a análise de capacidade produtiva, a identificação de gargalos, o balanceamento de linhas, o dimensionamento de recursos e a avaliação de cenários de investimento (Santos; Martins, 2018).

Sendo assim, destaca-se a compatibilidade da simulação com os princípios do *Lean*, que tem como foco a eliminação de desperdícios e a otimização dos fluxos, buscando melhorar a eficiência dos processos e sistemas (Ohno, 1997). Segundo Hines e Taylor (2000), as atividades de um sistema podem ser classificadas em três categorias: (1) aquelas que agregam valor, (2) as que não agregam valor, mas são necessárias, e (3) as que não agregam valor e são desnecessárias. Os autores enfatizam a importância de minimizar as atividades da segunda categoria e eliminar sempre que possível as da terceira, pois ambas configuram desperdícios.

Nesse sentido, o *Lean* norteia a identificação de sete tipos principais de desperdício:

(i) Superprodução, que ocorre ao produzir além da demanda ou antecipadamente;

(ii) Estoques excessivos, incluindo matérias-primas, produtos em processo e acabados;

(iii) Esperas, que representam períodos sem agregação de valor devido a ociosidade ou formação de filas;

(iv) Transporte desnecessário de materiais ou produtos;

(v) Movimentação excessiva de pessoas que não agrega valor ao processo;

(vi) Processamento desnecessário, caracterizado por etapas ineficientes ou supérfluas;

(vii) Produção de itens defeituosos, que geram retrabalhos, reparos ou descartes, acarretando custos adicionais.

Um exemplo prático da aplicação da SED no apoio ao pensamento *Lean* é o trabalho "SIMLEAN", desenvolvido por Robinson et al. (2012). Este estudo ilustra como a SED permite testar e avaliar diversas melhorias antes de sua efetiva implementação em um ambiente real. Aplicado em uma clínica, o método contribuiu significativamente para a reorganização de processos e a otimização do atendimento. Os autores integraram a simulação com eventos *Kaizen*, atuando em três eixos principais: educação, facilitação e avaliação.

Já, no caso visto em Maciel et al. (2024), a SED foi utilizada como ferramenta de apoio ao balanceamento de uma linha de montagem no setor automotivo. Por meio do desenvolvimento de um modelo no *software* ProModel®, foi possível analisar cenários, identificar gargalos e propor melhorias na distribuição de tarefas e *layout*. A validação do modelo com dados reais demonstrou sua precisão, e as alterações sugeridas resultaram em maior eficiência operacional e melhor uso dos recursos. Assim, a SED mostrou-se eficaz para otimizar processos e apoiar decisões gerenciais em ambientes industriais.

Por fim, no trabalho de Souza et al. (2018), utilizou-se a SED como ferramenta de apoio à implementação de conceitos da Produção Enxuta em uma linha de montagem de fornos industriais. Com o uso do *software* ProModel®, foi possível testar melhorias no fluxo produtivo antes de sua aplicação real, permitindo a redução de desperdícios e o aumento da eficiência. Os resultados incluíram um aumento de mais de 60% na capacidade produtiva e uma redução de cerca de 30% no *lead time*, evidenciando os ganhos da integração entre simulação e filosofia enxuta.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

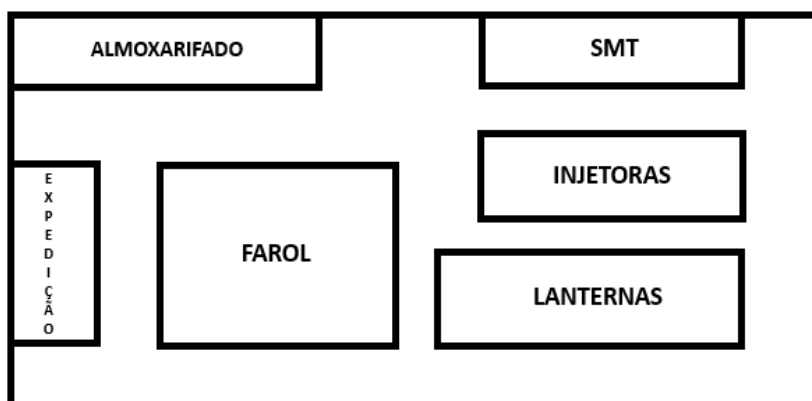
3.1 OBJETO DE ESTUDO

O presente trabalho teve como objeto de estudo a empresa Luxparts, situada no município de Poços de Caldas, localizado no sul do estado de Minas Gerais. A Luxparts faz parte do Grupo Pradolux-Luxparts, reconhecido nacionalmente no setor de iluminação e componentes automotivos. A escolha da empresa se deu em função de sua relevância no cenário industrial regional e por apresentar características adequadas para a aplicação de ferramentas de análise e melhoria de processos, especialmente por meio da SED.

Com uma cultura voltada para a inovação tecnológica e qualidade, a empresa busca constantemente aprimorar seus processos produtivos, adotando práticas de gestão enxuta (*Lean Manufacturing*) e automação industrial. Isso torna o ambiente produtivo propício à aplicação de ferramentas de modelagem, simulação e análise de desempenho, sendo ideal para estudos que visam identificar gargalos, propor melhorias e avaliar os impactos de mudanças operacionais antes de sua implementação prática.

A empresa possui uma estrutura industrial de médio porte, operando em um turno de produção e atendendo tanto ao mercado nacional quanto ao internacional. A unidade produtiva avaliada dispõe-se em algumas linhas de produção, atuando na fabricação de componentes elétricos e sistemas de iluminação para veículos automotores, como lanternas, faróis, chicotes elétricos, refletores e outros itens de reposição e linha original. A Figura 1 apresenta a representação esquemática da planta baixa da empresa, evidenciando a disposição dos ambientes produtivos e demais setores internos.

Figura 1 - Planta baixa da empresa Luxparts



Fonte: elaborado pelo próprio autor

A pesquisa foi conduzida com base na observação direta do processo produtivo de uma célula da linha chamada “608-TR”, pertencente ao setor de lanternas. Os dados coletados foram utilizados como base para a modelagem do sistema no *software* de simulação e para a construção dos cenários avaliados neste trabalho.

3.2 MÉTODO DE PESQUISA

A metodologia de pesquisa adotada neste estudo é baseada na Modelagem e Simulação por meio da SED, um método consolidado para alcançar os objetivos propostos. A literatura disponibiliza diversas abordagens para a condução de projetos de simulação. Dentre elas, elegeu-se o método proposto por Montevechi et al. (2010) devido à sua robustez e abrangência em etapas essenciais.

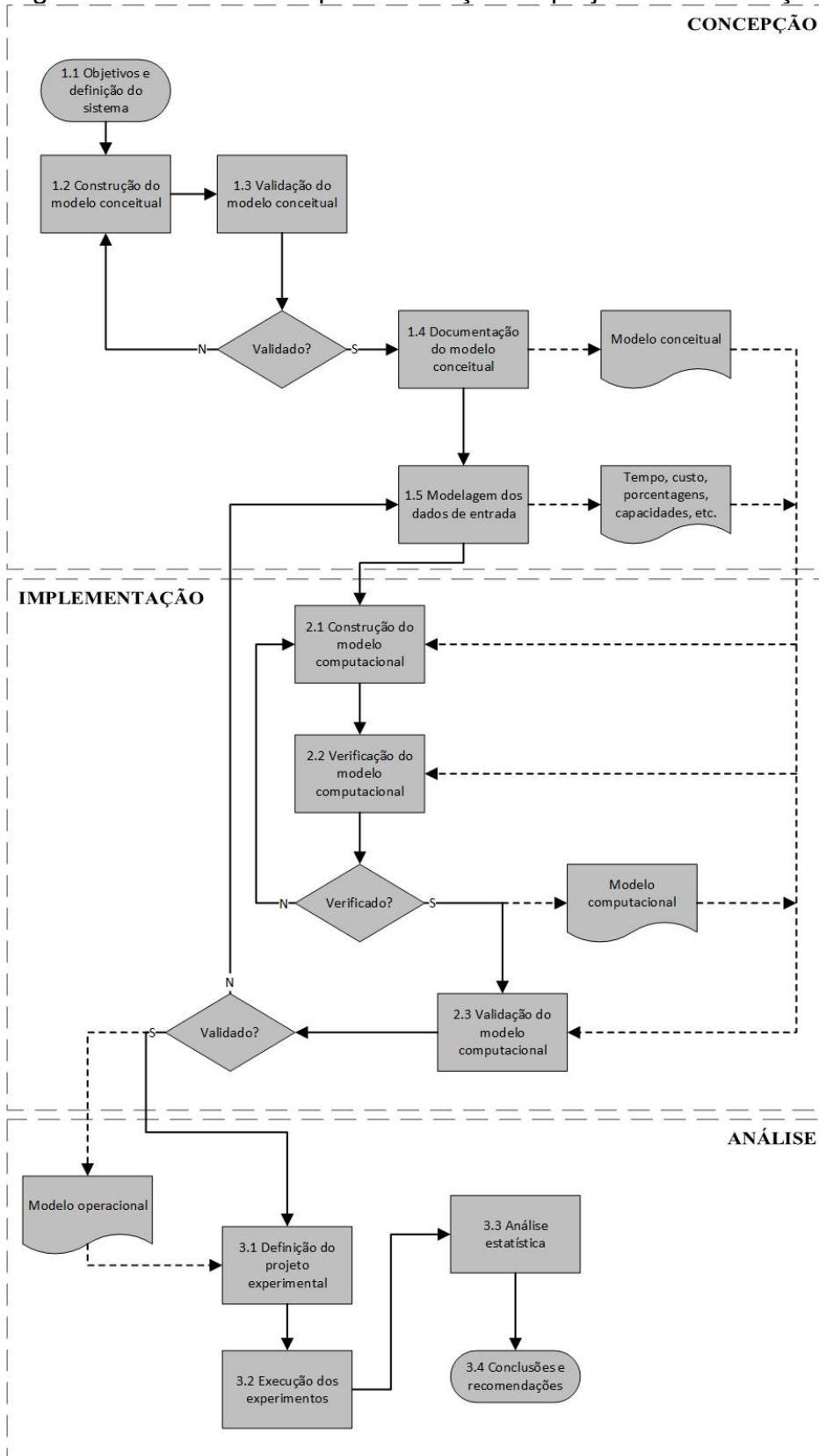
O método, conforme ilustrado na Figura 2, estrutura-se em três fases principais:

- **Concepção:** Esta fase inicial abrange a (1) definição dos objetivos e do sistema, a (2) construção do modelo conceitual e (3) validação do modelo conceitual, sua (4) documentação, e por fim, a (5) modelagem dos dados de entrada. O resultado desta fase é o Modelo Conceitual do objeto de estudo.
- **Implementação:** A segunda fase consiste na (6) construção do modelo computacional, seguida pela (7) verificação e (8) validação deste. As etapas de verificação e validação são cruciais para assegurar que o modelo computacional represente fielmente o sistema real. O desfecho desta fase é o Modelo Operacional, apto para futuros experimentos e análises.

- **Análise:** A fase final compreende a (9) definição do projeto experimental, (10) execução dos experimentos, (11) análise estatística, e culmina com as (12) conclusões e recomendações do estudo.

Este método detalhado guia as etapas da pesquisa, assegurando um desenvolvimento estruturado e confiável. As próximas seções foram estruturadas de acordo com cada etapa do método.

Figura 2 - Procedimento para condução de projetos de simulação



Fonte: Adaptado de Montevechi et al (2010)

4 APLICAÇÃO

4.1. MODELAGEM CONCEITUAL

Conforme representado na Figura 2 da Seção 3, a modelagem conceitual organiza-se em etapas interligadas. O processo inicia-se com a determinação dos objetivos e a delimitação do sistema, avançando para a construção do modelo conceitual, sua validação e documentação. A última etapa consiste na modelagem dos dados de entrada, fundamental para assegurar a confiabilidade dos experimentos subsequentes.

4.1.1. OBJETIVO E DEFINIÇÃO DO SISTEMA

Considerando os objetivos definidos anteriormente, este tópico detalha a definição do sistema e os parâmetros que orientam a modelagem. O objeto de estudo, conforme descrito na Seção 3, consiste em um processo de linha de montagem. Sendo assim, foi possível identificar alguns desperdícios típicos apontados por Ohno (1997), como acúmulo de estoque intermediário e períodos de ociosidade dos operadores. Esses fatores justificam a escolha do objeto de estudo, pois otimizar as atividades envolvidas no processo permite aumentar a eficiência, aspecto essencial para a melhoria contínua da empresa. Dessa forma, o primeiro objetivo do modelo de simulação foi avaliar os desperdícios e as oportunidades de melhoria no cenário atual.

