

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO A EVENTOS DISCRETOS PARA MELHORIA DA
CAPACIDADE EM UMA FÁBRICA DO RAMO DE EQUIPAMENTOS
INDUSTRIAIS

Anelize Rosa de Oliveira Chiarini

Itajubá
Abril 2026

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

Anelize Rosa de Oliveira Chiarini

APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO A EVENTOS DISCRETOS PARA MELHORIA DA
CAPACIDADE EM UMA FÁBRICA DO RAMO DE EQUIPAMENTOS
INDUSTRIAIS

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como parte dos requisitos para obtenção do Título de **Mestre em Ciências em Engenharia de Produção**.

Área de concentração: Engenharia de Produção
(Sistemas de Produção e Logística)

Orientador: Prof. Dr. José Arnaldo Barra Montevechi
Coorientador: Prof. Dr. Rafael de Carvalho Miranda

Itajubá

Abril 2026

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO A EVENTOS DISCRETOS PARA MELHORIA DA
CAPACIDADE EM UMA FÁBRICA DO RAMO DE EQUIPAMENTOS
INDUSTRIAIS

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como parte dos requisitos para obtenção do Título de **Mestre em Ciências em Engenharia de Produção**.

Banca examinadora:

Prof. Dr. David Custódio de Sena (UFERSA)

Prof. Dr. José Henrique de Freitas Gomes (UNIFEI)

Prof. Dr. Mona Liza Moura de Oliveira (FACESM)

Orientador: Prof. Dr. José Arnaldo Barra Montevechi

Coorientador: Prof. Dr. Rafael de Carvalho Miranda

Itajubá

Abril 2026

“Dedico este trabalho a Deus, que me permitiu esta conquista. Aos meus filhos Mathias Oliveira Chiarini e Maria Laura Oliveira Chiarini, meu marido Matheus Chiarini Ribeiro do Vale e meus pais Berenice Rosa de Oliveira e Jorge Luiz de Oliveira”.

“Ocupa-te dos teus deveres profissionais por Amor”

Josemaria Escrivá

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por abençoar o meu caminho e me conceder mais essa conquista.

Agradeço aos meus pais pelo amor incondicional, pelo apoio e por cada palavra motivadora me ajudando a enfrentar os obstáculos, para que este momento fosse possível.

Agradeço ao meu orientador José Arnaldo por todo o conhecimento compartilhado, pela oportunidade e por ter acreditado em mim.

Agradeço a todos os professores, funcionários e colegas do Instituto de Engenharia de Produção e Gestão da Universidade Federal de Itajubá, com os quais tive a oportunidade e privilégio de trocar experiências, contar com seus auxílios e ampliar meus conhecimentos, o que possibilitou a conclusão desta pesquisa.

Agradeço aos colegas do NEAAD pelos ensinamentos, experiências compartilhadas, apoios, incentivos e por torcerem por mim.

Agradeço ao CNPq, CAPES e FAPEMIG, bem como à empresa objeto deste estudo, pelo apoio a esta pesquisa.

E, também, agradeço aos membros da banca examinadora pelas contribuições.

RESUMO

A competitividade crescente da indústria global exige das empresas maior eficiência, agilidade e capacidade de adaptação. Nesse contexto, gargalos produtivos prejudicam a resposta ao mercado, tornando essencial a busca por soluções que melhorem o desempenho operacional. O objetivo da pesquisa consiste em investigar, por meio da SED, alternativas para a melhoria da capacidade de uma linha de produção de equipamentos industriais, avaliando os efeitos da ampliação da capacidade do processo de testes sobre o desempenho do sistema produtivo. O objeto de estudo foi uma empresa fabricante de equipamentos industriais, cujas linhas de produção incluem duas etapas de montagem seguidas de um processo de testes, no qual os equipamentos são verificados quanto à conformidade com os padrões de qualidade. O problema identificado foi um gargalo no processo de teste, causado pelo descompasso entre a capacidade de montagem e a capacidade de testagem. Esse descompasso resultou na limitação de produção. O método adotado foi a modelagem e simulação, permitindo analisar fluxos produtivos e identificar melhorias no processo. A pesquisa também envolveu a análise do impacto do aumento da capacidade no posto de trabalho crítico. A melhoria da produção, por meio da Simulação a Eventos Discretos, resultou em um aumento na produção diária, validado pelo *framework* estatístico, e permitiu a identificação de gargalos críticos, propondo melhorias significativas para aumentar a produção. Conclui-se que a aplicação da Simulação a Eventos Discretos, pode proporcionar melhorias significativas no desempenho das linhas de produção, aumentando a competitividade das empresas, demonstrando potencial para melhoria da capacidade de produção.

Palavras-chave: Simulação a Eventos Discretos. Modelagem e Simulação. IDEF-SIM. Equipamentos Industriais. Linha de produção.

ABSTRACT

The increasing competitiveness of the global industry requires companies to achieve higher levels of efficiency, agility, and adaptability. In this context, production bottlenecks hinder responsiveness to market demands, making it essential to seek solutions that improve operational performance. The objective of this research is to investigate, through Discrete Event Simulation (DES), alternatives for improving the capacity of an industrial equipment production line by evaluating the effects of increasing the testing process capacity on the performance of the production system. The object of study was a company that manufactures industrial equipment, whose production lines consist of two assembly stages followed by a testing process, in which the equipment is verified for compliance with quality standards. The identified problem was a bottleneck in the testing process, caused by a mismatch between assembly capacity and testing capacity. This imbalance resulted in production limitations. The method adopted was modeling and simulation, enabling the analysis of production flows and the identification of process improvements. The research also involved analyzing the impact of increasing capacity at the critical workstation. The improvement in production, achieved through Discrete Event Simulation, resulted in an increase in daily output, validated by a statistical framework, and enabled the identification of critical bottlenecks, proposing significant improvements to increase production. It is concluded that the application of Discrete Event Simulation can provide significant improvements in the performance of production lines, increasing companies' competitiveness and demonstrating potential for improving production capacity.

Keywords: *Discrete Event Simulation, Modeling and Simulation, IDEF-SIM. Industrial equipment. Production line.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução histórica da simulação	26
Figura 2 – Histórico da SED e suas evoluções	32
Figura 3 – Classificação do estudo	37
Figura 4 – Sequência de passos para projeto de simulação	38
Figura 5 – Elementos e Símbolos usados na Técnica IDEF-SIM	40
Figura 6 – Fase de Concepção de um projeto de SED	41
Figura 7 – Fase de Implementação de um projeto de SED	43
Figura 8 – Fase de Análise de um projeto de SED	45
Figura 9 – Fluxo de definição de metas produtivas	48
Figura 10 – Etapas da produção	48
Figura 11 – Comparativo de capacidades do posto de teste	48
Figura 12 – Modelo conceitual de SED.....	50
Figura 13 – Linha de produção simulada no FlexSim®.....	54
Figura 14 – Process Flow	55
Figura 15 – Gráfico de probabilidade dos dados reais	56
Figura 16 – Gráfico de probabilidade dos dados simulados.....	56
Figura 17 – Fluxograma traduzido do <i>framework</i> da validação de modelos de simulação.....	58
Figura 18 – Configuração da linha de produção após a adição de um posto de trabalho no FlexSim®.....	64

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Gestão da Produção Tradicional e a Contemporânea	25
Quadro 2 – Histórico da SED e suas evoluções	30
Quadro 3 – Parâmetros das distribuições calculadas.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Teste de Mann-Whitney (Real vs. Simulado).....	60
Tabela 2 – Dados Cenário 0 X Cenário 1	62
Tabela 3 – Dados Cenário 0 X Cenário 2	63

LISTA DE ABREVIATURAS

SED – Simulação a Eventos Discretos

ERP – *Enterprise Resource Planning*

MES – *Manufacturing Execution Systems*

OEE – *Overall Equipment Effectiveness*

APS – *Advanced Planning and Scheduling*

IoT – *Internet of Things*

S&OP – *Sales and Operations Planning*

SBA – Simulação Baseada em Agentes

WSC – *Winter Simulation Conference*

KPIs – *Key Performance Indicators*

IDEF-SIM – *Integrated Definition Methods – Simulation*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Contextualização.....	15
1.2	Problema de pesquisa	16
1.3	Objetivos geral e específicos	17
1.4	Justificativa	18
1.5	Delimitações da pesquisa.....	19
1.6	Estrutura da dissertação	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
2.1	Gestão de Sistemas de Produção	22
2.2	Transformação digital e gestão orientada por dados	22
2.3	Simulação a Eventos Discretos.....	26
2.4	Aplicações da SED em sistemas produtivos.....	29
3	MÉTODO DE PESQUISA	34
3.1	Classificação do estudo.....	34
3.2	Método de modelagem e simulação	37
3.3	Etapa de concepção.....	39
3.3.1	Sequências da Concepção	41
3.4	Etapa de Implementação	42
3.4.1	Sequências da Implementação.....	43
3.5	Etapa da Análise	44
3.5.1	Sequências da Análise	45
4	APLICAÇÃO	47
4.1	Fase de Concepção	47
4.1.1	Objetivos e definição do sistema.....	47
4.1.2	Construção do modelo conceitual.....	49
4.1.3	Modelagem dos dados de entrada	51

4.2	Fase de implementação	54
4.2.1	Construção do modelo computacional.....	54
4.2.2	Verificação e validação do modelo computacional	55
4.3	Fase de análise	60
4.3.1	Definição do projeto e execução dos cenários	61
5	CONCLUSÕES.....	65
5.1	Considerações iniciais	65
5.2	Conclusões e contribuições.....	65
5.3	Verificação do objetivo principal	66
5.4	Verificação dos objetivos específicos.....	67
5.5	Trabalhos futuros	70
	REFERÊNCIAS	71
	Apêndice – Relação de trabalhos originados dessa dissertação	76

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Sistemas produtivos enfrentam desafios crescentes relacionados à eficiência operacional, à redução de custos e à necessidade de responder rapidamente às variações da demanda. Nesse cenário, organizações que atuam em ambientes industriais precisam continuamente revisar seus processos produtivos e avaliar alternativas que permitam ampliar a capacidade de produção e melhorar o desempenho operacional, de modo a sustentar sua competitividade ao longo do tempo (Moura *et al.*, 2020).

A análise de possíveis melhorias em sistemas produtivos, entretanto, pode apresentar elevada complexidade, especialmente quando envolve processos interdependentes, variabilidade operacional e restrições de recursos. Alterações na configuração do sistema, na alocação de recursos ou na organização das atividades podem gerar impactos significativos no fluxo produtivo. Dessa forma, torna-se necessária a utilização de ferramentas que permitam avaliar diferentes alternativas antes de sua implementação no sistema real. Nesse sentido, a simulação constitui uma abordagem adequada para representar o funcionamento de um sistema ao longo do tempo, permitindo analisar seu comportamento sob diferentes condições operacionais (Gigante, 2022).

Entre as diferentes abordagens de simulação, destaca-se a Simulação a Eventos Discretos (SED), amplamente utilizada na análise de sistemas produtivos. Conforme discutido por Montevechi *et al.* (2010), a aplicação da SED em ambientes industriais requer uma abordagem estruturada para o desenvolvimento e utilização dos modelos de simulação, possibilitando a experimentação de diferentes cenários operacionais em ambiente virtual.