Além disso, a operação de montagem é gerida a partir de indicadores diários, os quais levam em consideração a disponibilidade, desempenho e qualidade conduzidas diariamente nas operações. Dessa forma, quanto mais produtos produzidos diariamente, melhor é o desempenho do processo produtivo do ponto de vista da gestão. Além disso, deve-se levar em consideração que nem sempre é possível manter o ritmo de produção, visto que as linhas produtivas podem variar seu ritmo de trabalho, podendo demandar apoio, bem como desabastecer a distribuição.





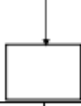

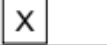
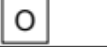

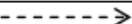
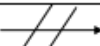


Portanto, o segundo objetivo do modelo de simulação é propor melhorias por meio de cenários e avaliar resultados quanto aos impactos causados e sua viabilidade. Para permitir o alcance dos objetivos previamente citados, foi construído um modelo de SED, o qual permitiu simular todos os cenários desejados em função das ideias. O

modelo de simulação precisava ser capaz de representar fielmente o modelo real, simular os possíveis cenários e fornecer os indicadores necessários para avaliação, levando em consideração os princípios do *Lean*.

4.1.2. CONSTRUÇÃO DO MODELO CONCEITUAL

Conforme ressaltam Chwif e Medina (2015), a abstração do processo real deve ser acompanhada da escolha de uma técnica apropriada para a representação de modelos de simulação. Nesse sentido, Banks e Chwif (2010) já destacavam benefícios relevantes da construção de um modelo conceitual, como a possibilidade de interação e validação junto aos responsáveis pelo processo desde as fases iniciais do projeto, a maior facilidade de realizar ajustes no modelo conceitual em comparação ao modelo computacional, a documentação estruturada do modelo, além de permitir uma estimativa mais precisa do tempo necessário para as etapas subsequentes de modelagem computacional e validação. No presente trabalho, a modelagem conceitual foi conduzida por meio da técnica IDEF-SIM, proposta por Leal (2008), que integra elementos lógicos utilizados em diferentes métodos de modelagem, adaptando-os ao contexto da simulação. Essa abordagem contribui para aproximar a modelagem conceitual das exigências da modelagem computacional, favorecendo a redução do tempo de execução do processo (Leal; Almeida; Montevechi, 2008). Os símbolos do IDEF-SIM são apresentados na figura 3 a seguir.

Figura 3 - Elementos e Símbolos do IDEF-SIM

Elementos	Simbologia
Entidade	
Funções	
Fluxo da entidade	
Recursos	
Controles	
Regras para fluxos paralelos e/ou alternativos	 Regra E
	 Regra OU
	 Regra E/OU
Movimentação	
Informação explicativa	
Fluxo de entrada no sistema modelado	
Ponto final do sistema	
Conexão com outra figura	

Fonte: Adaptado de Leal (2008)

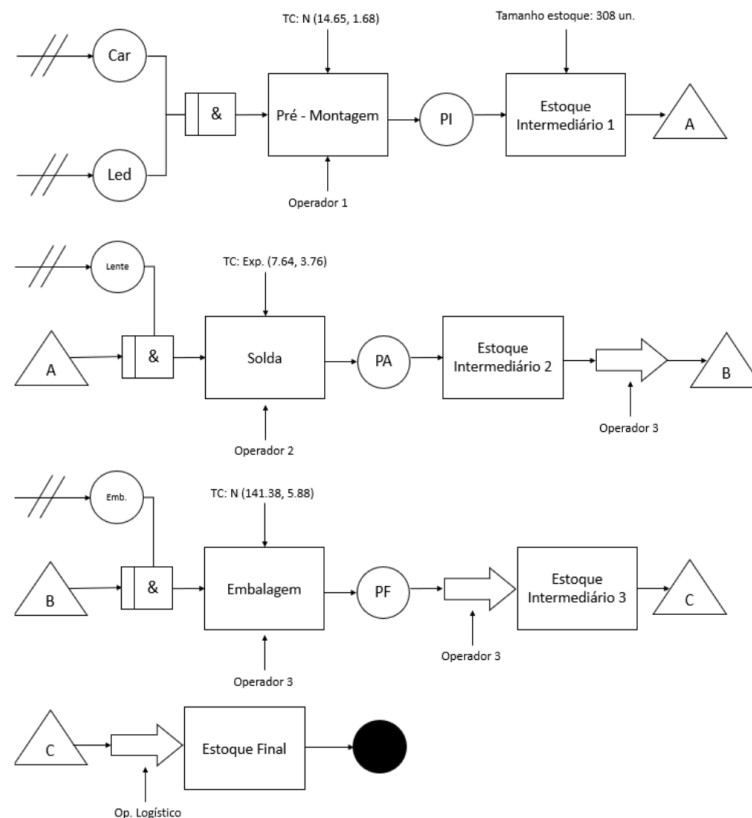
Abaixo, é fornecida uma descrição detalhada das funções de cada elemento.

- Entidade: representa o que será processado, como produtos, pessoas ou documentos. Aparece no modelo apenas quando é criada, indicando claramente onde será transformada.
- Funções: locais onde a entidade sofre alguma ação, como postos de trabalho, filas ou estoques, podendo alterar sua forma ou tempo no processo.
- Fluxo da entidade: mostra o caminho que a entidade percorre entre as funções.
- Recursos: pessoas ou equipamentos que movimentam ou operam sobre as entidades. Podem ser fixos ou móveis.
- Controles: regras que organizam o funcionamento das funções, como ordem de atendimento ou programação.
- Regras de fluxo paralelo/alternativo: definem como caminhos se conectam após uma função, podendo ser simultâneos (E), alternativos (OU) ou mistos (E/OU).
- Movimentação: deslocamento relevante da entidade, com tempo e recursos definidos.

- h) Informação explicativa: comentários inseridos para facilitar o entendimento do modelo.
- i) Fluxo de entrada: ponto onde as entidades são criadas ou entram no sistema.
- j) Ponto final: indica o encerramento de um caminho no modelo.
- k) Conexão entre figuras: permite dividir o modelo em partes distintas.

Visto isso, o modelo conceitual descreve a ordem das atividades que compõem o processo, indicando os responsáveis por cada uma delas, além das regras que estabelecem a lógica de funcionamento. Neste contexto, o modelo conceitual deste trabalho, ilustrado na figura 4, apresenta 3 funções principais, sendo elas: **pré-montagem, solda e embalagem**.

Figura 4 - IDEF-SIM



Fonte: elaborado pelo próprio autor

No início do processo foram considerados dois tipos de entidades para entrada no modelo, chamadas de **CAR** e **LED**, as quais são submetidas ao processo de **pré-montagem**. Neste processo, ocorre a junção da placa de LED na carcaça da lanterna. Esta atividade é realizada durante um tempo, denominado de **TC Pré-montagem** por um operador, aqui chamado de **Operador 1**.

Após esta etapa obtém-se uma nova entidade, chamada **PI**, que faz referência ao início da montagem do produto. Esta entidade é alocada num estoque (**estoque intermediário 1**) disposto na linha de produção com intuito de abastecer a próxima atividade.

Com a entrada da entidade denotada por **Lente**, uma nova função é vista, a **solda**. Neste passo, o **PI** é encaixado na lente e sua junção é efetivada através de uma solda ultrassom. A responsável por essa ação é a **operadora 2**, com base no tempo determinado **TC SOLDA**. Dessa função, temos como saída o **PA** que representa o produto com sua montagem completa, indo agora para a fase de acondicionamento.

O **PA**, é alocado em mais um estoque na linha de produção, este conhecido por **estoque intermediário 2**, que abastece a bancada de embalagem. Na função embalagem, uma nova entidade é vinculada ao processo, está conhecida como **EMB**, que se trata das caixas para embalagem do lote produzido. Para esta função, é designada a operadora 3 um tempo de ciclo **TC embalagem**. Um detalhe interessante a ser apontado nesta operação é que cada unidade de produto é embalada individualmente e ao acumular 10 unidades, compõe-se um lote. Lote este que agora é embalado e transportado pela **operadora 3** para o estoque **intermediário 3**.

Assim, finalizadas as operações das 3 principais estações da linha de produção, um **operador logístico** é responsável pela coleta dos lotes produzidos e encaminhamento ao **estoque final**. Vale ressaltar que esta parte da operação entra em caráter de representação, não cabendo análise dos possíveis cenários de melhoria.

4.1.3. VALIDAÇÃO DO MODELO CONCEITUAL

Segundo Sargent (2013), a validação do modelo conceitual tem como propósito verificar se as teorias e inferências utilizadas estão corretas e se a estrutura apresentada é lógica e coerente em relação ao objetivo definido para o modelo. A comparação do modelo conceitual com o sistema real permite avaliar aspectos como o grau de detalhamento e o escopo considerado (Chwif; Medina, 2015). Nesse cenário, Sargent (2013) descreve três técnicas de validação: **face-a-face**, que

consiste na apresentação do modelo a especialistas do processo para análise de sua representatividade frente à realidade; **passos estruturados**, nos quais o modelo é formalmente submetido à apreciação de um grupo de pares, que examinam sua consistência e validade; e **acompanhamento**, técnica fundamentada no rastreamento das entidades ao longo do modelo, de modo a verificar sua lógica e precisão.

Para este trabalho utilizou-se a técnica face-a-face, na qual após a finalização da montagem do modelo conceitual, o supervisor da linha foi acionado para análise da efetividade do fluxo de operação proposto, conferindo todos os tempos, operadores e funções associadas, além, do dimensionamento da chegada de todas as entradas do processo.

4.1.4. DOCUMENTAÇÃO DO MODELO CONCEITUAL

De acordo com Leal, Almeida e Montevechi (2008), a técnica IDEF-SIM aplicada ao mapeamento conceitual também desempenha um papel relevante na documentação do modelo, tornando-o mais compreensível. Nesse sentido, esta etapa foi conduzida após a definição de sua versão final, possibilitando o registro estruturado da lógica do modelo e oferecendo suporte às etapas subsequentes de construção, validação e verificação do modelo computacional.

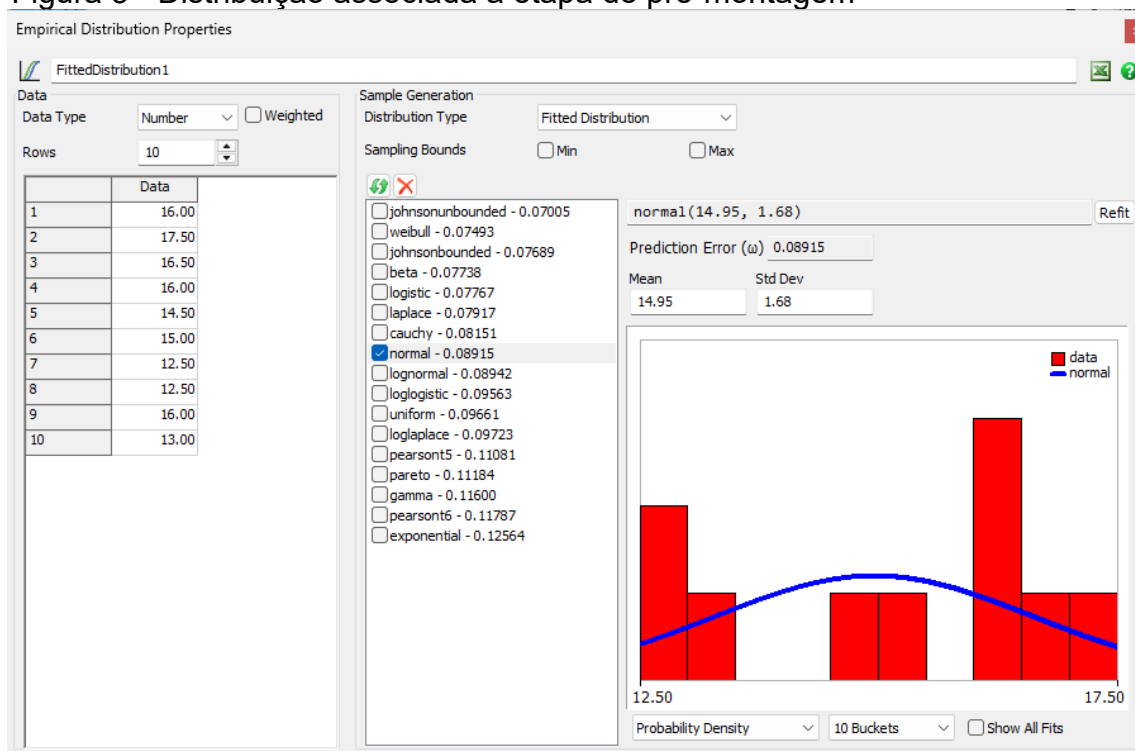
4.1.5 MODELAGEM DOS DADOS DE ENTRADA

De acordo com Chwif e Medina (2015), para simular sistemas que existem na realidade, é preciso levar em conta que a maioria é influenciada por eventos imprevisíveis (aleatórios), o que impede determinar com precisão o que acontecerá com esses sistemas ao longo do tempo. No entanto, os autores indicam que é possível projetar o comportamento provável desses sistemas com base em seu histórico de dados. Por isso, a correta representação do sistema real no modelo de simulação depende da modelagem adequada dos dados. Contudo, antes de iniciar o processo de modelagem, é fundamental estabelecer quais serão os três parâmetros de entrada que alimentarão o modelo. São eles os tempos **TC Pré-montagem**, **TC Embalagem** e **TC Solda**. Com isso, pôde-se dar início ao processo de modelagem de dados. Tal processo pode ser dividido em três etapas: **Coleta de dados**, **Tratamento de dados** e **Inferência** (Chwif e Medina, 2015).

Para a etapa de coleta de dados, foi conduzido um *Gemba Walk*, processo baseado no acompanhamento das operações *in loco*, aliado à realização de cronoanálises em cada etapa do processo em estudo. As observações foram realizadas em um único dia e horário, uma vez que a operação mantém constância ao longo da semana e não apresenta variações significativas que justificassem coletas em períodos distintos. Foram consideradas 10 observações para cada atividade que compõe o procedimento operacional padrão. Ressalta-se que foi analisada apenas uma operadora por atividade, visto que a execução é sempre realizada pela mesma colaboradora, não havendo, portanto, necessidade de observações adicionais com outros operadores. A partir desses registros, procedeu-se à análise e interpretação dos resultados obtidos, com o objetivo de estabelecer uma conexão consistente entre o cenário real e sua representação no ambiente computacional.

Na etapa de tratamento dos dados, empregou-se uma ferramenta disponível no *software* de simulação destinada à identificação da distribuição estatística que melhor representa os dados observados. Para tanto, as observações coletadas foram inseridas no recurso “*Fitted Distribution*”, a partir do qual foram gerados e analisados os resultados, apresentados nas figuras 5, 6 e 7.

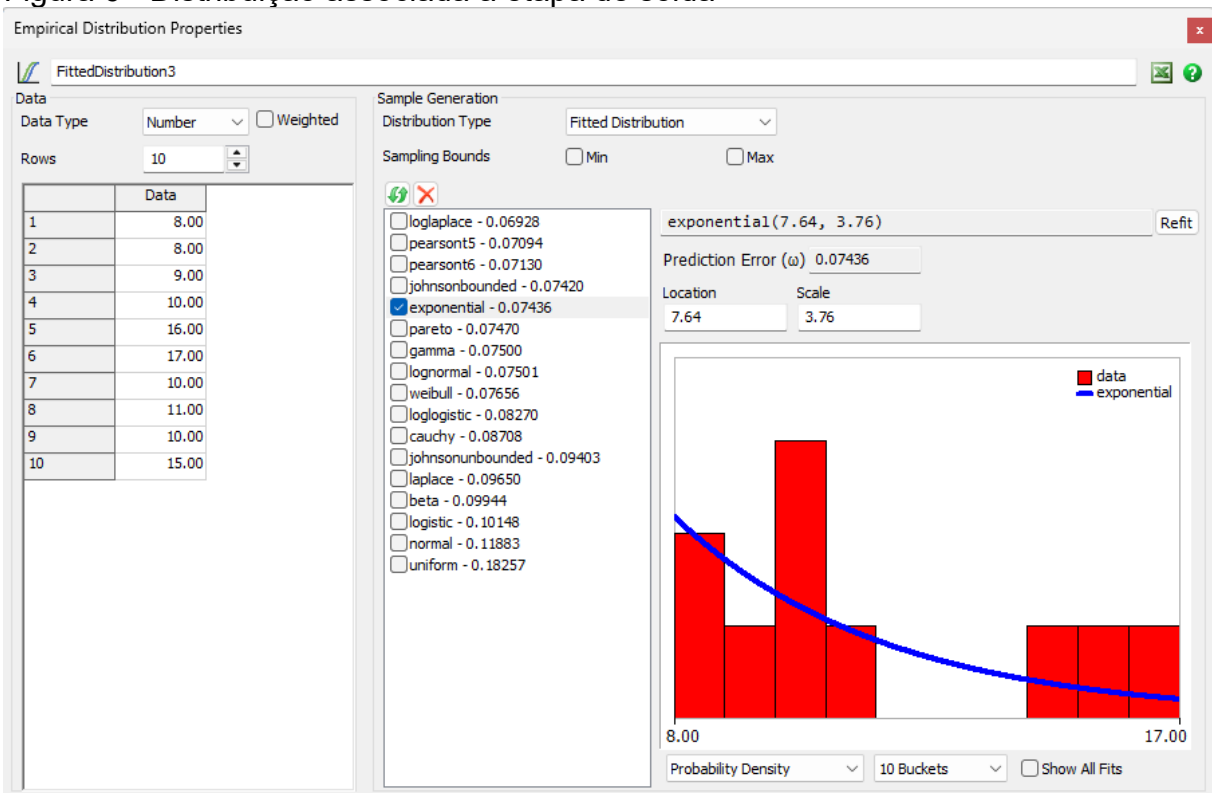
Figura 5 - Distribuição associada a etapa de pré-montagem



Fonte: elaborado pelo próprio autor

A Figura 5 apresenta o resultado obtido para o tempo de ciclo da etapa de pré-montagem. Observa-se que a distribuição normal foi selecionada para representar os dados coletados, uma vez que se trata de uma distribuição amplamente reconhecida na literatura e apresentou erro em torno de 0,02 em relação a primeira distribuição listada, valor considerado desprezível para fins de modelagem estocástica de processos industriais.

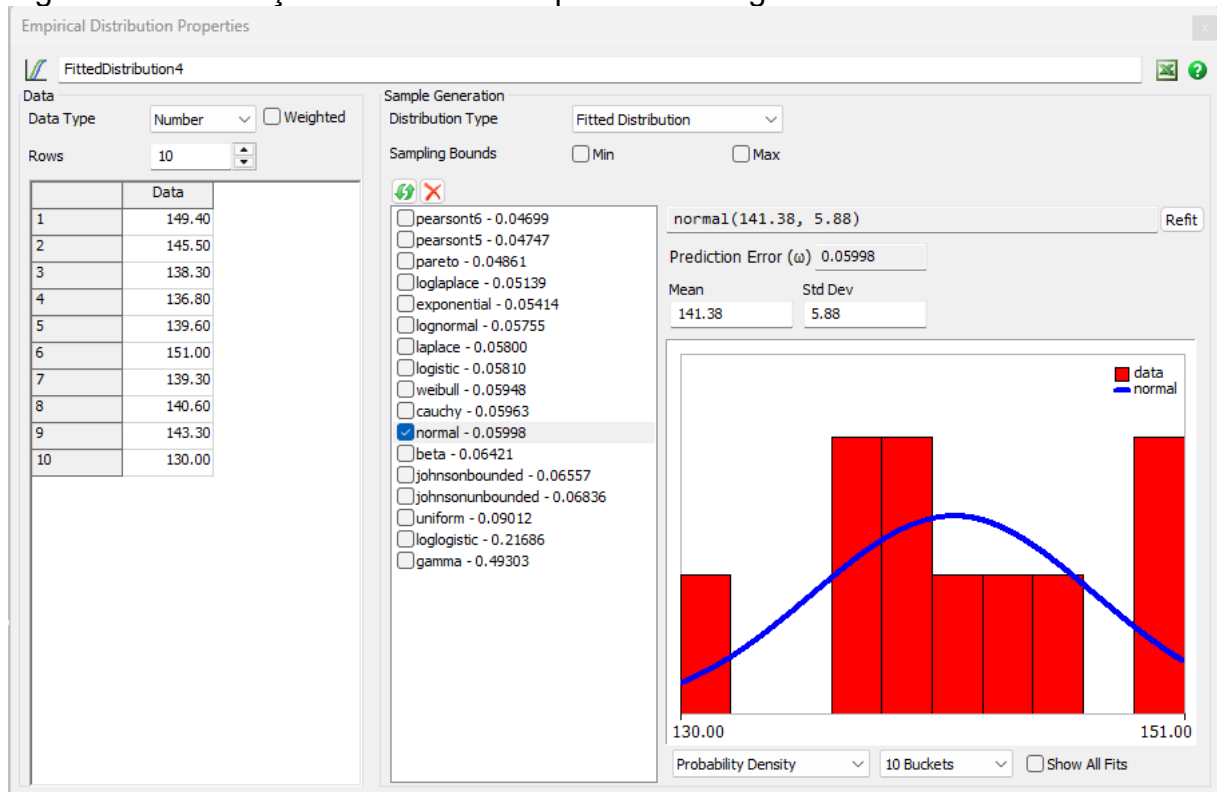
Figura 6 - Distribuição associada a etapa de solda



Fonte: elaborado pelo próprio autor

A Figura 6 apresenta o resultado obtido para o tempo de ciclo da etapa de solda. Verifica-se que a distribuição exponencial foi selecionada para representar os dados coletados, seguindo o mesmo critério adotado anteriormente. Trata-se de uma distribuição amplamente reconhecida na literatura e que apresentou erro desprezível (aproximadamente 0,005) quando comparada à primeira alternativa sugerida pelo ajuste.

Figura 7 - Distribuição associada a etapa de embalagem



Fonte: elaborado pelo próprio autor

A Figura 7 apresenta o resultado obtido para o tempo de ciclo da etapa de embalagem. Observa-se que a distribuição normal foi selecionada para representar os dados coletados, em conformidade com o critério adotado nas etapas anteriores: trata-se de uma distribuição amplamente reconhecida na literatura e que apresentou erro desprezível quando comparada à primeira alternativa sugerida pelo ajuste, cerca de 0,01.

Adicionalmente, destaca-se que, para a construção desse tempo no ambiente de simulação, foi necessário realizar abstrações com vistas à adaptação ao *software*. Entre elas, incluem-se: (i) o agrupamento do tempo individual de embalagem de cada unidade em um tempo total consolidado; e (ii) a consideração dos tempos de montagem e fechamento da caixa como tempos de *setup*, uma vez que tais atividades são executadas apenas uma vez para o conjunto de 10 unidades que compõem cada lote de fabricação.

A Tabela 1 a seguir apresenta a distribuição adotada para cada etapa do processo, bem como o respectivo tempo determinado para sua execução.

Tabela 1 - Tempos e distribuições associadas

Etapa	Distribuição	Tempos[s]
Pré-montagem	Normal [média, desvio]	(14,65; 1,68)
Solda	Exponencial [local, escala]	(7,64; 3,76)
Embalagem	Normal [média, desvio]	(141,38; 5,88)

Fonte: elaborado pelo próprio autor

4.2. MODELAGEM COMPUTACIONAL/ IMPLEMENTAÇÃO

A fase de modelagem computacional foi composta pelas etapas de Construção do modelo computacional, Verificação do modelo computacional e, por fim, a Validação do modelo computacional.

4.2.1. CONSTRUÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL

Com o modelo conceitual previamente definido, prosseguiu-se para a etapa de construção do modelo computacional. Conforme apontam Chwif e Medina (2015), essa fase pode ser implementada por meio de três abordagens: programação direta, linguagem específica de simulação ou utilização de *softwares* dedicados. No presente estudo, optou-se pelo uso de um *software* de simulação, tanto pela maior interatividade oferecida na modelagem quanto pelo nível superior de detalhamento visual. Este último aspecto, a qualidade gráfica, foi determinante para a escolha da ferramenta adotada.

Diante da necessidade de desenvolver modelos que aproveitem de forma mais ampla os recursos gráficos e visuais, decidiu-se empregar o *software* FlexSim®. A escolha dessa ferramenta também se justifica por sua programação orientada a objetos, que demanda pouca ou nenhuma codificação, além de possibilitar a criação de modelos em três dimensões.

Inicialmente, procedeu-se à importação da planta baixa do processo produtivo para o *software*, em escala adequada, de modo a assegurar a fiel representação do sistema a ser modelado. Na sequência, elaborou-se uma biblioteca gráfica específica para este modelo, considerando que a biblioteca padrão do FlexSim® não proporciona

o nível de detalhamento requerido pela pesquisa. A Figura 8 ilustra o modelo criado e na sequência serão exploradas cada uma das atividades envolvidas na criação deste modelo.