Nesse contexto, o presente estudo foi motivado pela análise de uma empresa fabricante de equipamentos industriais localizada no estado de Minas Gerais que prevê aumentos nas vendas, aumento este que necessita de alterações fabris para serem atendidos conforme a necessidade do cliente. Sua linha produtiva é composta por etapas de montagem seguidas de um processo de testes responsável por verificar a conformidade dos equipamentos produzidos. Com o aumento da demanda e a necessidade de ampliação do volume de produção, surgiram limitações operacionais associadas ao processo de testes, que passaram a influenciar o desempenho da linha produtiva e a capacidade de atendimento às necessidades futuras de produção.

Diante desse cenário, torna-se necessário avaliar alternativas que permitam analisar e melhorar a capacidade operacional dessa etapa do processo produtivo. A aplicação da SED nesse contexto busca investigar possíveis melhorias no sistema produtivo e apoiar a tomada de decisão a partir da análise operacional do sistema. Partindo dessa motivação, as seções seguintes apresentam a delimitação do problema de pesquisa e os objetivos que orientam o desenvolvimento deste estudo.

1.2 Problema de pesquisa

A empresa analisada adota um processo de planejamento baseado no *Sales and Operations Planning* (S&OP), no qual a previsão de demanda comercial é utilizada para a elaboração de um plano mestre de produção com horizonte de doze meses. Esse planejamento contempla pedidos pendentes, previsões de vendas e a necessidade de manutenção de estoques estratégicos, servindo como base para decisões relacionadas à capacidade produtiva e ao atendimento da demanda.

A linha de produção estudada possui caráter estratégico para o posicionamento internacional da empresa e atualmente apresenta capacidade produtiva aproximada de 24 equipamentos por dia. Entretanto, projeções de demanda indicam a necessidade de ampliação dessa capacidade para 32 equipamentos por dia no próximo ano, podendo atingir 36 equipamentos por dia em cenários de maior crescimento da demanda.

Embora a etapa de montagem apresente flexibilidade suficiente para acompanhar esse aumento de produção, observa-se a falta de resposta da etapa de teste, que possui restrição para alcançar as taxas de produção esperadas. Esse acúmulo de produtos em espera sugere a existência de um possível desequilíbrio entre as capacidades das etapas do sistema produtivo, indicando a presença de uma restrição que pode limitar o desempenho global da linha.

Entretanto, a identificação de gargalos em sistemas produtivos nem sempre é trivial. As restrições de capacidade em determinado ponto do processo podem decorrer de diferentes fatores, como variações na taxa de processamento, interdependência entre etapas produtivas ou limitações temporárias de recursos. Nesse contexto, é importante o levantamento das taxas de cada etapa envolvida e capacidade de adaptação/flexibilidade para terceirização.

No caso analisado, a principal hipótese considerada pelos gestores é a ampliação da capacidade do processo de testes, por meio da inclusão de um novo posto de trabalho. Contudo,

permanece a incerteza sobre se essa intervenção é suficiente para atender às demandas futuras previstas.

Diante desse cenário, surge a seguinte questão de pesquisa:

Como a ampliação da capacidade no processo de testes influencia o desempenho de uma linha de produção de equipamentos industriais?

Para investigar essa questão, torna-se necessário analisar quantitativamente o comportamento do sistema produtivo. Nesse contexto, a SED apresenta-se como uma ferramenta adequada, pois permite representar o funcionamento da linha de produção e avaliar diferentes cenários operacionais, possibilitando compreender os impactos de alterações na capacidade produtiva sobre o desempenho global do sistema.

A partir dessa problemática, definem-se os objetivos que orientam o desenvolvimento desta pesquisa.

1.3 Objetivos geral e específicos

A presente pesquisa tem como propósito investigar alternativas para melhoria da capacidade produtiva de uma linha de produção de equipamentos industriais por meio da utilização da SED. Considerando o cenário identificado na empresa analisada, no qual se observa a necessidade de ampliação da capacidade produtiva para atendimento da demanda futura, busca-se utilizar a simulação como ferramenta de apoio à análise do comportamento do sistema produtivo e à avaliação de possíveis alternativas de intervenção.

Nesse contexto, o desenvolvimento do estudo permite analisar o funcionamento da linha de produção em ambiente virtual, possibilitando a investigação dos efeitos de alterações na capacidade produtiva sem as limitações físicas ou de tempo presentes no sistema real. A partir dessa abordagem, torna-se possível compreender de forma mais estruturada o impacto das restrições de capacidade sobre o desempenho global do sistema e avaliar cenários que possam contribuir para a melhoria da capacidade produtiva.

Dessa forma, o objetivo geral desta pesquisa consiste em investigar, por meio da SED, alternativas para a melhoria da capacidade de uma linha de produção de equipamentos industriais, avaliando os efeitos da ampliação da capacidade do processo de testes sobre o desempenho do sistema produtivo.

Para alcançar o objetivo geral estabelecido, definem-se os seguintes objetivos específicos:

1. Construir um modelo de simulação representativo do sistema produtivo atual, utilizando a SED;
2. Analisar o comportamento operacional da linha de produção, buscando identificar possíveis restrições de capacidade no fluxo produtivo;
3. Desenvolver cenários de simulação que representem alternativas de ampliação da capacidade no processo de testes, considerando a necessidade de atendimento das demandas futuras previstas pela empresa;
4. Avaliar os efeitos dessas alterações sobre o desempenho do sistema produtivo, considerando o indicador operacional taxa de produção.

A definição desses objetivos permite estruturar a investigação proposta, orientando a aplicação da simulação como ferramenta de análise do sistema produtivo e de apoio à tomada de decisão. A partir dessa perspectiva, torna-se pertinente discutir os aspectos que justificam a realização deste estudo, tanto sob o ponto de vista prático quanto acadêmico, os quais são apresentados na seção seguinte.

1.4 Justificativa

A análise de restrições de capacidade em sistemas produtivos constitui um tema recorrente na engenharia de produção, especialmente em ambientes industriais nos quais pequenas diferenças entre etapas consecutivas do processo podem gerar gargalos operacionais e comprometer o fluxo produtivo. Nessas condições, tais desequilíbrios podem resultar no aumento do tempo total de produção, na formação de estoques intermediários e na redução da eficiência operacional do sistema (Tang *et al.*, 2024).

Diante desse tipo de cenário, torna-se necessário compreender de forma quantitativa o comportamento do sistema produtivo e avaliar alternativas que permitam melhorar seu desempenho. Entretanto, a realização de mudanças diretamente no sistema real pode envolver riscos operacionais, custos elevados e impactos indesejados no processo produtivo. Nesse contexto, ferramentas analíticas capazes de representar e analisar o comportamento de sistemas produtivos complexos tornam-se fundamentais para apoiar o processo de tomada de decisão (Neghban; Smith, 2014).

A SED destaca-se como uma das abordagens mais utilizadas para esse tipo de análise, pois permite representar o funcionamento de sistemas produtivos e avaliar diferentes configurações operacionais sem a necessidade de intervenções diretas no ambiente real

(Oliveira *et al.*, 2024). Por meio da simulação, é possível investigar questões relevantes para o planejamento da produção, tais como o impacto de restrições de capacidade e os efeitos de alterações na estrutura produtiva.

Além disso, estudos recentes reforçam a importância da utilização de dados empíricos e métodos estatísticos adequados na análise de sistemas produtivos. A adoção de abordagens não paramétricas reduz a dependência de pressupostos rígidos sobre distribuições probabilísticas, contribuindo para aumentar a precisão na estimativa de métricas relevantes para a gestão da produção, como tempos de espera, taxas de produção e níveis de estoque (Feng; Shanthikumar, 2023). Dessa forma, a combinação entre simulação e análise estatística fortalece a confiabilidade das análises realizadas.

Nesse contexto, o presente estudo busca contribuir para a análise de um problema real enfrentado por uma empresa fabricante de equipamentos industriais, no qual se observa um desequilíbrio entre etapas do processo produtivo e a possibilidade de formação de gargalos operacionais. A investigação desse sistema produtivo por meio de simulação permite avaliar alternativas de melhoria da capacidade e responder a questões relevantes para o planejamento da produção, tais como:

- Qual é o impacto da restrição identificada no desempenho global da linha de produção?
- A ampliação da capacidade no processo de testes melhora o desempenho global da linha de produção?
- Quais efeitos alterações na etapa de teste podem gerar sobre a meta de produção?

Dessa forma, o estudo apresenta relevância tanto do ponto de vista prático quanto acadêmico. No âmbito organizacional, os resultados podem apoiar decisões relacionadas à melhoria da capacidade produtiva e ao desempenho operacional da empresa analisada. No campo acadêmico, o trabalho contribui para a aplicação de métodos quantitativos e técnicas de simulação na análise de sistemas produtivos complexos, reforçando sua utilidade como ferramenta de apoio à tomada de decisão em engenharia de produção.

1.5 Delimitações da pesquisa

O modelo desenvolvido nesta pesquisa foi construído com base nas características operacionais da linha de produção analisada, composta por duas etapas de montagem seguidas

de uma etapa de testes. O estudo concentra-se na análise da capacidade do processo de testes, identificado como possível restrição ao desempenho global do sistema produtivo.

Nesse contexto, a investigação foi direcionada à avaliação do impacto de alterações na capacidade do posto de testes sobre o comportamento da linha de produção, mantendo-se constantes as demais condições operacionais do sistema. Dessa forma, os cenários de simulação desenvolvidos nesta pesquisa consideram apenas modificações relacionadas à capacidade desse processo específico, sem alterações estruturais nas demais etapas produtivas.

Em função desse recorte analítico, alguns aspectos foram considerados fora do escopo do estudo, tais como alterações no layout da fábrica, expansões físicas da planta, identificação de restrições em outras etapas do processo produtivo, aplicação de ferramentas de mapeamento do fluxo de valor, aprofundamento em ferramentas e gráfico do *software* utilizado e análises relacionadas a variações de demanda de longo prazo.

Assim, os resultados obtidos devem ser interpretados dentro dessas delimitações, refletindo as condições operacionais consideradas no modelo de simulação. Ainda assim, a abordagem metodológica adotada pode servir como referência para a análise de problemas semelhantes em outros sistemas produtivos.

1.6 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está estruturada em cinco capítulos, organizados de forma a conduzir o leitor desde a contextualização do problema até as conclusões da pesquisa.

O Capítulo 1 apresenta a introdução do trabalho, contemplando a contextualização do tema, a justificativa e motivação da pesquisa, a definição do problema investigado, o objetivo geral e específicos e as condições de contorno adotadas.

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica que sustenta o desenvolvimento da pesquisa. Inicialmente, são discutidos os conceitos relacionados à gestão de sistemas de produção. Em seguida, são abordados os fundamentos da simulação, com aprofundamento na SED, suas principais características e aplicações industriais. Posteriormente, são apresentados estudos relacionados à aplicação da simulação em análises de estoques e processos produtivos, além da discussão sobre *frameworks* e contribuições metodológicas voltadas à modelagem e simulação de sistemas.

O Capítulo 3 descreve o método de pesquisa adotado. Inicialmente, é apresentada a classificação do estudo. Em seguida, detalha-se o método de modelagem e simulação utilizado

como guia estruturante do trabalho, dividido nas etapas de concepção, implementação e análise. Cada etapa é descrita juntamente com suas respectivas sequências, evidenciando o encadeamento metodológico seguido na condução da pesquisa.