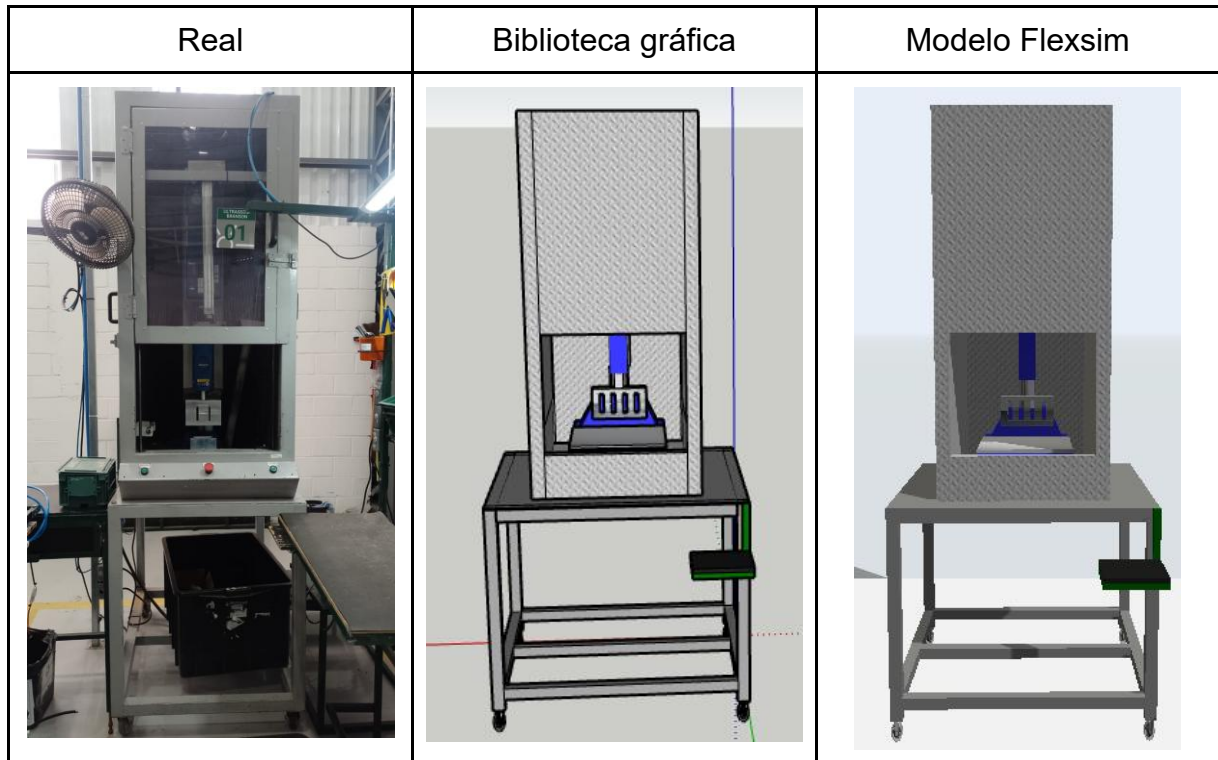
Figura 8 - Modelo Computacional



Fonte: elaborado pelo próprio autor

Nota-se que foram utilizados modelos gráficos em 3D (disponibilizados pela própria empresa) que representam com maior fidelidade os locais e recursos da planta produtiva. A Figura 9 a seguir apresenta uma comparação entre o ambiente real e a sua representação no modelo.

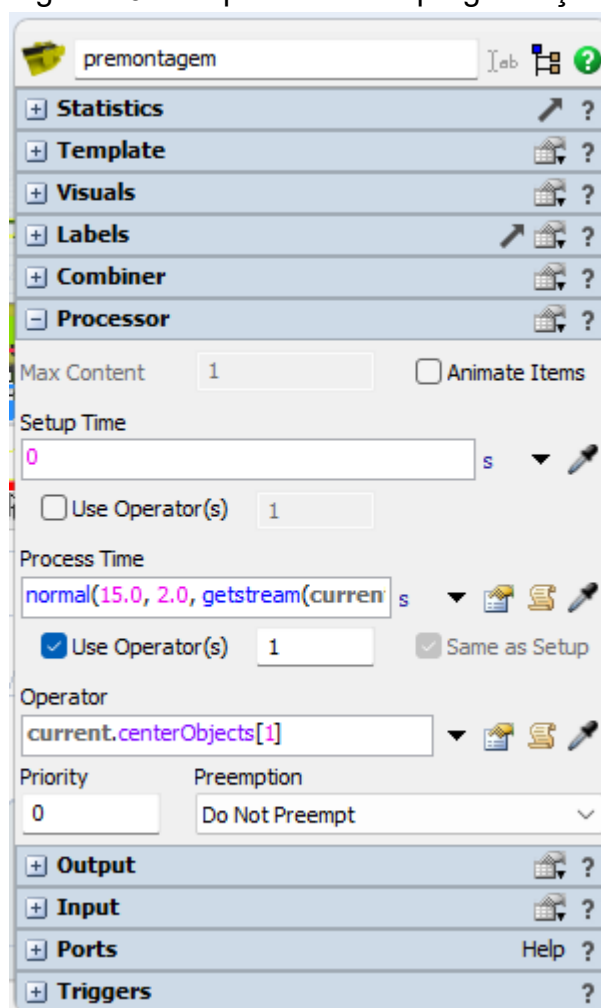
Figura 9 - Comparativo: Real vs Biblioteca gráfica vs Flexsim



Fonte: elaborado pelo próprio autor

Após a elaboração da estrutura gráfica do modelo, procedeu-se ao desenvolvimento de sua lógica de programação. Há diversas abordagens possíveis para essa etapa, contudo, neste estudo optou-se pela utilização do paradigma de programação orientada a objetos. Tal metodologia foi empregada na definição das principais relações e lógicas que compõem o modelo. Dessa forma, ao selecionar um objeto no ambiente desenvolvido, torna-se viável implementar lógicas previamente definidas, estabelecer conexões entre diferentes elementos, configurar tempos e parâmetros de operação, entre outras funcionalidades. A Figura 10 ilustra um exemplo da interface empregada na programação orientada a objetos. Neste caso, nota-se que já há comportamentos definidos nos objetos de forma que o modelador possa incluir lógicas de forma mais intuitiva.

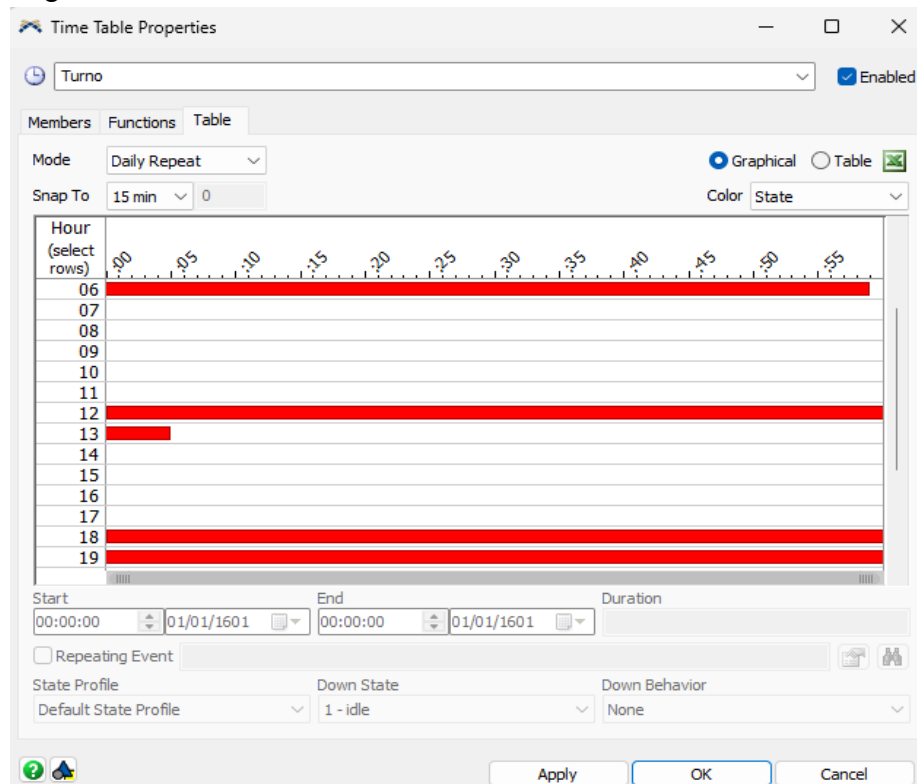
Figura 10 - Propriedades da programação



Fonte: elaborado pelo próprio autor

Neste estudo, o sistema foi configurado para operar em um ciclo produtivo de um dia, contemplando apenas um turno de trabalho, conforme ilustrado na imagem a seguir (Figura 11). Ressalta-se que foram considerados os períodos reais de operação, início das atividades às 08h e término às 17h, com 1h05 de almoço (das 12h às 13h05).

Figura 11 - Tabela de turnos



Fonte: elaborado pelo próprio autor

Adicionalmente, seguindo a lógica de construção do modelo computacional, o abastecimento das linhas de produção ocorre com os materiais especificados, disponibilizados nos respectivos pontos de consumo no início da execução do modelo. O consumo desses materiais é monitorado e avaliado ao longo da simulação, de modo a representar fielmente o comportamento operacional do sistema. A Figura 12 ilustra a lógica de chegada de matéria-prima.

Figura 12 - Lógica de chegada das matérias-primas

	ArrivalTime	ItemName	Quantity
Arrival1	0	Product	600
Arrival2	3600	Product	0
Arrival3	7200	Product	0
Arrival4	10800	Product	0
Arrival5	14400	Product	600
Arrival6	18000	Product	0
Arrival7	21600	Product	0
Arrival8	25200	Product	0

Fonte: elaborado pelo próprio autor

Por fim, faz-se necessário a apresentação itens utilizados para construção do modelo no *software*, sendo eles o “*Processor*” (Figura 13), “*Queue*” (Figura 14), “*Source*” (Figura 15) e “*Operator*” (Figura 16):

Figura 13 - *Processor*

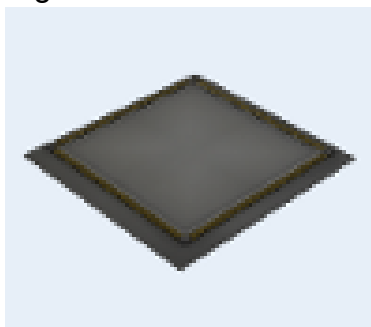


Fonte: elaborado pelo próprio autor

O “*Processor*”, é um recurso de simulação que representa a atividade de transformar itens (fisicamente ou não), durante um tempo pré-determinado. Este tempo total é dividido entre o período de preparação (*setup*) e o tempo efetivo de processamento, sendo que o processor tem a capacidade de lidar com múltiplos itens simultaneamente e pode solicitar operadores durante ambas as fases. Contudo, em caso de falha ou quebra, todos os itens que estiverem em processamento naquele momento serão imediatamente retidos e atrasados.

Neste modelo são utilizados três *processors* para representar: **pré-montagem, solda e embalagem**. Na **pré-montagem** por exemplo, ele é utilizado para transformar as entidades *led* e carcaça em PI.

Figura 14 - *Queue*

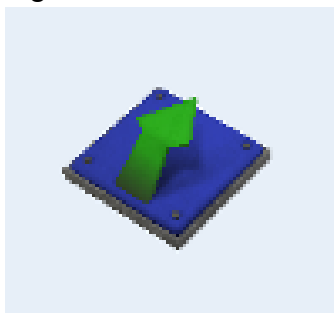


Fonte: elaborado pelo próprio autor

A “*Queue*” tem a função de armazenar itens de fluxo temporariamente, atuando como um estoque. Por padrão, opera no modo Primeiro a Entrar, Primeiro a Sair

(FIFO), garantindo que o item que espera há mais tempo seja o próximo a ser liberado quando o destino estiver livre. Este recurso fixo também oferece a opção de acumular itens em lotes (*batch*) antes de liberá-los, contudo, se o agrupamento estiver desativado, o item é liberado assim que houver disponibilidade na etapa seguinte. Neste modelo são utilizados sete *Queues*, sendo elas utilizadas para representar: **estoque de carcaça e estoque de led** na pré-montagem, **estoque intermediário 1** na solda, **estoque intermediário 2** na embalagem, **estoque de saída e estoque de embalagem**. Na **solda**, por exemplo, este recurso é utilizado justamente para armazenar itens do fluxo de forma temporária até que o **processor pré-montagem** possa recebê-los.

Figura 15 - *Source*



Fonte: elaborado pelo próprio autor

O “*Source*” é o objeto fundamental usado para criar e introduzir itens de fluxo no modelo de simulação. Embora seja um recurso fixo, ela não recebe itens, mas sim os gera e os libera. Cada fonte é responsável por uma única classe de item de fluxo e pode atribuir-lhes propriedades como rótulos ou cores. A criação desses itens pode ocorrer de três maneiras distintas, baseadas em tempo, em cronograma ou em sequência. No modelo deste trabalho, optou-se pelo modo de **Cronograma de Chegadas (*Arrival Schedule Mode*)**. Este modo segue uma tabela de cronograma definida pelo usuário. Cada linha da tabela especifica o momento exato de uma chegada, a quantidade de itens a serem criados e seus rótulos adicionais. As entradas na tabela devem ser ordenadas cronologicamente. Neste modelo são utilizadas quatro *Sources*, sendo elas utilizadas para representar: **entrada carcaça, entrada lente, entrada led, entrada embalagem**. Na **entrada carcaça**, por exemplo, ela é utilizada no modo ***Arrival Schedule***, no qual para cada período determinado na tabela, ela gera e disponibiliza itens no fluxo.

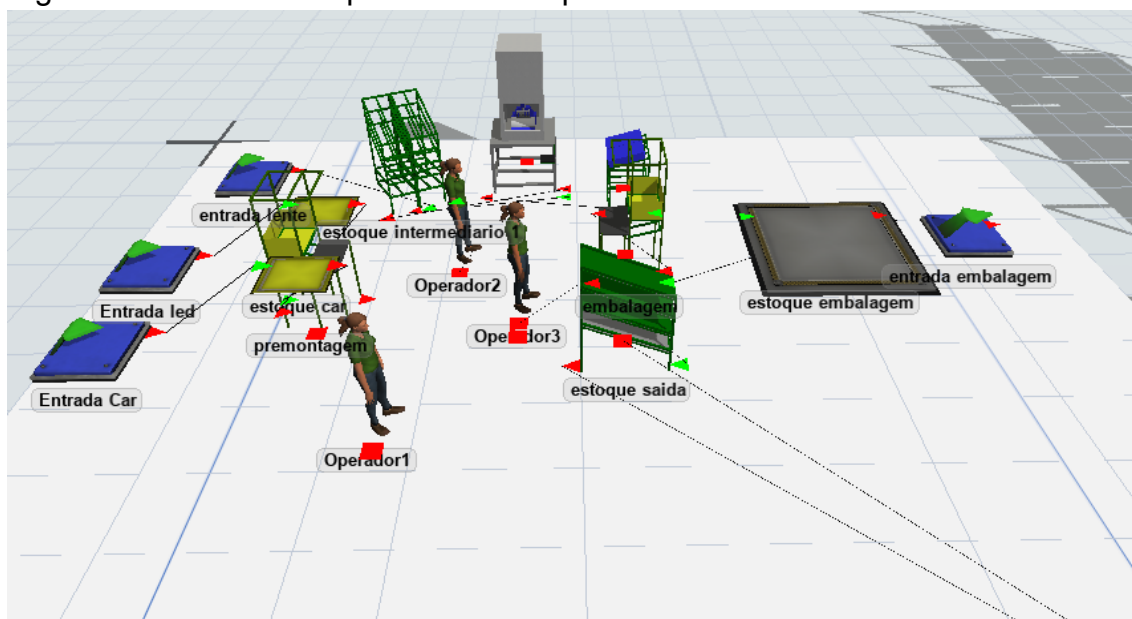
Figura 16 - *Operator*

Fonte: elaborado pelo próprio autor

O “*Operator*” é um executor de tarefas (*task executor*) que pode ser solicitado por outros objetos do modelo para auxiliar em tarefas como preparação, processamento ou reparos. Ele permanece com o objeto que o chamou até ser liberado, momento em que fica disponível para novas chamadas. Neste modelo são incluídos três operadores, sendo eles utilizados para representar: **operador 1**, **operador 2 e operador 3**. Na **pré-montagem** por exemplo, ele é utilizado para operar a junção de *led* e *carcaça*.

A Figura 17 ilustra o modelo com todas as ligações e locais (uma ligação entre dois objetos permite que haja um fluxo de itens entre eles).

Figura 17 - Modelo computacional completo



Fonte: elaborado pelo próprio autor

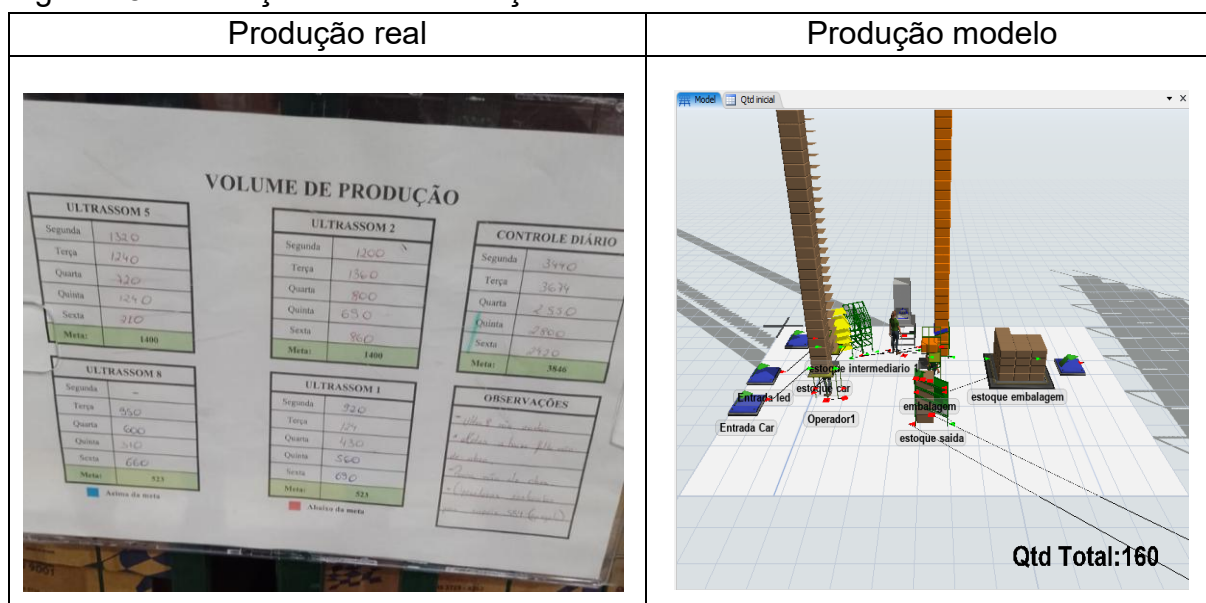
4.2.2. VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL

Segundo Sargent, Goldsman e Yaacoub (2016), a validação de modelos computacionais tem como objetivo assegurar que os resultados obtidos estejam dentro de um nível aceitável de precisão, considerando o escopo definido para o modelo. Essa etapa, também conhecida como Validação Operacional, é descrita por Chwif e Medina (2015) como composta por três níveis distintos de validação:

- **Qualitativo:** envolve a comparação entre o comportamento geral do modelo e o sistema real, sem considerar dados numéricos ou indicadores específicos;
- **Quantitativo informal:** baseia-se na análise de dados reais obtidos por meio de amostras pequenas ou observações, comparando-os com os resultados do modelo em termos de ordem de grandeza;
- **Quantitativo formal:** utiliza métodos estatísticos para realizar comparações entre o modelo e o sistema real, considerando um nível de confiança definido, o que permite validar o modelo de forma mais rigorosa.

O nível de validação escolhido para este trabalho é o **Quantitativo Informal**, onde dados reais do processo auxiliam na determinação da validade operacional. Neste contexto, primeiramente foi definido o indicador adequado para esta análise e, para o modelo em questão, adotou-se a produção diária como parâmetro a ser comparado. Em seguida foram coletados dados do sistema real (produção diária) e executados os respectivos experimentos no modelo de simulação para se obter a mesma métrica. Os dados reais foram comparados com os resultados da simulação, a fim de se validar o modelo computacional, ou seja, o modelo forneceu uma produção diária semelhante ao observado no ambiente real. A Figura 18 demonstra esse comportamento, evidenciando que a produção diária do modelo atingiu 1600 unidades, enquanto a meta real estabelecida para o período corresponde a 1400 unidades, valor estabelecido pelo setor de planejamento da empresa. Destaca-se que essa meta representa um valor "atingível" e, portanto, é propositalmente fixada abaixo da capacidade máxima produtiva do sistema. Em termos práticos, a produção efetiva tende a ser impactada por diferentes frentes de operação e pelas diversas dificuldades e ineficiências presentes no processo, o que pode resultar em níveis produtivos inferiores aos potenciais máximos estabelecidos.

Figura 18 - Produção real vs Produção do modelo



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

4.3. ANÁLISE

A etapa final do método proposto por Montevechi et al. (2010) abrange a definição dos cenários a serem avaliados, a realização periódica das simulações correspondentes e, por último, a análise dos resultados obtidos para subsidiar o processo de tomada de decisão.

Considerando que, na fase de modelagem operacional, o modelo de simulação já se encontra validado e apto para uso, procede-se à definição dos cenários a serem analisados, de modo a explorar os benefícios proporcionados pela simulação. Segundo Barlas e Heavey (2016), o desenvolvimento e a evolução de sistemas reais demandam avaliações e análises envolvendo múltiplos dados e variáveis, cuja complexidade supera a capacidade de processamento humano, o que reforça a relevância da simulação como ferramenta de apoio. Nesse contexto, a simulação de cenários possibilita a investigação de diferentes variáveis a partir de respostas previamente definidas, contribuindo para a tomada de decisões mais assertivas relacionadas ao sistema real.

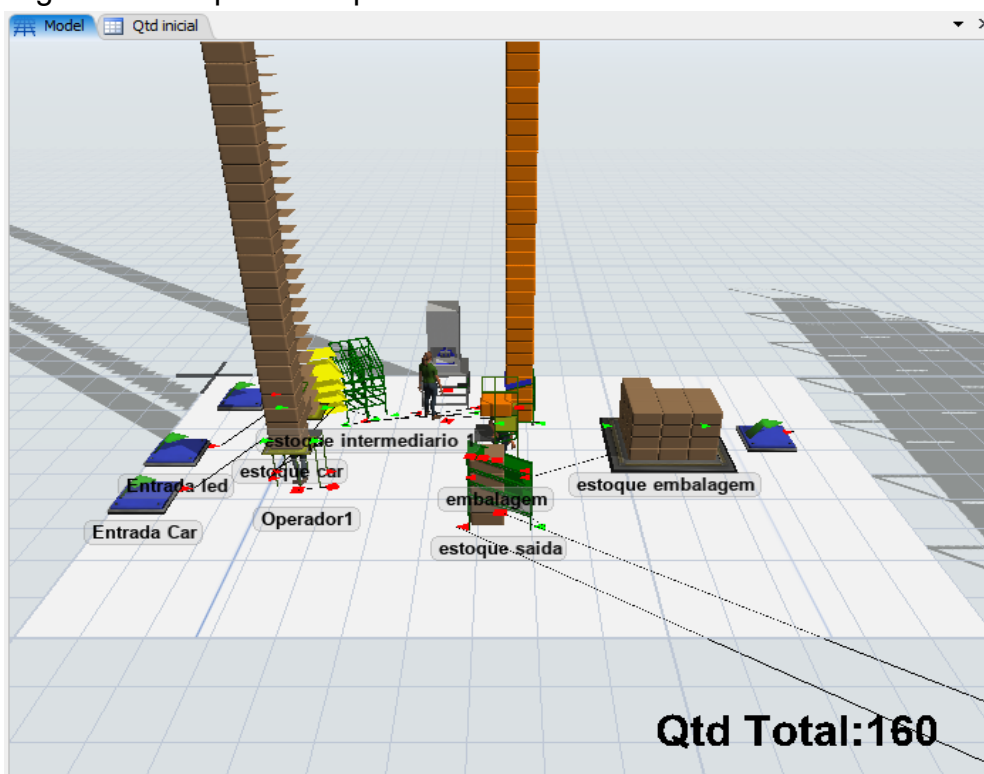
Os cenários a serem analisados no processo de montagem da linha 608, objeto deste estudo, foram estabelecidos com base nas respostas esperadas do modelo de simulação. Após a definição do estado atual (primeiro cenário), considerado o ponto

de referência e principal parâmetro de análise, os demais cenários foram delineados com o propósito de avaliar possíveis melhorias fundamentadas nos princípios do *Lean*, buscando a redução de desperdícios e o aprimoramento das operações produtivas.

4.3.1 DESCRIÇÃO DO ESTADO ATUAL

Na Figura 19 abaixo observa-se o estado atual da linha de montagem quanto sua capacidade produtiva diária. Sendo assim verificou-se uma produção diária total de 160 caixas. Considerando que cada caixa contém 10 unidades do produto e que ainda há caixas de produto acabado que não chegaram na expedição (estão no flowrack de saída da linha), a capacidade produtiva atual corresponde a aproximadamente 1.650 unidades por dia (1600 unidades da expedição + 50 unidades da linha).