O Capítulo 4 apresenta a aplicação prática do método ao objeto de estudo. O capítulo está organizado conforme as fases do método de modelagem e simulação. Na fase de concepção, são definidos os objetivos do modelo, o sistema analisado, a construção do modelo conceitual e a modelagem dos dados de entrada. Na fase de implementação, descreve-se a construção do modelo computacional e os procedimentos de verificação e validação. Por fim, na fase de análise, são definidos os cenários estudados, realizada a execução dos experimentos e conduzida a análise estatística dos resultados obtidos.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho. Inicialmente, é realizada a síntese dos principais resultados alcançados. Em seguida, são discutidas as limitações da pesquisa e, por fim, são apresentadas sugestões para trabalhos futuros, indicando possibilidades de aprofundamento e ampliação da pesquisa desenvolvida.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Gestão de Sistemas de Produção

A Gestão de Sistemas de Produção constitui um elemento central para o desempenho operacional das organizações industriais. Esse campo envolve a coordenação integrada de recursos humanos, materiais, informacionais e tecnológicos com o objetivo de assegurar eficiência nos processos produtivos e alinhamento entre as operações e as estratégias organizacionais. De acordo com Slack e Brandon-Jones (2020), a função produção busca administrar de forma sistêmica os recursos transformadores e transformados, visando maximizar produtividade, qualidade, confiabilidade e eficiência no uso dos recursos produtivos.

No contexto do planejamento e controle das operações, a gestão da produção utiliza diferentes instrumentos para equilibrar capacidade produtiva e demanda. Entre esses instrumentos destacam-se o planejamento agregado e a programação detalhada da produção. Conforme ressaltado por Slack e Brandon-Jones (2020), o planejamento agregado permite ajustar a capacidade produtiva de médio e longo prazo às flutuações da demanda do mercado, enquanto a programação detalhada busca garantir a utilização eficiente dos recursos no curto prazo, organizando a sequência das operações e reduzindo perdas operacionais.

Dessa forma, a eficiência produtiva não depende apenas da adoção de tecnologias ou de mecanismos de controle isolados, mas da existência de sistemas de gestão capazes de integrar rotinas operacionais às diretrizes estratégicas da organização. Nesse sentido, a gestão de operações envolve a análise contínua do desempenho do sistema produtivo e a coordenação de decisões relacionadas à capacidade, ao fluxo de materiais e à utilização de recursos (Krajewski; Malhotra; Ritzman, 2023). Estudos recentes também apontam que a combinação entre práticas de planejamento, controle e melhoria contínua favorece o equilíbrio entre flexibilidade e produtividade em ambientes industriais caracterizados por elevada variabilidade e complexidade operacional (Minh, 2023).

Nesse contexto, a gestão da produção assume um papel estratégico ao promover a integração entre decisões operacionais e objetivos organizacionais, garantindo que os sistemas produtivos operem de maneira eficiente e alinhada às necessidades do mercado.

2.2 Transformação digital e gestão orientada por dados

Nos sistemas produtivos contemporâneos, a gestão da produção passa a ser fortemente orientada por dados estruturados provenientes de sistemas corporativos e plataformas digitais.

Registros operacionais que anteriormente eram realizados manualmente ou de forma esporádica passam a ser capturados automaticamente por sistemas como ERP (*Enterprise Resource Planning*) e MES (*Manufacturing Execution Systems*), permitindo maior rastreabilidade das operações e melhor compreensão do comportamento real do sistema produtivo. Mourtzis, Angelopoulos e Panopoulos (2021) destacam que a digitalização da manufatura transformou o ambiente industrial em um sistema mensurável e transparente, no qual decisões operacionais podem ser fundamentadas em dados históricos e atuais.

A disponibilidade desses dados amplia significativamente a capacidade analítica da gestão da produção. Informações detalhadas sobre tempos de processos, taxa de produção e níveis de atendimento à demanda permitem análises mais consistentes do desempenho operacional. Segundo Krajewski, Malhotra e Ritzman (2023), a capacidade de transformar dados operacionais em conhecimento acionável tornou-se um diferencial competitivo para organizações industriais, reposicionando a gestão da produção como uma função estratégica capaz de apoiar decisões relacionadas à engenharia, investimentos em capacidade e melhorias sistêmicas no processo produtivo.

Nesse cenário, a engenharia de produção passa a desempenhar um papel cada vez mais analítico. A disponibilidade de dados operacionais de alta granularidade permite a identificação de gargalos, a avaliação de perdas e a análise sistemática do comportamento do sistema produtivo. Buer, Strandhagen e Chan (2018) destacam que o acesso a dados operacionais detalhados fortalece a tomada de decisão da engenharia, reduzindo incertezas associadas a mudanças no sistema produtivo e aumentando a eficácia das intervenções propostas.

Outro aspecto relevante refere-se à integração vertical e horizontal dos processos produtivos. Tao *et al.* (2019) ressaltam que a integração vertical corresponde ao alinhamento entre objetivos estratégicos e indicadores operacionais monitorados no chão de fábrica, enquanto a integração horizontal envolve a articulação entre diferentes áreas organizacionais, como produção, logística, manutenção e engenharia. Essa conectividade permite que decisões locais sejam analisadas sob uma perspectiva sistêmica, ampliando a capacidade de resposta do sistema diante de variações de demanda e restrições de capacidade.

A evolução dos sistemas produtivos também tem ampliado a visibilidade e o controle do desempenho operacional. Indicadores como taxa de produção pode ser monitorados continuamente por meio de sistemas digitais integrados. Kamble *et al.* (2020) destacam que organizações que utilizam sistemas avançados de gestão da produção apresentam maior

previsibilidade operacional e melhor desempenho em ambientes caracterizados por elevada variabilidade da demanda.

Essa transformação digital tem promovido uma mudança significativa na forma como a gestão da produção é conduzida. Enquanto abordagens tradicionais baseavam-se predominantemente em registros históricos e experiência gerencial, os sistemas contemporâneos permitem o monitoramento contínuo das operações e a análise sistemática do desempenho produtivo. A Quadro 1 apresenta uma síntese comparativa entre características da gestão da produção tradicional e os modelos contemporâneos orientados por dados.

A transição para modelos de gestão orientados por dados amplia a capacidade de análise do sistema produtivo e fortalece o papel da engenharia na proposição de melhorias e na avaliação de alternativas operacionais. Entretanto, apesar dos avanços associados à digitalização e à integração de sistemas, desafios importantes permanecem. A qualidade das decisões gerenciais depende diretamente da qualidade dos dados disponíveis, de modo que registros incompletos ou inconsistentes podem comprometer análises e induzir interpretações equivocadas do desempenho operacional. Wang *et al.* (2023) ressaltam que a confiabilidade das informações constitui um elemento fundamental para garantir a eficácia de sistemas de gestão baseados em dados.

Diante desse cenário, observa-se uma evolução consistente da gestão da produção em direção a abordagens cada vez mais analíticas e orientadas à compreensão de sistemas complexos. A análise puramente retrospectiva de indicadores vem sendo gradualmente complementada por métodos capazes de representar o comportamento dinâmico dos sistemas produtivos e avaliar cenários alternativos de operação. Brailsford *et al.* (2019) destacam que a integração entre dados operacionais e modelos analíticos avançados, como simulação e otimização, representa um caminho natural para apoiar a tomada de decisão em ambientes industriais complexos.

Nesse contexto, ferramentas capazes de representar o comportamento dinâmico dos sistemas produtivos tornam-se particularmente relevantes para a análise de desempenho e a avaliação de alternativas operacionais, destacando-se entre elas a SED, amplamente utilizada na análise de sistemas produtivos complexos.

Quadro 1 – Gestão da Produção Tradicional e a Contemporânea

Dimensão	Gestão da Produção Tradicional	Gestão da Produção Contemporânea
Base de informação	Registros manuais, planilhas isoladas e relatórios periódicos.	Dados integrados e em tempo real provenientes de ERP, MES, sensores e sistemas corporativos.
Tomada de decisão	Predominantemente reativa, baseada em histórico e experiência gerencial.	Analítica e preditiva, apoiada por indicadores de desempenho, simulações e modelos de dados.
Controle da produção	Foco no controle de ordens e volumes produzidos após a execução.	Monitoramento contínuo de taxas de produção, lead time, OEE (Overall Equipment Effectiveness - Eficiência Global dos Equipamentos) e cumprimento de entregas.
Visibilidade do processo	Limitada ao chão de fábrica ou a relatórios consolidados.	Visibilidade ponta a ponta da cadeia produtiva, com rastreabilidade de operações e materiais.
Tecnologia da informação	Uso restrito de sistemas isolados, com baixa integração.	Uso intensivo de ERP, MES, APS (Advanced Planning and Scheduling), IoT (<i>Internet of Things</i>) e plataformas analíticas integradas.
Gestão do tempo	Medições pontuais e pouco estruturadas de tempos e paradas.	Apontamentos automáticos e detalhados de tempos de ciclo, <i>setup</i> , espera e paradas.
Planejamento e programação	Planejamento estático, revisado em períodos longos.	Planejamento dinâmico, com reprogramações frequentes baseadas em dados atualizados.
Papel da engenharia	Atuação corretiva, focada em resolver falhas após ocorrência.	Atuação analítica e estratégica, utilizando dados para identificar gargalos e oportunidades de melhoria.
Indicadores de desempenho	Indicadores limitados e apurados com atraso.	KPIs em tempo real, com dashboards e alertas automáticos.
Integração organizacional	Áreas funcionais pouco integradas (produção, logística, vendas).	Integração entre produção, S&OP, logística e supply chain por meio de sistemas corporativos.
Capacidade de melhoria	Melhoria baseada em observações empíricas e auditorias pontuais.	Melhoria contínua orientada por dados, análises estatísticas e simulação de cenários.
Resposta à variabilidade	Baixa capacidade de resposta a mudanças de demanda ou capacidade.	Alta capacidade de adaptação, com uso de dados históricos e preditivos.
Foco gerencial	Eficiência local e cumprimento de metas isoladas.	Eficiência sistêmica, confiabilidade operacional e nível de serviço ao cliente.

Fonte: Elaboração própria, com base em Slack e Brandon-Jones (2020), Stevenson (2021), Krajewski, Malhotra e Ritzman (2023) e Mourtzis *et al.* (2021).

2.3 Simulação a Eventos Discretos

A simulação computacional consolidou-se como uma importante ferramenta para análise de sistemas complexos, permitindo representar virtualmente o comportamento de sistemas reais e avaliar diferentes cenários operacionais sem a necessidade de intervenções diretas no ambiente produtivo. Sua origem remonta à década de 1940, com o desenvolvimento da simulação de Monte Carlo, baseada em métodos probabilísticos e geração de números aleatórios para análise de sistemas estocásticos, inicialmente aplicados em contextos militares e científicos (Metropolis; Ulam, 1949; Banks *et al.*, 2010).

Com o avanço da capacidade computacional ao longo das décadas seguintes, diferentes paradigmas de simulação foram desenvolvidos para representar sistemas com características distintas. Entre eles, destaca-se a SED, que permite modelar sistemas nos quais as mudanças de estado ocorrem em instantes específicos ao longo do tempo. Essa abordagem mostrou-se particularmente adequada para a análise de sistemas produtivos e logísticos, nos quais eventos como chegadas de entidades, início e término de operações determinam o comportamento do sistema (Banks *et al.*, 2010). A evolução histórica dessas abordagens é sintetizada na Figura 1.

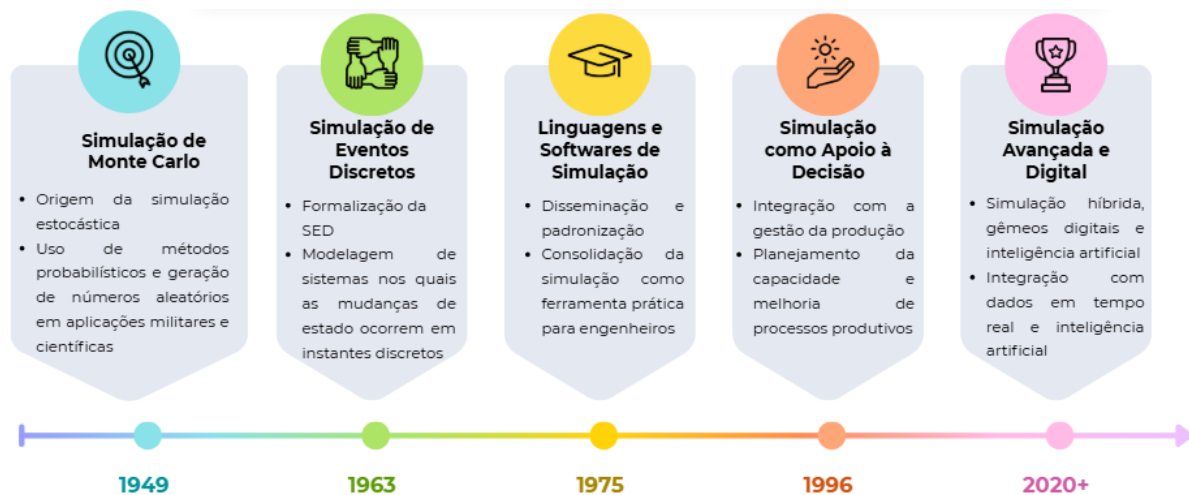


Figura 1 – Evolução histórica da simulação

Fonte: Elaborado pela autora com base em Metropolis e Ulam (1949), Banks *et al.* (2010), Robinson (2014) e Mourtzis, Angelopoulos e Panopoulos (2021).

A SED é uma técnica de modelagem utilizada para representar e analisar sistemas nos quais o estado muda em pontos discretos no tempo, ocorrendo eventos específicos que alteram o estado de entidades ou recursos em um sistema. Diferentemente de abordagens contínuas, nas quais o tempo evolui de forma ininterrupta, na SED o avanço do tempo ocorre de evento em evento, permitindo representar com maior precisão sistemas caracterizados por variabilidade

estocástica e interações complexas entre recursos e processos. Estudos recentes reconhecem a SED como uma ferramenta amplamente empregada em sistemas de produção industrial, planejamento fabril e análise de desempenho operacional, especialmente no contexto da Indústria 4.0, em que a integração de tecnologias digitais e dados em tempo real intensifica a necessidade de modelagem detalhada de eventos (Ciauşu-Sliwa *et al.*, 2025).

A SED baseia-se em um conjunto de componentes fundamentais que permitem representar o funcionamento de sistemas reais. As entidades correspondem aos elementos que fluem pelo sistema, como peças, ordens de produção ou veículos. Os recursos representam os elementos responsáveis pela execução das atividades, como máquinas, operadores ou equipamentos. Já os eventos representam ocorrências que provocam mudanças no estado do sistema, como o início ou término de uma operação.

Outro elemento essencial da SED é a incorporação de distribuições probabilísticas para representar a variabilidade inerente aos sistemas reais. Tempos de processamento, tempos de chegada, falhas de equipamentos e outras ocorrências operacionais podem ser representados por distribuições estatísticas, permitindo modelar a incerteza presente em sistemas industriais de forma mais realista (Ciauşu-sliwa *et al.*, 2025).

A lógica de transição de eventos define como e quando os eventos são gerados e processados no modelo, sendo normalmente implementada em softwares especializados de simulação, como *AnyLogic*, *FlexSim* ou *Plant Simulation*. Esses ambientes computacionais oferecem infraestrutura para modelagem, execução de experimentos e coleta de dados de saída, permitindo analisar diferentes cenários operacionais e comparar alternativas de configuração do sistema (Ciauşu-sliwa *et al.*, 2025; Ivanov; Amelin; Haidabrus, 2025).

A utilização da SED em engenharia de produção oferece benefícios relevantes tanto na prática industrial quanto no suporte à tomada de decisão. Um dos principais benefícios é a possibilidade de realizar experimentação em ambiente virtual, permitindo testar mudanças estruturais, políticas operacionais e diferentes configurações de recursos sem interferir diretamente no sistema real, reduzindo custos e riscos associados à implementação de alterações no ambiente produtivo (Ciauşu-sliwa *et al.*, 2025).

Além disso, a SED facilita a identificação de gargalos e restrições de capacidade ao fornecer métricas detalhadas de desempenho operacional, como taxa de produção e níveis de estoque em processo (WIP). Essas métricas permitem analisar o desempenho sistêmico e apoiar a priorização de ações de melhoria com base em evidências quantitativas (Banks *et al.*, 2010; Law, 2015).

Outro benefício relevante refere-se ao apoio à tomada de decisão em diferentes níveis de planejamento organizacional. Modelos de SED permitem avaliar cenários relacionados ao planejamento estratégico de longo prazo, como dimensionamento de instalações produtivas, bem como decisões táticas e operacionais, como balanceamento de linhas de produção, sequenciamento de operações e alocação de recursos (Ciauşu-sliwa *et al.*, 2025; Ivanov; Amelin; Haidabrus, 2025).

Além das características estruturais da SED, a literatura de modelagem e simulação destaca a importância de procedimentos metodológicos rigorosos para garantir a credibilidade dos modelos desenvolvidos. Nesse contexto, a confiabilidade dos resultados obtidos por meio de simulação depende diretamente da qualidade dos dados de entrada e da adequação das distribuições probabilísticas utilizadas na modelagem. A literatura clássica enfatiza a necessidade de aplicar testes de aderência de distribuição e análises estatísticas para validar as suposições probabilísticas adotadas no modelo (Law, 2015; Banks *et al.*, 2010).

Adicionalmente, é necessário definir claramente o escopo do sistema a ser simulado, delimitando fronteiras operacionais e excluindo processos que não influenciam de maneira significativa os objetivos analíticos do estudo.

Outro aspecto importante refere-se aos procedimentos de verificação e validação dos modelos de simulação. Esses processos têm como objetivo garantir que o modelo esteja logicamente consistente e que seus resultados representem adequadamente o comportamento do sistema real. Estudos recentes destacam que a validação deve considerar não apenas o modelo computacional final, mas também os artefatos utilizados ao longo do processo de modelagem, incluindo o modelo conceitual, as suposições adotadas e a qualidade dos dados utilizados (Wilsdorf *et al.*, 2024).

Os modelos de SED permitem gerar resultados operacionais detalhados que contemplam não apenas valores médios agregados, mas também distribuições estatísticas completas das variáveis de interesse. Essa característica possibilita a realização de análises de sensibilidade e experimentação de cenários, permitindo avaliar alternativas como diferentes layouts de planta, políticas de despacho, sequências de produção ou estratégias de manutenção antes de sua implementação no sistema real (Ivanov; Amelin; Haidabrus, 2025).

A literatura recente apresenta diversas aplicações da SED em contextos produtivos. Maciel *et al.* (2024), por exemplo, utilizaram um modelo de SED para o balanceamento de uma linha de montagem no setor automotivo, identificando melhorias no fluxo produtivo e redução de ineficiências operacionais por meio da avaliação de diferentes configurações de recursos. De

forma semelhante, Piccinini *et al.* (2023) aplicaram a SED combinada com técnicas de otimização para aprimorar a programação da produção na indústria de plásticos, demonstrando ganhos de eficiência, redução de custos e maior aderência a cronogramas operacionais sob condições reais de variabilidade de processamento.

Esses exemplos evidenciam o papel da SED como ferramenta analítica para investigação do comportamento de sistemas produtivos e avaliação de alternativas operacionais. Nesse contexto, diversos estudos têm explorado o uso da SED para apoiar decisões relacionadas ao planejamento, operação e melhoria de sistemas industriais. A seção seguinte apresenta aplicações da SED em sistemas produtivos descritas na literatura, destacando como essa abordagem tem sido utilizada para análise e melhoria de processos produtivos.

2.4 Aplicações da SED em sistemas produtivos

A gestão eficiente da produção constitui um dos principais desafios enfrentados pelos sistemas de produção modernos. Em sistemas reais, variações nos tempos de processamento, falhas de equipamentos e flutuações na chegada de ordens provocam a impacto na taxa de produção diária.

Nesse contexto, a SED tem sido amplamente utilizada como ferramenta de apoio à tomada de decisão (Huerta-Torruco *et al.*, 2022; Urbani *et al.*, 2020). Sua aplicação possibilita analisar, por exemplo, diferentes regras de despacho, níveis de estoque intermediário, políticas de liberação de ordens e estratégias de sequenciamento de produção, permitindo identificar configurações que reduzem congestionamentos e melhoram o desempenho global do sistema produtivo.

Com o objetivo de contextualizar a aplicação da SED na análise e melhoria de sistemas produtivos industriais, apresentam-se alguns exemplos de estudos publicados no *Winter Simulation Conference* (WSC). O evento é amplamente reconhecido como um dos principais fóruns internacionais dedicados à disseminação de avanços na área de simulação de sistemas, com forte presença de trabalhos voltados à SED e a abordagens híbridas de modelagem discreta e contínua (Winter Simulation Conference, 2025).

Nesse contexto, o Quadro 2 reúne trabalhos representativos que ilustram diferentes aplicações da SED ao longo do tempo, evidenciando a evolução do uso dessa abordagem na análise e no suporte à tomada de decisão em sistemas produtivos. Os estudos apresentados contemplam desde aplicações voltadas à identificação de gargalos e avaliação de desempenho

operacional até abordagens mais recentes que integram a simulação a processos de planejamento produtivo, melhoria de capacidade e estratégias associadas à manufatura digital.

Quadro 2 – Histórico da SED e suas evoluções

Autores e data	Título do artigo (WSC)	Aplicação	Papel na evolução do tema
Semini; Fauske; Strandhagen (2006)	<i>Applications of Discrete-Event Simulation to Support Manufacturing Logistics Decision-Making: A Survey</i>	Revisão ampla das aplicações de DES na manufatura e logística	Marco inicial: consolida a SED como ferramenta de apoio à decisão
Gruber <i>et al.</i> (2023)	<i>A Simulation-Based Approach for Evaluating Different Model Mixes for Production Planning of a Contract Manufacturer in the Automotive Industry</i>	Avaliação de cenários produtivos usando DES	Transição do teórico para aplicações industriais reais
Rahman <i>et al.</i> (2023)	<i>A Simulation-Based Approach for Line Balancing under Demand Uncertainty in Production Environment</i>	Balanceamento de linha com simulação discreta	Foco direto em desbalanceamentos entre etapas
Attar <i>et al.</i> (2023)	<i>Simulation-Based Production Process Analysis with KPIs</i>	Uso de indicadores (saídas, filas, eficiência)	Integração simulação + indicadores de desempenho
Seiringer <i>et al.</i> (2023)	<i>A simulation framework for clearing function-based release date optimization in a Material Requirements Planning planned production system</i>	Planejamento sob restrições de capacidade	Consolida SED como ferramenta de planejamento
Ghasemi <i>et al.</i> (2024)	<i>Supply Chain Digital Twin Framework for Hybrid Manufacturing Strategy Selection: A Case Study from the Semiconductor Industry</i>	Evolução da SED para <i>Digital Twin</i>	Ampliação do papel da simulação
Tonn; Grant (2024)	<i>Constraint Identification in Semi-Automated Production Systems</i>	Identificação de gargalos com DES	Convergência SED + Teoria das Restrições
Browning <i>et al.</i> (2024)	<i>Meta-models for buffer sizing in high-speed packaging systems.</i>	Relação entre <i>buffers</i> , filas e capacidade	Refinamento do uso da SED
Franklin; Trollip (2025)	<i>Fueling the Future: Digital Twin Implementation at Westinghouse</i>	SED para integrar planejamento e coordenação entre múltiplos sítios de produção	Estado da arte da aplicação industrial
Thurrow <i>et al.</i> (2025)	<i>Simulation-based production planning for an electronic manufacturing service provider using collaborative planning</i>	Planejamento de capacidade com SED	Consolidação do tema capacidade produtiva

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

A evolução do uso da SED aplicada à manufatura pode ser observada a partir de diferentes estudos reportados na literatura. Um marco inicial dessa trajetória é apresentado por Semini, Fauske e Strandhagen (2006), que realizaram uma revisão abrangente das aplicações da SED na manufatura e na logística. Nesse estudo, a simulação é posicionada como uma ferramenta analítica capaz de representar sistemas produtivos complexos, permitindo avaliar desempenho, utilização de recursos, tempos de ciclo e gargalos, estabelecendo bases conceituais que sustentam aplicações posteriores mais direcionadas e orientadas à tomada de decisão.