Figura 19 - Capacidade produtiva no estado atual

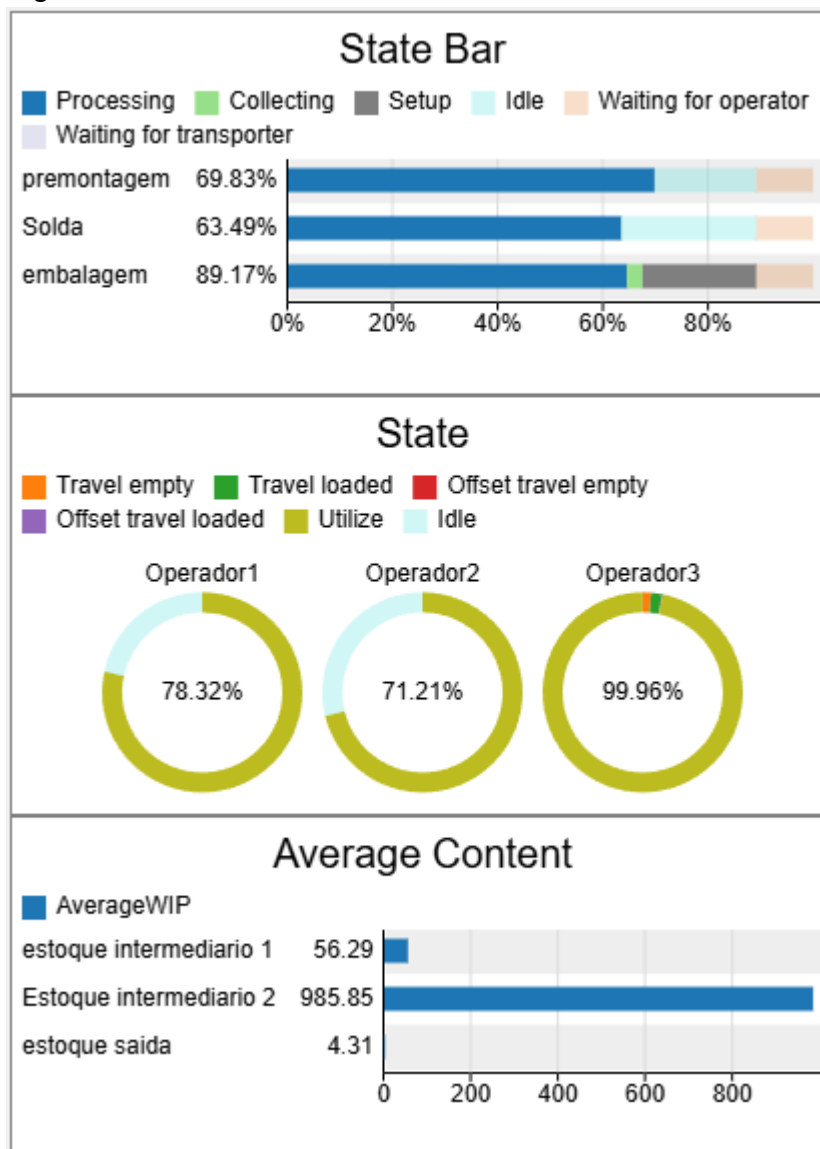


Fonte: elaborado pelo próprio autor

Com o suporte das *dashboards* (painéis de controle) (Figura 20) geradas pelo *software*, selecionaram-se alguns indicadores para análise sob a perspectiva do *Lean*, filosofia adotada como base para a avaliação e definição dos possíveis cenários. As

dashboards consideradas englobam o estado de cada processo, a situação dos operadores e os níveis de estoque.

Figura 20 - *Dashboard* do estado atual



Fonte: elaborado pelo próprio autor

No que se refere ao estado atual de cada processo, observou-se que a operação de pré-montagem apresentou tempo efetivo de operação em torno de 69,83%, enquanto o período de ociosidade alcançou 19,33%. Esses resultados indicam a possibilidade de um dimensionamento inadequado no abastecimento de insumos dessa etapa, ocasionando interrupções no fluxo produtivo. Na etapa de solda, observou-se um comportamento similar, com taxa de operação de 63,49% e ociosidade de 25,67%, indicando, de forma análoga, possíveis falhas no

abastecimento de materiais, além de uma taxa de utilização ligeiramente inferior. Por fim, no processo de embalagem, verificou-se um percentual de operação de 64,63% e 21,61% destinado a atividades de *setup*, resultando em um aproveitamento total de 89,17% do tempo disponível.

Com relação ao desempenho dos operadores, verificou-se que a operadora 1 apresentou 78,32% de tempo efetivo de utilização e 21,68% de ociosidade, indicando subaproveitamento de sua capacidade produtiva. Resultados semelhantes foram observados para a operadora 2, cuja taxa de utilização foi de 71,20%, acompanhada de 28,79% de tempo ocioso. Por fim, identificou-se que a operadora 3 constitui o principal gargalo do processo, uma vez que permanece ocupada durante 96,72% de seu tempo, sendo 1,36% destinado a deslocamentos sem carga e 1,78% a deslocamentos com carga. Esse elevado nível de ocupação revela-se um fator limitante para o aumento da capacidade produtiva, evidenciado pelo acúmulo de peças nessa etapa em decorrência da insuficiência de recursos disponíveis. Para essas observações, é importante relatar que cada empresa adota seu critério para nível ideal de utilização, no caso do objeto de estudo é considerado um bom percentual de utilização quando este indicador atinge cerca de 80%.

Por fim, foram analisados os níveis de estoque intermediário do processo, os quais forneceram informações altamente relevantes para a avaliação do sistema. No estoque intermediário 1, destinado às peças provenientes da pré-montagem e direcionadas à etapa de soldagem, foram identificadas 56 peças aguardando processamento. Já no estoque intermediário 2, responsável por armazenar as peças que passaram pela soldagem e aguardam a etapa de embalagem, observou-se um total de 985 peças. Esse volume indica que a quantidade de produtos enviados à expedição ao final do dia poderia ser significativamente maior caso houvesse capacidade para o processamento desse acumulado. Ademais, constatou-se um desbalanceamento entre os estoques, que poderiam acarretar altos níveis de desperdício ao longo do processo produtivo.

4.3.2 EXECUÇÃO DE EXPERIMENTOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Tendo em vista o cenário atual onde não há o atendimento à demanda e considerando as ineficiências observadas e destacadas anteriormente, foram planejados e executados cenários, conforme apresentado nos tópicos a seguir.

4.3.2.1. Cenário 1- operador multifuncional

O primeiro cenário futuro definido para simulação teve como base o desbalanceamento identificado entre os estoques intermediários, o não atendimento à demanda e a possibilidade de realocação da operadora 2 para atuar também na etapa de embalagem. Essa configuração propõe a adaptação da força de trabalho para um perfil multifuncional, com o objetivo de avaliar o potencial aumento da capacidade produtiva e a consequente redução de desperdícios ao longo do processo.

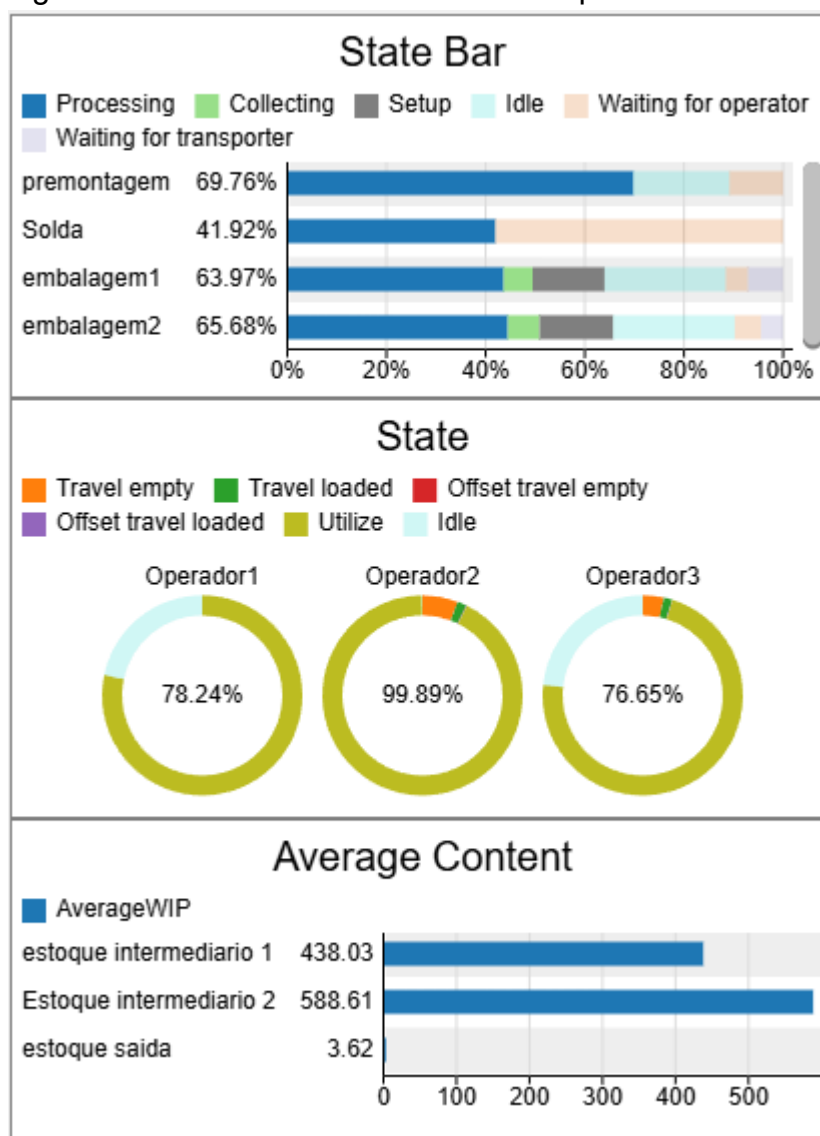
Para possibilitar a integração da operadora 2 à etapa de embalagem, utilizou-se a ferramenta “*Dispatcher*”, recurso do *software* responsável por associar os operadores às respectivas etapas do processo e acioná-los conforme a demanda operacional de cada uma delas. Além disso, foi necessário realizar uma abstração do processo real, duplicando a bancada de operação da etapa de embalagem, a fim de garantir o funcionamento adequado da nova metodologia de trabalho implementada no modelo. A Figura 21 apresenta o recurso implementado para tornar a operadora 2 multifuncional.

Figura 21 - *Dispatcher*

Fonte: elaborado pelo próprio autor

Além disso, a Figura 22 apresenta a *dashboard* atualizada, a qual reflete a nova configuração operacional implementada no sistema.

Figura 22 - Dashboard do cenário multioperador



Fonte: elaborado pelo próprio autor

No cenário proposto, novos *insights* foram identificados a partir da análise do estado das operações. Observou-se que a etapa de soldagem passou a operar em apenas 41,92% do tempo, enquanto em 58,08% a máquina permaneceu em espera pelo operador. Esse resultado indica que o suporte à etapa de embalagem tornou-se prioritário, de modo que a operação com menor tempo de ciclo e, conseqüentemente, maior capacidade de vazão, passou a apresentar redução em sua taxa de utilização. Em contrapartida, a etapa de embalagem demonstrou aumento de desempenho, com duas bancadas em operação, apresentando tempos efetivos de utilização de 63,97% e 65,68%, respectivamente. A pré-montagem não sofreu nenhuma alteração, visto que seu desempenho é adequado ao funcionamento da linha e não impacta o

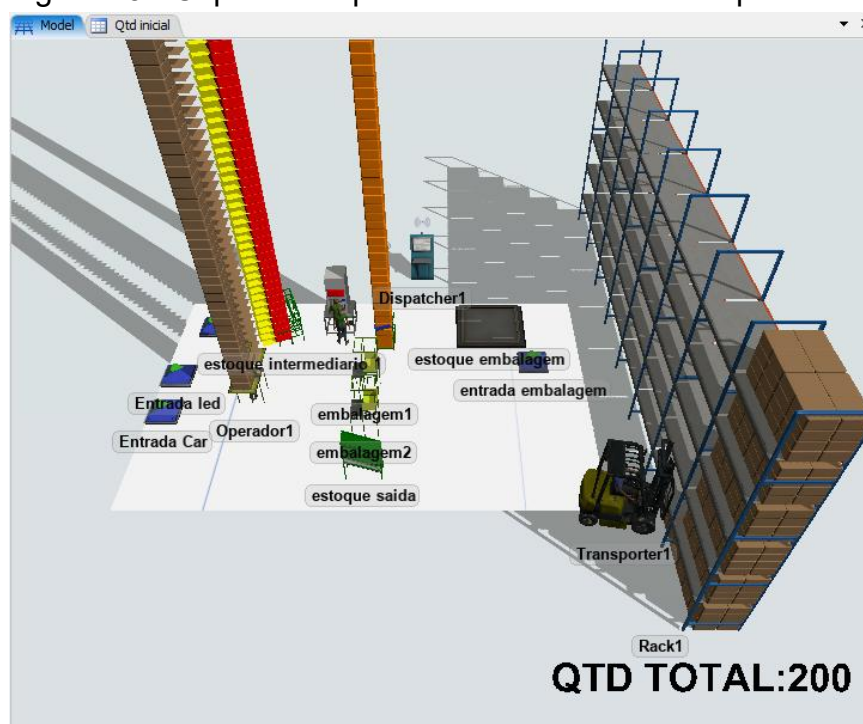
andamento das atividades subsequentes. Sendo assim não é dado enfoque nesta análise.