Avançando temporalmente, observa-se que trabalhos mais recentes passam a enfatizar aplicações industriais concretas e orientadas ao planejamento produtivo. Gruber *et al.* (2023) demonstram o uso da SED para avaliar diferentes cenários de *mix* de produção em um ambiente real do setor automotivo. A simulação permite quantificar impactos das decisões de planejamento sobre capacidade produtiva, sendo um importante instrumento de suporte à tomada de decisão estratégica.

Na mesma linha aplicada, Rahman *et al.* (2023) exploram a simulação discreta como ferramenta para o balanceamento de linhas de produção sob condições de incerteza de demanda. O estudo destaca a capacidade da SED em identificar desbalanceamentos entre etapas produtivas e avaliar alternativas de redistribuição de tarefas, contribuindo para a melhoria do fluxo produtivo e redução de ineficiências operacionais.

Ainda em 2023, Attar *et al.* (2023) ampliam o escopo analítico da simulação ao integrar a SED com indicadores-chave de desempenho (*Key Performance Indicators – KPIs*), como produtividade, eficiência e tempos de espera. Essa abordagem permite interpretar os resultados da simulação de forma mais estruturada, aproximando o modelo computacional da linguagem gerencial e fortalecendo sua utilização como ferramenta de apoio à decisão.

De forma complementar, Seiringer *et al.* (2023) abordam o planejamento da produção sob restrições de capacidade por meio de um *framework* baseado em simulação discreta. Nesse estudo, a SED é utilizada para avaliar políticas de liberação de ordens e seus impactos no desempenho do sistema produtivo, consolidando a simulação como instrumento de planejamento em ambientes caracterizados por limitações de recursos e elevada variabilidade operacional.

Outro avanço relevante refere-se à ampliação do papel da SED no contexto da manufatura digital. Ghasemi *et al.* (2024) apresentam um *framework* de *digital twin* para cadeias de suprimentos em ambientes de manufatura híbrida. Nesse trabalho, a simulação passa

a integrar modelos digitais continuamente atualizados, permitindo uma representação dinâmica do sistema produtivo e apoiando decisões operacionais em tempo quase real.

Nos estudos publicados em 2024 observa-se também uma convergência entre a SED e outras abordagens consolidadas da engenharia de produção. Tonn e Grant (2024) utilizam simulação para identificar restrições e gargalos em sistemas de produção semi-automatizados, evidenciando a integração entre a SED e princípios associados à Teoria das Restrições.

Outro exemplo pode ser observado no estudo de Browning *et al.* (2024), que investiga a relação entre dimensionamento de *buffers*, formação de filas e capacidade produtiva em sistemas de embalagem de alta velocidade. A utilização da SED integrada a meta-modelos permite apoiar decisões relacionadas à configuração de *buffers* em ambientes industriais complexos e sujeitos a elevada variabilidade operacional.

Nos estudos mais recentes apresentados no WSC em 2025 observa-se a consolidação da SED como ferramenta central na prática industrial. Franklin e Trollip (2025) demonstram a implementação de um *digital twin* baseado em simulação para integrar planejamento e coordenação entre múltiplos sítios de produção no estudo *Fueling the Future: Digital Twin Implementation at Westinghouse*. Os resultados evidenciam reduções significativas nos ciclos de planejamento e maior capacidade de resposta a mudanças operacionais.

De forma complementar, o estudo *Simulation-based production planning for an electronic manufacturing service provider using collaborative planning* (2025) apresenta uma aplicação da SED voltada ao planejamento da produção em ambientes caracterizados por restrições de capacidade. Nesse caso, a simulação permite avaliar diferentes estratégias de planejamento e analisar seus impactos sobre o desempenho produtivo.

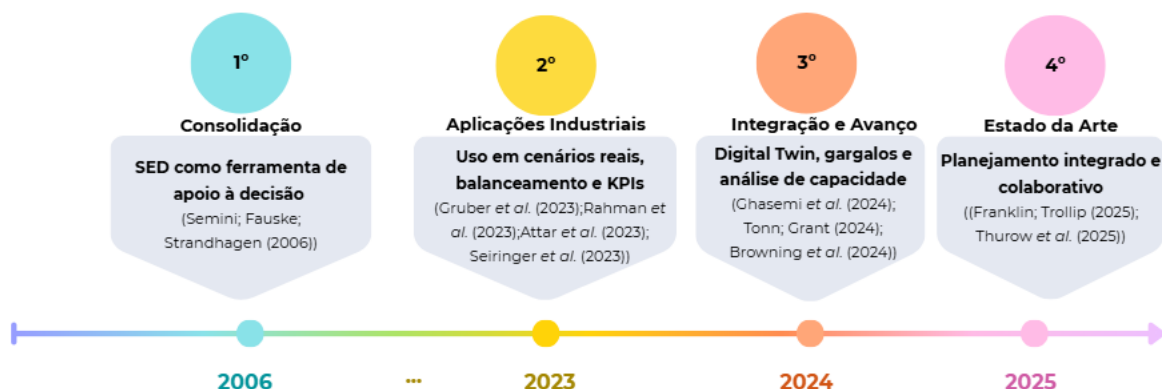


Figura 2 – Histórico da SED e suas evoluções

Fonte: Elaborado pela autora com base em Semini, Fauske e Strandhagen (2006), Gruber *et al.* (2023), Rahman *et al.* (2023), Attar *et al.* (2023), Seiringer *et al.* (2023), Ghasemi *et al.* (2024), Tonn e Grant (2024), Browning *et al.* (2024) e Franklin e Trollip (2025)

Como síntese dessa trajetória evolutiva presente na figura 2, observa-se que a SED deixa de ocupar um papel meramente analítico e passa a consolidar-se como instrumento estratégico de experimentação virtual, planejamento integrado e otimização contínua em sistemas produtivos reais. O crescimento das aplicações reportadas no WSC, desde análises de capacidade e balanceamento até implementações de Gêmeos Digitais industriais, evidencia que a SED se tornou um mecanismo robusto para testar cenários complexos sem intervenção direta no sistema físico.

Nesse contexto, o presente estudo se insere de forma coerente nessa evolução ao propor a melhoria da capacidade de uma linha de produção por meio de modelagem baseada em dados discretos reais, permitindo avaliar alternativas de aumento de produtividade sem a necessidade de investimentos imediatos em ativos ou alterações estruturais. Diferentemente de estimativas determinísticas simplificadas, a abordagem por SED permite capturar variabilidade, interdependências e restrições operacionais, oferecendo uma representação mais fiel do comportamento do sistema produtivo.

Assim, o trabalho não apenas responde a uma demanda prática da empresa analisada, mas também se alinha ao rigor científico contemporâneo ao utilizar experimentação computacional controlada como instrumento de suporte à decisão, contribuindo para reduzir riscos, custos e incertezas associados a mudanças operacionais.

Para que esse tipo de análise seja conduzido de forma estruturada, projetos de simulação normalmente seguem um processo metodológico que inclui a definição do problema, o desenvolvimento do modelo conceitual, a implementação computacional e a análise dos resultados (Montevecchi *et al.* 2010; Huerta-Torruco *et al.*, 2022). A descrição dos procedimentos metodológicos adotados neste trabalho é apresentada a partir da seção 3.2.

3 MÉTODO DE PESQUISA

Este capítulo trata da classificação do estudo e o método que será utilizado neste trabalho. Segundo Turrioni e Mello (2012), a pesquisa pode ser classificada quanto à sua natureza, objetivos, abordagem e método utilizado.

3.1 Classificação do estudo

A presente pesquisa é classificada como pesquisa aplicada, por buscar respostas a problemas concretos no contexto operacional de uma linha de produção industrial real, integrando diretamente conhecimento científico ao ambiente produtivo. Nesse tipo de investigação, a solução prática para desafios reais constitui um elemento central da construção metodológica (Fleury; Werlang, 2017)

Os dados utilizados são de duas naturezas: primários, obtidos diretamente por observação sistemática dos processos de montagem; e secundários, compostos por informações pré-existentes no banco de dados da empresa. A combinação de ambas as fontes de dados é uma estratégia metodológica consolidada em estudos empíricos contemporâneos, permitindo triangulação das evidências e suporte robusto à análise (Fleury; Werlang, 2017).

Para assegurar a confiabilidade e validade dos dados coletados, foi implementado um processo de verificação que envolveu diálogo contínuo com colaboradores da empresa, confrontando as informações coletadas com a realidade operacional. A literatura recente destaca que a validação cruzada de dados empíricos com atores do contexto de estudo é uma prática metodológica recomendada para reduzir vieses e fortalecer a credibilidade dos achados (Wilsdorf *et al.*, 2024).

De acordo com Turrioni e Mello (2012) a classificação quanto à natureza está relacionado ao objetivo geral da pesquisa e à forma como ela se relaciona com a realidade, podendo ser aplicada ou básica. A pesquisa é considerada de natureza aplicada quando:

- Tem como objetivo principal resolver uma problemática concreta e imediata;
- É frequentemente utilizada em pesquisas, onde a experiência prática se une à teoria para inovar ou melhorar processos e produtos;
- Busca aplicar o conhecimento científico para desenvolver soluções, tecnologias, processos ou serviços.

E, a pesquisa é classificada como básica quando:

- Seu propósito é gerar conhecimento, ampliar teorias e princípios científicos.
- Não tem uma preocupação imediata com a utilização prática dos resultados.
- É desenvolvida para o avanço do conhecimento pelo conhecimento

Em relação aos objetivos os autores apresentam quatro modalidades de classificação. Sendo eles: exploratória, descritiva, explicativa ou normativa.

- Pesquisa descritiva: Busca descrever as características de uma população, fenômeno, ou o relacionamento entre suas variáveis, mas sem interferência direta do pesquisador
- Pesquisa explicativa: Tem como objetivo identificar as causas e os efeitos dos fenômenos, buscando entender por que algo acontece. Preocupando-se em identificar os fatores que causam ou determinam a ocorrência de um fenômeno
- Pesquisa exploratória: Tem como objetivo principal aumentar a familiaridade do pesquisador com um problema ou tema que é pouco conhecido. A finalidade é obter uma visão geral, formular hipóteses ou tornar o problema mais explícito, servindo de base para estudos futuros mais aprofundados. Envolve métodos como revisão bibliográfica e entrevistas informais.
- Pesquisa normativa: Preocupa-se com a avaliação de algo em relação a um padrão ideal ou um conjunto de normas. Em vez de apenas explorar um fenômeno, a pesquisa normativa compara o que é com o que deveria ser, segundo uma regra ou ideal estabelecido. Em áreas como a Contabilidade, busca-se avaliar se as práticas estão de acordo com padrões teóricos ou princípios.

A abordagem conforme Turrioni e Mello (2012), pode ser quantitativa, qualitativa ou combinada.

- Pesquisa qualitativa: busca compreender e interpretar os fenômenos estudados, explorando a complexidade e riqueza dos contextos sociais, culturais e individuais. Geralmente, ela se concentra em detalhes, contextos e subjetividade para entender as diferentes implicações do tema investigado. A pesquisa-ação, por exemplo, é um método de pesquisa qualitativa.
- Pesquisa quantitativa: utiliza a quantificação para coletar e tratar dados por meio de técnicas estatísticas. Por ser baseada em números, permite análises e inferências mais precisas sobre o comportamento de uma população.

- Pesquisa quali-quantitativa (ou combinada): combina ambas as abordagens (qualitativa e quantitativa) em diferentes etapas do processo, ou durante a análise dos dados, para enriquecer a compreensão de eventos e fatos.

Quanto ao método, ele é intrinsecamente ligado ao tipo de abordagem, quando a abordagem é quantitativa o método pode ser classificado com experimento, modelagem e simulação ou *survey*.

- Experimental: O método experimental envolve a manipulação de uma ou mais variáveis (variáveis independentes) para observar o efeito sobre outras variáveis (variáveis dependentes).
- Modelagem e simulação: A modelagem consiste na criação de uma representação simplificada de um sistema real. A simulação é a execução desse modelo para analisar seu comportamento sob diferentes condições.
- *Survey*: O método *survey* (ou levantamento) utiliza questionários ou entrevistas padronizadas para coletar dados de uma amostra de uma população.

Quando a abordagem é qualitativa temos a aplicação do método de estudo de caso, pesquisa-ação ou *Soft System Methodology*.

- Estudo de caso: É um método que se aprofunda na investigação de um fenômeno dentro do seu contexto real.
- Pesquisa-ação: É um método qualitativo e aplicado que envolve a colaboração entre pesquisadores e participantes (o próprio pesquisador pode ser um participante) para resolver um problema prático.
- *Soft System Methodology*: É uma metodologia qualitativa e flexível, baseada em ideias de sistemas, desenvolvida para lidar com problemas "*soft*" (aqueles que são mal definidos, complexos e envolvem variáveis comportamentais).

Partindo dessas classificações, a presente pesquisa possui natureza aplicada, pois seus resultados têm como função principal solucionar problemas do mundo real (Turrioni; Mello, 2012). Logo, esta natureza aplicada busca gerar conhecimentos para resolver o problema de um sistema real envolvendo, desta forma, verdades e interesses locais. Quanto aos objetivos, pode-se afirmar que o trabalho é classificado como descritivo, pois tenta arquitetar e delinear as particularidades do fenômeno analisado por meio de uma observação estruturada e sistemática.

Em relação à abordagem, a pesquisa é classificada como quantitativa, pois a partir de um sistema real analisado, foi possível realizar sua modelagem e simulação.

Dessa forma é possível analisar de maneira visual que a pesquisa segue a seguinte linha dentro das classificações possíveis de Turrioni e Mello (2012), conforme mostra a Figura 3.

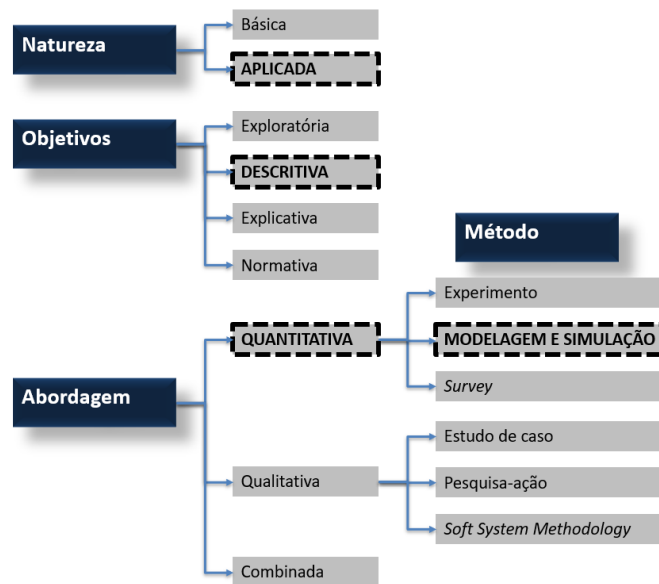


Figura 3 – Classificação do estudo
Fonte: Adaptado de Turrioni e Mello (2012)

3.2 Método de modelagem e simulação

No conjunto das áreas de estudo da Engenharia de Produção, há a Pesquisa Operacional. Por sua vez, dentro desta, encontra-se a Modelagem, Simulação e Otimização que engloba estudos embasados em construções de modelos para representar sistemas reais. Estes modelos são, em sua maioria, quantitativos e buscam apresentar as principais particularidades de um sistema real (Bertrand; Fransoo, 2002; Chwif; Medina, 2015).

Segundo Mansouri *et al.* (2025), a modelagem representa um processo de criação de representações matemáticas e simbólicas que permitem analisar o comportamento de sistemas complexos por meio de métodos computacionais. Um sistema pode ser definido como um conjunto de componentes ou processos interativos que recebem entradas e fornecem saídas para um propósito específico. Para Urbani *et al.* (2020), modelos baseados em simulação têm se mostrado muito eficientes, apresentando bons resultados em vários tipos de indústrias.

O método da modelagem e simulação foi aplicado de forma assertiva e baseado em uma específica e robusta metodologia proposta por Montevechi *et al.* (2010), baseada em 3 etapas principais: fase de concepção (modelo conceitual), fase de implementação (modelo computacional) e fase de análise (modelo operacional). As fases podem ser ilustradas pela Figura 4 e explicadas nas seções seguintes.

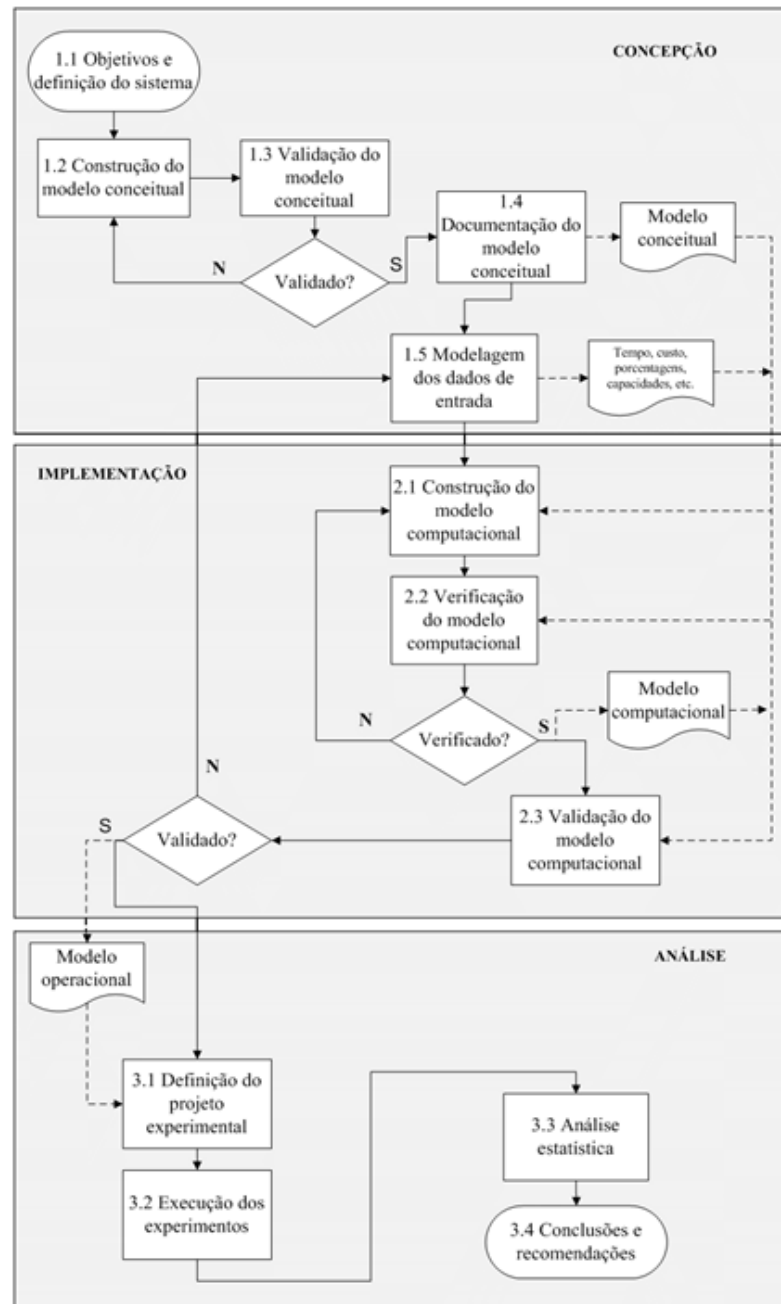


Figura 4 – Sequência de passos para projeto de simulação
 Fonte: Adaptado de Montevechi *et al.* (2010) e Leal *et al.* (2011)

3.3 Etapa de concepção

A fase de concepção em um projeto de simulação inicia na definição dos objetivos e do sistema em que se estabelecem claramente quais problemas serão abordados e quais metas a simulação deve alcançar.

Na etapa de concepção, considerada fundamental, Montevechi *et al.* (2010) destacam que o modelo conceitual não se limita apenas a representar o ponto de partida da modelagem, mas também exerce papel decisivo na obtenção de um modelo operacional validado e passível de ser utilizado na análise de cenários. Entretanto, um dos principais desafios dessa fase é o uso de técnicas de mapeamento de processos que, em grande parte, não foram desenvolvidas com foco em projetos de simulação, o que pode comprometer a completude do modelo conceitual e sua capacidade de cumprir plenamente seus objetivos, sendo o uso do IDEF-SIM (*Integrated Definition Methods Simulation*) uma ferramenta importante para minimizar os desafios desta etapa.

O método IDEF-SIM tem origem na família de técnicas IDEF (*Integration Definition for Function Modeling*), um conjunto de metodologias desenvolvido para padronizar e melhorar a representação e a integração de informações em sistemas complexos (FIPS PUBS, 1993). Entre essas abordagens destacam-se o IDEF0, voltado à modelagem funcional das atividades de um sistema, o IDEF3, direcionado à representação da lógica e da sequência dos processos, e os fluxogramas tradicionais, amplamente utilizados para descrever fluxos operacionais de forma visual (Mayer; Painter; Witte, 1992; Montevechi *et al.*, 2010; Leal, 2011). Embora cada uma dessas técnicas apresente contribuições relevantes para a compreensão de sistemas produtivos, sua aplicação isolada apresenta limitações para a modelagem conceitual de sistemas de SED. Nesse contexto, o IDEF-SIM foi proposto como uma abordagem que integra elementos dessas metodologias, adaptando-os para representar de forma estruturada processos, entidades e recursos, facilitando a construção e a comunicação de modelos conceituais em projetos de simulação (Leal, 2008; Montevechi *et al.*, 2010).

A simbologia de cada símbolo da técnica e suas explicações são apresentadas na Figura 5.