Quanto ao estado das operadoras, verificou-se que a operadora 2 passou a constituir o gargalo do processo, com 99,89% do seu tempo total ocupado, distribuído em 92,57% de utilização, 5,74% em deslocamentos sem carga e 1,48% em deslocamentos com carga. Por sua vez, a operadora 3 apresentou redução em sua taxa de utilização, operando 71,83% do tempo, com 1,33% em deslocamentos com carga e 3,40% em deslocamentos sem carga, totalizando 76,65% do tempo dedicado a atividades produtivas.

No que se refere aos níveis de estoque, os resultados obtidos corresponderam às expectativas. Nesse cenário, observou-se um equilíbrio entre o estoque intermediário 1 e o estoque intermediário 2, com 438 e aproximadamente 588 unidades, respectivamente. Ressalta-se que o aumento significativo do estoque intermediário 1 decorre da nova função atribuída à operadora responsável por essa etapa do processo. Em contrapartida, o estoque intermediário 2 apresentou uma redução de 40,30%, passando de 985 para 588 peças ao final do dia, o que evidencia um incremento na produção final do sistema.

Por fim, a análise concentrou-se na capacidade produtiva do sistema, representada na Figura 23 a seguir.

Figura 23 - Capacidade produtiva do cenário multioperador



Fonte: elaborado pelo próprio autor

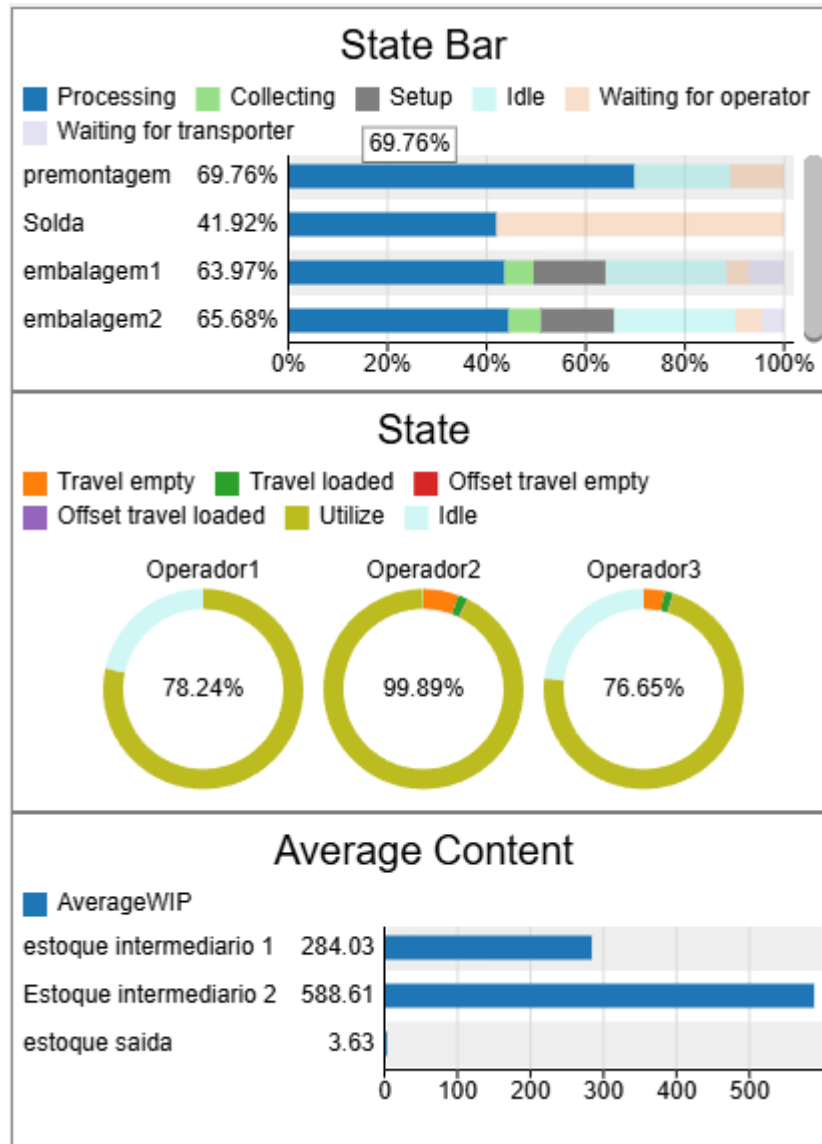
Com as intervenções propostas, observou-se um aumento da capacidade produtiva de 1.650 para 2.000 unidades, correspondendo a um acréscimo de 21,21%. Esse resultado evidencia que, sem a necessidade de aportes financeiros adicionais, a implementação de operadores multifuncionais proporcionou ganhos substanciais de produtividade. Além disso, verificou-se uma distribuição mais equilibrada dos estoques ao longo do processo, indicando maior alinhamento às diretrizes do *Lean Manufacturing*. Tais melhorias demonstram que estratégias organizacionais e operacionais, quando bem planejadas, podem promover avanços significativos na eficiência produtiva e na gestão dos recursos disponíveis.

4.3.2.2. Cenário 2 – estoques iniciais

O segundo cenário futuro definido para a simulação teve como foco a avaliação do estoque inicial na etapa de soldagem. No processo real, o início das operações ocorre com 308 peças em linha, a fim de evitar rupturas e garantir tempo suficiente para o abastecimento de lentes por parte da equipe de logística, considerando suas demais atividades, bem como o aporte proveniente da operação de pré-montagem, responsável pelo fornecimento do PI para a solda. Dessa forma, em vez de iniciar a

produção com duas caixas de itens, como normalmente ocorre, o modelo propôs o início com apenas uma caixa. A Figura 24 apresenta a *dashboard* correspondente a esse cenário.

Figura 24 - *Dashboard* do cenário estoques iniciais



Fonte: elaborado pelo próprio autor

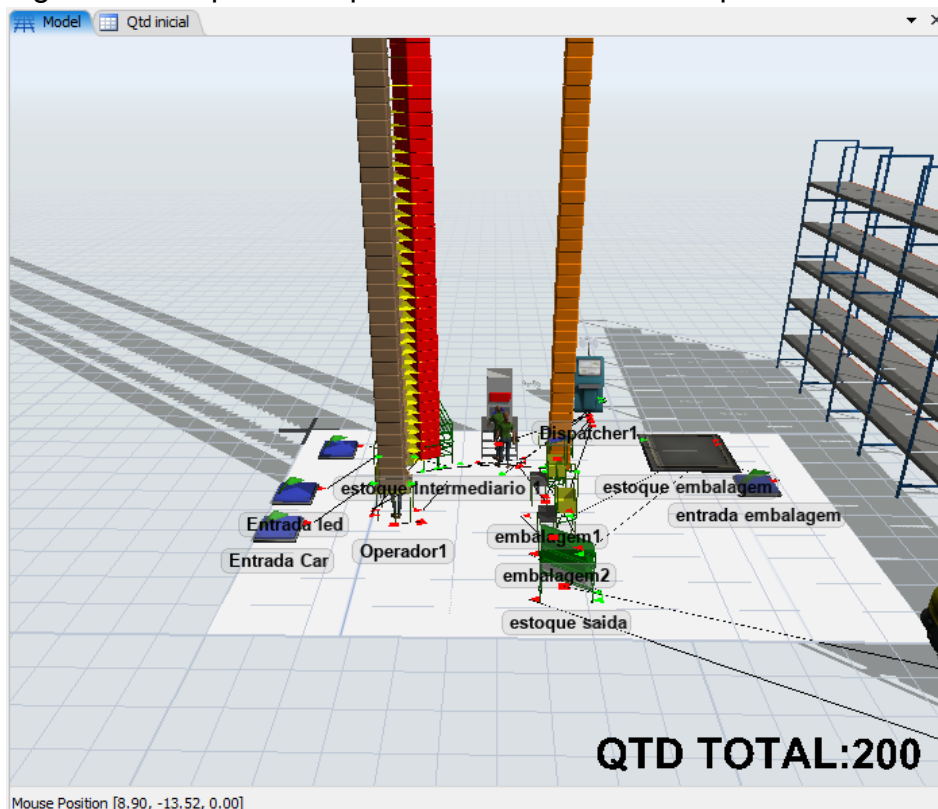
Analisando os resultados, observou-se que o estoque intermediário 1, diretamente impactado pela alteração implementada, apresentou uma redução no saldo de peças ao final do dia, passando de 438 para 284 unidades, o que corresponde a uma diminuição aproximada de 35,16% em seu volume. Essa análise permite inferir que o abastecimento inicial da linha de produção estava superdimensionado, ocasionando a formação de estoques intermediários elevados, sem efetivos benefícios operacionais. A partir dos dados da *dashboard*, verificou-se

que, mesmo com um suprimento inicial 50% menor em comparação ao padrão anteriormente adotado, a linha manteve sua operação normalmente.

Ademais, deve-se destacar que a indústria em questão possui uma cadeia de suprimentos predominantemente interna, como no caso das lentes utilizadas nessa etapa do processo. Assim, evidencia-se que o nível de demanda praticado pelas linhas que abastecem essa produção é excessivamente elevado, pois uma redução de 50% na entrega mostrou-se suficiente para garantir o abastecimento eficaz, possibilitando, conseqüentemente, maior disponibilidade e melhor alocação dos recursos internos da empresa.

No que diz respeito à capacidade produtiva, os impactos da alteração também foram avaliados e constatou-se que o desempenho estabelecido no cenário anterior foi mantido (Figura 25), evidenciando que as mudanças implementadas no segundo cenário não acarretaram perdas na produção.

Figura 25 - Capacidade produtiva do cenário estoques iniciais

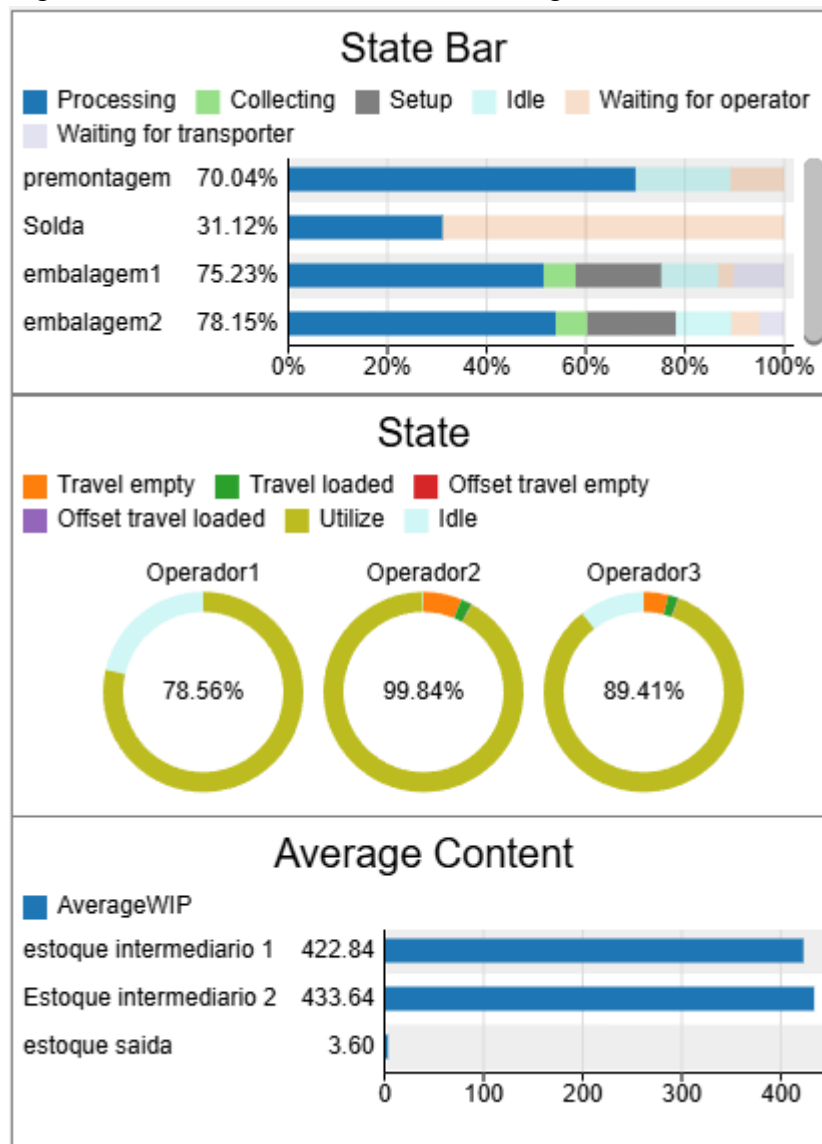


Fonte: elaborado pelo próprio autor

4.3.2.3. Cenário 3 – chegada de caixas

No último cenário, optou-se por analisar a influência da quantidade de caixas destinadas ao abastecimento da etapa de embalagem, tendo em vista que, na análise anterior, foi identificado um fator limitante relacionado à utilização da operadora 3, evidenciado por seu elevado percentual de ociosidade. Para tanto, o volume abastecido por hora foi incrementado de 25 para 30 unidades de caixa. A Figura 26 abaixo apresenta a *dashboard* correspondente a esse cenário.