Elementos	Simbologia	Significado
Entidade		Itens processados no sistema.
Funções		Locais onde a Entidade agirá.
Fluxo da Entidade		Direção da entidade no modelo.
Recursos		Elementos usados para movimentar entidades e executar funções.
Controles		Regras usadas nas funções.
Regras para Fluxos Paralelos e/Alternativos	  	2 ou mais funções são executadas em conjunto ou separadas (ou permitindo ambas as regras).
Movimentação		Deslocamento da entidade.
Informação explanatória		Para inserir explicações ao modelo.
Entrada no fluxo do sistema modelado		Define a entrada ou criação de entidades no modelo.
Fim do sistema		Fim de um caminho ou do fluxo total.
Conceção com outra figura		Usada para dividir o modelo em figuras diferentes

Figura 5 – Elementos e Símbolos usados na Técnica IDEF-SIM
 Fonte: Adaptado de Leal *et al.* (2008)

O modelo conceitual caracteriza-se como uma descrição independente de *software* do sistema a ser construído, capaz de orientar a coleta de dados, definir pontos críticos de observação e acelerar a elaboração do modelo computacional.

Lúcio *et al.* (2025) apontam que essa etapa tende a ser a menos valorizada e compreendida dentro de projetos de simulação. Pesquisas revisadas pelos autores indicam, inclusive, que profissionais mais experientes dedicam maior percentual de tempo à modelagem conceitual, enquanto iniciantes tendem a reduzir sua atenção a essa atividade. A natureza dessa fase também se diferencia das etapas de verificação, validação e análise, que possuem forte caráter matemático e estatístico. Ainda assim, a modelagem conceitual é apontada como peça-chave para o sucesso de projetos de simulação.

Na etapa de construção do modelo conceitual, o sistema real é representado de forma abstrata, contemplando os elementos e relações essenciais ao seu funcionamento. Na etapa posterior, realiza-se a validação do modelo conceitual, verificando se a representação criada está adequada e consistente com a realidade do sistema. Caso o modelo não seja validado, retorna-se à sua reconstrução, ajustando-o até atender aos requisitos definidos. Obtido o modelo

validado, procede-se à documentação do modelo conceitual, que consiste no registro formal e padronizado da estrutura do modelo, garantindo clareza e facilidade de compreensão para as fases seguintes.

Por fim, tem-se a modelagem dos dados de entrada, etapa na qual são definidos e estruturados os dados necessários para alimentar o modelo computacional. Esses dados podem incluir informações como tempos, custos, capacidades, percentuais, variabilidades, entre outros. O resultado desta fase é a consolidação do modelo conceitual, que servirá de base para as fases subsequentes de implementação (modelo computacional) e análise (modelo operacional).

3.3.1 Sequências da Concepção

A Figura 6 sintetiza a fase de Concepção de um projeto de SED, segundo Montevechi *et al.* (2010).

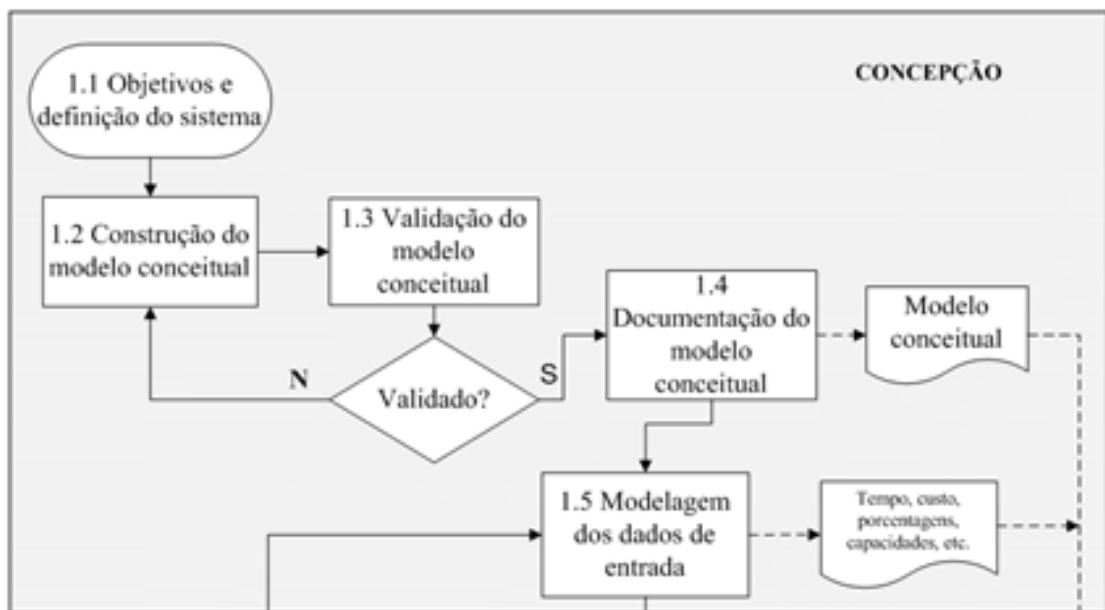


Figura 6 – Fase de Concepção de um projeto de SED

Fonte: Adaptado de Montevechi *et al.* (2010)

O primeiro bloco dessa fase, “1.1 Objetivos e definições do sistema”, corresponde à definição clara dos objetivos do estudo e à delimitação do sistema sob análise. Nessa etapa, são explicitadas as questões que o modelo deve responder, os indicadores de desempenho relevantes (como taxas de produção) e os limites do sistema, incluindo o que será ou não

modelado. Segundo Robinson (2014), essa definição é essencial para evitar modelos excessivamente complexos ou, ao contrário, simplificações que distorçam o comportamento real do sistema.

Em seguida, o bloco “1.2 Construção do modelo conceitual” trata da elaboração do modelo conceitual, que representa o sistema em um nível lógico e abstrato, sem ainda recorrer a codificação computacional. Nessa etapa são definidos os principais elementos do sistema, como entidades, recursos e fluxos de processo. A literatura contemporânea enfatiza que o modelo conceitual atua como um elo fundamental entre especialistas do sistema real e modeladores, facilitando a comunicação e reduzindo ambiguidades na interpretação do funcionamento do sistema (Robinson, 2020).

O bloco “1.3 Validação do modelo conceitual” refere-se à validação do modelo conceitual junto a especialistas e stakeholders do sistema real. Essa validação busca assegurar que o modelo conceitual é uma representação fiel e aceitável da realidade operacional. Segundo Friederich e Lazaro-Molnar (2023), a validação do modelo conceitual em estudos de simulação orientados por dados inclui assegurar que os dados de entrada refletem adequadamente as características e variabilidade do sistema real, e que a estrutura conceitual do modelo esteja alinhada ao propósito do estudo, o que fortalece a robustez e confiabilidade das inferências derivadas da simulação.

Uma vez validado, o bloco “1.4 Documentação do modelo conceitual” formaliza o modelo conceitual por meio de documentação estruturada, diagramas e descrições padronizadas. Essa documentação é fundamental para garantir rastreabilidade, reprodutibilidade científica e facilidade de manutenção do modelo. Por fim, o bloco “1.5 Modelagem dos dados de entrada” trata da coleta, análise e modelagem estatística dos dados de entrada, como tempos de processamento, chegadas e falhas. Essa etapa é crítica, pois a qualidade dos dados de entrada impacta diretamente a confiabilidade dos resultados da simulação (Zhang *et al.*, 2022).

3.4 Etapa de Implementação

Na fase de Implementação o processo tem início com a construção do modelo computacional, etapa em que o modelo conceitual previamente elaborado é traduzido para um ambiente de *software* de simulação. Em seguida, realiza-se a verificação do modelo computacional, cujo objetivo é assegurar que a tradução para o *software* foi feita corretamente

e que o modelo está livre de erros de programação ou de lógica. Caso não seja verificado, o modelo retorna para ajustes até atingir os critérios esperados.

Uma vez verificado, avança-se para a validação do modelo computacional, etapa em que se avalia se o modelo implementado representa adequadamente o sistema real e atende aos objetivos definidos no início do projeto. Quando validado, consolida-se o modelo computacional, que estará apto a servir de base para a fase de análise, onde serão conduzidos experimentos e cenários de simulação.

3.4.1 Sequências da Implementação

A Figura 7 sintetiza a fase de Implementação de um projeto de SED, segundo Montevechi *et al.* (2010).

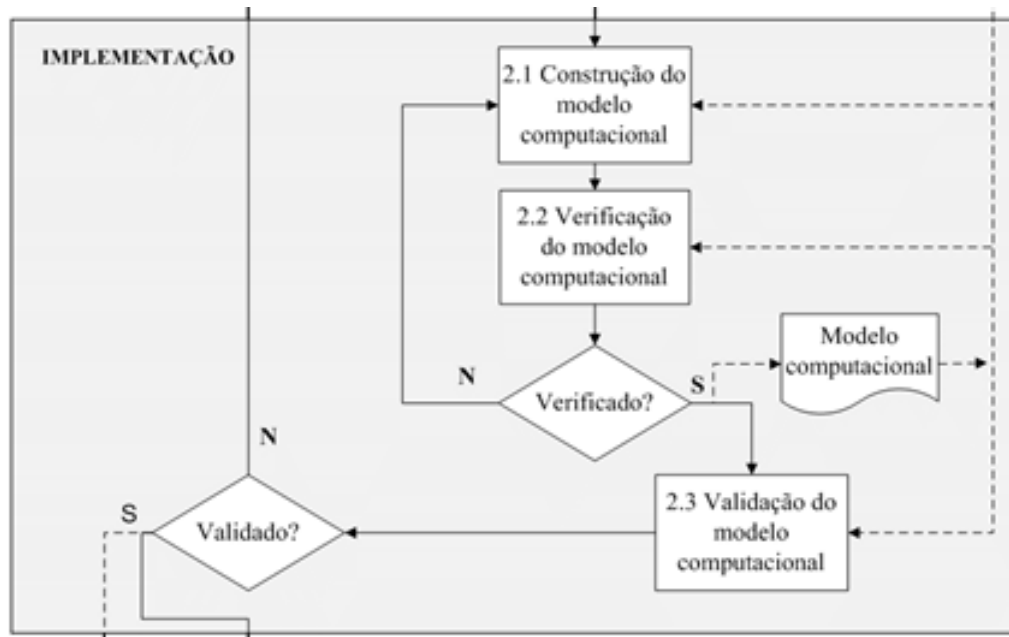


Figura 7 – Fase de Implementação de um projeto de SED
Fonte: Adaptado de Montevechi *et al.* (2010)

O bloco “2.1 Construção do modelo computacional” corresponde à codificação do modelo em um software de simulação, como *FlexSim*, *Arena* ou *AnyLogic*. Nessa etapa, são implementadas as entidades, recursos, eventos e regras de decisão definidas anteriormente, além da parametrização dos dados de entrada. Estudos recentes destacam que a fidelidade dessa implementação é essencial para que o modelo computacional mantenha coerência com o modelo conceitual validado (Borsi *et al.*, 2023).

O bloco “2.2 Verificação do modelo computacional” refere-se à verificação do modelo, cujo objetivo é assegurar que o modelo computacional foi construído corretamente do ponto de vista lógico e computacional. A verificação busca responder à pergunta: “o modelo foi implementado corretamente?”. As metodologias contemporâneas de verificação e validação de modelos de simulação, destacadas por Corlu *et al.* (2023), incluem técnicas como inspeções, testes estruturais e métodos de análise de consistência, destacando a importância de alinhar as etapas de verificação com os objetivos do estudo e a disponibilidade de dados.