Figura 26 - *Dashboard* do cenário chegada de caixas



Fonte: elaborado pelo próprio autor

Os dados obtidos nesse cenário evidenciaram alterações significativas em todos os indicadores avaliados. Inicialmente, observou-se um aumento na taxa de

utilização do processo de embalagem, que anteriormente correspondia a 63,97% e 65,68%, passando, respectivamente, para 75,23% e 78,15%. Em contrapartida, a etapa de soldagem apresentou uma maior incidência de tempo em espera pela operadora, refletida na redução de sua taxa de utilização de 41,92% para 31,12%, como resultado do incremento na disponibilidade de caixas para a etapa de embalagem das unidades produzidas.

No que tange ao desempenho das operadoras, destaca-se o aumento significativo na utilização da operadora 3, cuja taxa passou de 76,65% no cenário anterior para 89,41% no cenário atual. Esse resultado indica um aproveitamento mais eficiente da mão de obra, contribuindo para a elevação da eficiência operacional.

Por fim, a análise dos níveis de estoque revelou uma situação próxima da equalização ideal, com diferenças reduzidas entre os estoques intermediários. Observou-se, ainda, o menor patamar registrado para o estoque de peças acabadas aguardando embalagem (estoque intermediário 2), que apresentou uma redução de 588 para 433 unidades, correspondendo a uma diminuição percentual de 26,36%. Todos esses resultados apontaram para mais um aumento na capacidade produtiva que passou de 2000 unidades para 2300 unidades, representando um aumento de 15% das entregas de peças ao final do dia, fato evidenciado pela contagem realizada e representada na Figura 27.

Figura 27 - Capacidade produtiva do cenário chegada de caixas



Fonte: elaborado pelo próprio autor

5. DISCUSSÕES FINAIS E CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como foco a avaliação e melhoria de processos produtivos em uma célula de montagem do setor automotivo, situada no sul de Minas Gerais. A pesquisa foi conduzida por meio da modelagem e simulação a eventos discretos (SED), utilizando o *software* FlexSim, com o objetivo principal de propor melhorias fundamentadas nos princípios do *Lean Manufacturing* e, assim, contribuir para a redução de desperdícios e o aprimoramento da eficiência operacional da empresa.

Na etapa de modelagem conceitual, realizou-se o detalhamento do mapeamento do processo produtivo, abrangendo a coleta criteriosa dos dados por meio de observações diretas e cronoanálises de cada operação da linha estudada. A representação dos fluxos e entidades foi estruturada pelo método IDEF-SIM, favorecendo a abstração lógica das atividades e a definição dos parâmetros necessários para a construção do modelo. Tal abordagem garantiu maior compatibilidade entre as exigências da modelagem e o ambiente computacional, além de proporcionar validação junto aos responsáveis pelo processo.

Na modelagem computacional, a estrutura gráfica tridimensional do sistema foi implementada no FlexSim, com representação fiel da planta baixa e dos elementos produtivos. O modelo foi desenvolvido empregando programação orientada a objetos, o que permitiu criar vínculos entre operações, definir regras lógicas e parametrizar o funcionamento do sistema de acordo com as condições reais observadas. Diversos cenários foram construídos, a partir da análise do desempenho do sistema no estado atual, com o intuito de identificar gargalos, testar hipóteses e promover ajustes que possibilitassem ganhos operacionais relevantes.

Os cenários simulados evidenciaram o impacto das intervenções propostas em indicadores fundamentais como taxas de utilização dos processos, ociosidade de operadores, níveis de estoque intermediário e capacidade produtiva diária. Ressalta-se que, ao longo dos cenários propostos, verificou-se um aumento acumulado significativo da produtividade, com a produção diária final crescendo de 1.650 para 2.300 unidades, representando uma elevação total de 39% em relação ao estado inicial. Paralelamente, foi observada uma redução acumulada expressiva nos

estoques intermediários: o estoque intermediário 2 teve uma queda de 56% no volume de peças acabadas aguardando embalagem, enquanto o estoque intermediário 1 foi reduzido em aproximadamente 35%. Esses resultados sintetizam o impacto positivo e global das intervenções implementadas, demonstrando que estratégias como a multifuncionalidade dos operadores e o melhor dimensionamento de insumos promovem avanços reais na eficiência e no equilíbrio do fluxo produtivo, consolidando o alinhamento do sistema aos princípios do *Lean Manufacturing* e aos objetivos de excelência operacional do estudo

A verificação e validação do modelo computacional foram conduzidas de forma a assegurar representatividade e credibilidade dos resultados obtidos, comparando os dados simulados com a produção efetiva do processo real. Todo o procedimento permitiu, ainda, documentar o conhecimento sobre o sistema produtivo e gerar subsídios para futuras análises e tomadas de decisão.

Conclui-se que a simulação computacional constitui uma ferramenta robusta de apoio à análise de processos produtivos, trazendo flexibilidade, agilidade e significativa redução de custos, além de fundamentar decisões por meio de dados confiáveis e visualizações realistas. Dado aos cenários serem incrementais, cabe a empresa decidir qual cenário se adequa melhor a sua estratégia. Uma vez construído e validado, o modelo torna-se instrumento versátil para avaliação de novos cenários, implantação de melhorias e adaptação contínua aos desafios do ambiente industrial, promovendo maior competitividade e eficiência na gestão dos recursos. Como proposta futura, recomenda-se a ampliação dos estudos para outras linhas produtivas, bem como o refinamento do modelo para análise combinada com técnicas de otimização e inteligência artificial, aproveitando o potencial da ferramenta para simular alternativas, propor soluções e sustentar decisões estratégicas sem gerar custos adicionais ao ambiente real.

REFERÊNCIAS

- APRIL, J.; BETTER, M.; GLOVER, F.; KELLY, J. New advances and applications for marrying simulation and optimization. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2004, Washington, D.C. **Proceedings [...]** Washington, D.C.: IEEE, 2004.
- BALCI, O. A life cycle for modeling and simulation. *Simulation*, Thousand Oaks, v. 88, n. 7, p. 870–883, 2012.
- BANKS, J.; CARSON II, J. S.; NELSON, B. L.; NICOL, D. M. *Discrete-event system simulation*. 5. ed. New Jersey: Pearson, 2010.
- BANKS, J.; CHWIF, L. Warnings about simulation. *Journal of Simulation*, Londres, v. 1, n. 1, p. 1–13, 2010.
- BARIL, C.; GASCON, V.; MILLER, J.; CÔTÉ, N. Use of a discrete-event simulation in a Kaizen event: a case study in healthcare. *European Journal of Operational Research*, Amsterdam, v. 249, n. 1, p. 327–339, 2016.
- BARLAS, P.; HEAVEY, C. Automation of input data to discrete event simulation for manufacturing: a review. *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*, Singapura, v. 7, n. 1, p. 1–27, 2016.
- CHWIF, L.; MEDINA, A. C. *Modelagem e simulação de eventos discretos*. 4. ed. São Paulo: Elsevier, 2015.
- GOGI, A.; TAKO, A. A.; ROBINSON, S. An experimental investigation into the role of simulation models in generating insights. *European Journal of Operational Research*, Amsterdam, v. 249, n. 3, p. 931–944, 2016.
- GOLDSMAN, D.; NANCE, R. E.; WILSON, J. R. A brief history of simulation revisited. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2010, Baltimore. **Proceedings [...]** Baltimore: IEEE, 2010.
- GREASLEY, A.; OWEN, C. Modelling people's behaviour using discrete-event simulation: a review. *International Journal of Operations & Production Management*, Bradford, v. 38, n. 5, p. 1228–1244, 2018.
- HINES, P.; TAYLOR, D. *Going lean*. Cardiff: Lean Enterprise Research Centre, 2000.
- JAHANGIRIAN, M. et al. Simulation in manufacturing and business: a review. *European Journal of Operational Research*, Amsterdam, v. 203, n. 1, p. 1–13, 2010.
- KELTON, W. D.; SADOWSKI, R. P.; ZUPICK, N. B. *Simulation with Arena*. 6. ed. New York: McGraw-Hill, 2010.
- LAW, A. M. How to build valid and credible simulation models. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2009, Austin. **Proceedings [...]** Austin: IEEE, 2009.

LAW, A. M.; KELTON, W. D. *Simulation modeling and analysis*. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2007.

LEAL, F.; ALMEIDA, D. A.; MONTEVECHI, J. A. B. Uma proposta de técnica de modelagem conceitual para a simulação através de elementos do IDEF. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 40., 2008, João Pessoa. **Anais [...]** João Pessoa: SOBRAPO, 2008.

MACIEL, L. F. et al. Aplicação da simulação a eventos discretos no balanceamento de linha de montagem em uma empresa do setor automotivo. *Produção Online*, Florianópolis, v. 23, n. 4, e4967, 2024.

MONKS, T.; ROBINSON, S.; KOTIADIS, K. Learning from discrete-event simulation: exploring the high involvement hypothesis. *European Journal of Operational Research*, Amsterdam, v. 235, n. 1, p. 195–205, 2014.

MONTEVECHI, J. A. B. et al. Conceptual modeling in simulation projects by means of adapted IDEF: an application in a Brazilian tech company. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2010, Baltimore. **Proceedings [...]** Baltimore: IEEE, 2010.

OHNO, T. *O sistema Toyota de produção*. Porto Alegre: Bookman, 1997.

ONGGO, B. S. Data identification and data collection methods in simulation: a case study at ORH Ltd. *Journal of Simulation*, Londres, v. 8, n. 3, p. 195–205, 2014.

OPACIC, L.; SOWLATI, T. Applications of discrete-event simulation in the forest products sector: a review. *Forest Products Journal*, Madison, v. 67, n. 3, p. 219–229, 2016.

OSCARSSON, J.; MORIS, M. U. Documentation of discrete-event simulation models for manufacturing system life cycle simulation. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2002, San Diego. **Proceedings [...]** San Diego: IEEE, 2002.

PRAJAPAT, N.; TIWARI, A. A review of assembly optimisation applications using discrete-event simulation. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Londres, v. 30, n. 2, p. 215–228, 2017.

RESÉNDIZ, J. G. et al. Integrating simulation-based optimization for lean logistics: a case study. *Applied Sciences*, Basel, v. 8, n. 11, p. 1–18, 2018.

ROBINSON, S. Conceptual modelling for simulation: part I: definition and requirements. *Journal of the Operational Research Society*, Londres, v. 59, n. 3, p. 278–290, 2008.

ROBINSON, S. et al. Facilitated modelling with discrete-event simulation: reality or myth? *European Journal of Operational Research*, Amsterdam, v. 234, n. 1, p. 231–240, 2014.

ROBINSON, S. et al. SimLean: utilising simulation in the implementation of lean in healthcare. *European Journal of Operational Research*, Amsterdam, v. 219, n. 1, p. 188–197, 2012.

RODIČ, B. Industry 4.0 and the new simulation modelling paradigm. *Organizacija*, Kranj, v. 50, n. 3, p. 193–207, 2017.

SAKURADA, M.; MIYAKE, D. A. Simulação computacional no apoio ao planejamento dos sistemas de produção. *Gestão & Produção*, São Carlos, v. 16, n. 1, p. 1–14, 2009.

SARGENT, R. G. Verification and validation of simulation models. *Journal of Simulation*, Londres, v. 7, n. 1, p. 12–24, 2013.

SARGENT, R. G. An interval statistical procedure for use in validation of simulation models. *Journal of Simulation*, Londres, v. 1, n. 1, p. 1–6, 2014.

SARGENT, R. G.; GOLDSMAN, D. M.; YAACOUB, T. A tutorial on the operational validation of simulation models. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2016, Washington, D.C. **Proceedings [...]** Washington, D.C.: IEEE, 2016.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. *Administração da produção*. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

SOUZA, R. P. et al. Aplicação da modelagem e simulação computacional como ferramenta para implementação de conceitos de produção enxuta em uma indústria de fornos industriais. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 38., 2018, Maceió. **Anais [...]** Maceió: ABEPRO, 2018.

TRIEBIG, C.; KLÜGL, F. Elements of a documentation framework for agent-based simulation models. *Cybernetics and Systems*, Londres, v. 40, n. 5, p. 441–474, 2009.

TURNER, C. J.; HUTABARAT, W.; OYEKAN, J. Discrete event simulation and virtual reality use in industry: new opportunities and future trends. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, v. 46, n. 6, p. 882–894, 2016.

URIARTE, A. G.; NG, A. H.; MORIS, M. U. Supporting the lean journey with simulation and optimization in the context of Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, v. 25, p. 586–593, 2018.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T.; ROOS, D. *A máquina que mudou o mundo*. Rio de Janeiro: Campus, 1990.