Após a verificação, o bloco “2.3 Validação do modelo computacional” trata da validação do modelo computacional frente ao sistema real. Nessa etapa, os resultados da simulação são comparados com dados históricos ou observações reais, avaliando se o modelo reproduz adequadamente o comportamento do sistema. Estudos recentes enfatizam que a validação de modelos de simulação orientados por dados deve considerar não apenas o modelo computacional em si, mas também o modelo conceitual e os dados de entrada que o sustentam, assegurando que estes representam adequadamente as características e variabilidade do sistema real. Nesse contexto, Friederich e Lazaroval-Molnar (2023) destacam que a validação de dados e do modelo conceitual é um passo crítico para garantir a confiabilidade das análises e a relevância prática das conclusões de estudos de simulação.

3.5 Etapa da Análise

Por fim, na fase de Análise, o processo se inicia a partir do modelo operacional validado, avançando para a definição do plano experimental. Nesse momento, são estabelecidos os experimentos a serem realizados, incluindo a seleção das variáveis de interesse, a determinação dos cenários de teste e a escolha dos indicadores de desempenho que permitirão avaliar os resultados. Em seguida, ocorre a execução dos experimentos, etapa em que o modelo computacional é submetido a diferentes condições previamente definidas, gerando dados de saída relevantes para o estudo.

Os resultados obtidos passam então pela análise estatística, fundamental para interpretar adequadamente as informações produzidas pela simulação, identificar padrões, validar hipóteses e quantificar a confiabilidade das conclusões. Por fim, a fase é concluída com a sintetização dos achados do estudo e oferecem subsídios para a tomada de decisão, seja no sentido de validar melhorias propostas, otimizar processos ou apoiar estratégias organizacionais.

3.5.1 Sequências da Análise

A Figura 8 sintetiza a fase de Análise de um projeto de SED, segundo Montevechi *et al.* (2010).

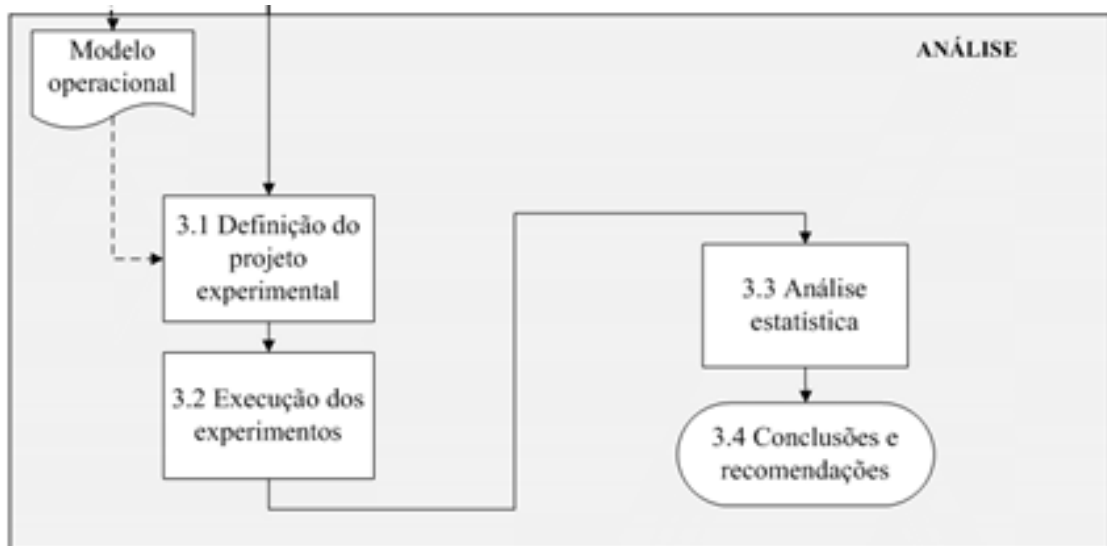


Figura 8 – Fase de Análise de um projeto de SED

Fonte: Adaptado de Montevechi *et al.* (2010)

O bloco “3.1 Definição do modelo experimental” trata do planejamento dos experimentos de simulação, incluindo a definição do número de réplicas, períodos de aquecimento, cenários a serem avaliados e variáveis de resposta. A validação de modelos de simulação inclui não só o modelo computacional, mas também os artefatos conceituais e seus aspectos estruturais, devendo ser feita de forma sistemática para garantir credibilidade e robustez dos resultados obtidos (Wilsdorf *et al.*, 2024; Friederich; Lazarova-Molnar, 2023). Além disso, as metodologias contemporâneas de verificação e validação enfatizam que as técnicas escolhidas, incluindo inspeções, análise de consistência, e comparação com dados observados, dependem da clareza do modelo conceitual e da definição experimental, sendo essenciais para assegurar que o modelo implementado representa adequadamente o sistema real e seja confiável para apoiar decisões (Corlu *et al.*, 2023).

Em seguida, o bloco “3.2 Execução dos experimentos” corresponde à execução das simulações conforme o plano experimental definido. Nessa etapa, o modelo é submetido a diferentes configurações e condições operacionais, permitindo a análise do impacto de decisões como alterações de capacidade, políticas de estoque ou regras de priorização (Zhang *et al.*, 2022).

O bloco “3.3 Análises estatísticas” envolve a análise estatística dos resultados obtidos, incluindo estimativas de médias, intervalos de confiança e testes de hipóteses. Essa análise é fundamental para distinguir variações aleatórias de efeitos reais decorrentes das mudanças simuladas. Conforme destacado por Robinson (2020), a ausência de análise estatística rigorosa compromete o valor científico e prático da simulação.

Por fim, o bloco “3.4 Conclusões e recomendações” sintetiza os resultados do estudo e traduz os achados da simulação em recomendações práticas para o sistema real. Essa etapa conecta o modelo analítico ao processo decisório organizacional, reforçando o papel da simulação como ferramenta estratégica de apoio à gestão.

4 APLICAÇÃO

A aplicação é composta pelas etapas de Concepção, Implementação e Análise citadas anteriormente (Figura 4), composta por uma sequência estruturada de atividades, conforme representado nas Figuras 6, 7 e 8 respectivamente: Fase de Concepção de um projeto de SED, Fase de Implementação de um projeto de SED e Fase de Análise de um projeto de SED. Inicialmente, são definidos os objetivos e delimitado o sistema em estudo, prosseguindo-se com a elaboração do modelo conceitual. Em seguida, o modelo computacional é desenvolvido verificado e validado, e, por fim, realizam-se as análises experimentais pertinentes.

4.1 Fase de Concepção

A fase de concepção trata da primeira etapa ilustrada pela Figura 6 e busca apresentar os objetivos e definições do sistema, o modelo conceitual e suas etapas de construção, validação do modelo construído, documentação do modelo conceitual e preparação dos dados de entrada para a próxima etapa de implementação.

4.1.1 Objetivos e definição do sistema

Primeiramente, foi analisado o fluxo de definição das metas de produção do produto (Figura 9). A empresa analisada possui um ciclo de planejamento S&OP (*Sales and Operations Planning*) pautado em: recebimento da demanda prevista comercial, geração de um plano mestre de produção no horizonte de 12 meses em que é contemplada a necessidade de pedidos que estão pendentes para serem entregues, previsão de vendas e atendimento de estoque estratégico, a partir deste plano medidas fabris são adotadas para alinhamento do plano estratégico no âmbito operacional.

A linha de produção analisada é uma linha estratégica para o posicionamento da marca de maneira internacional e no momento desta pesquisa é capaz de produzir 24 equipamentos/dia dividido em duas linhas de produção, que são projetadas para produzir 12 equipamentos/dia cada uma, é previsto um aumento de necessidade de produção para atendimento da demanda e do estoque de 32 equipamentos/dia nos próximos meses, podendo chegar a 36 equipamentos/dia.

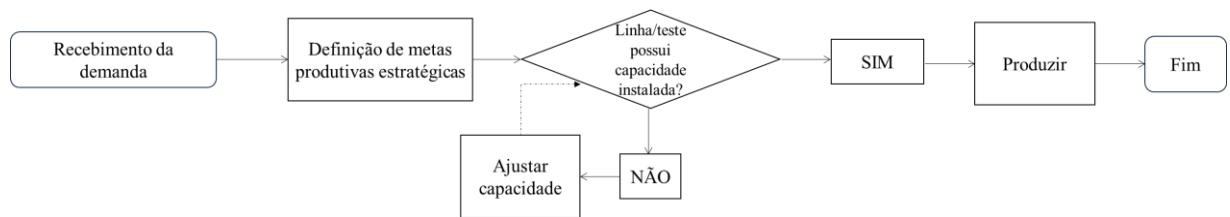


Figura 9 – Fluxo de definição de metas produtivas
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

O processo de fabricação atualmente possui capacidade máxima de 36 equipamentos/dia em todas as etapas, exceto no teste, havendo como hipótese mais cotada entre os gestores a inclusão de um teste adicional para garantia do atendimento da demanda solicitada pelo plano estratégico.

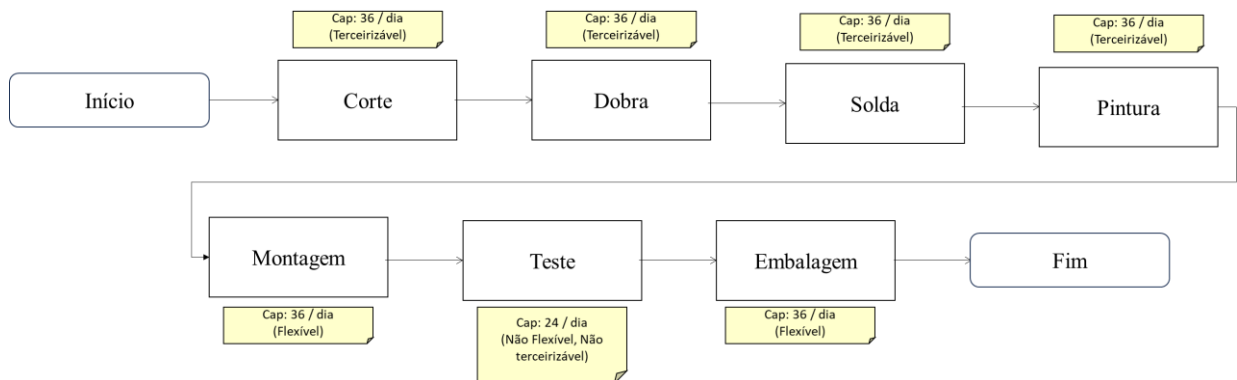


Figura 10 – Etapas da produção
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Graficamente a Figura 11 representa como seria a capacidade atual *versus* as capacidades previstas reais e otimistas, o cenário de metas esperadas no prazo de 12 meses pode oscilar entre o real e o previsto.



Figura 11 – Comparativo de capacidades do posto de teste
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

As etapas realizadas em cada um dos testes são distintas quanto a ordem de execução e atividades pois contam com diferentes produtos sendo processados, porém, entre os produtos há atividades exclusivas e comuns.

Os dois testes possuem habilidades e maquinários para executar os testes dos dois modelos, e a estratégia que será adotada é a produção dedicada de cada linha para um modelo. A hipótese era de que a implementação de um teste exclusivo para esses produtos promoveria maior especialização da equipe, permitindo que os colaboradores desenvolvessem conhecimento técnico mais aprofundado e adquirissem maior proficiência na operação dos equipamentos envolvidos no processo produtivo.

Desta forma na fase de concepção, o primeiro passo foi entender e mapear o processo produtivo da empresa. Foram feitas observações diretas na etapa de teste, entrevistas com operadores e análise dos dados históricos fornecidos pela empresa. Com base nessas informações, foi possível identificar os principais fluxos de trabalho e os pontos críticos que poderiam afetar a produtividade, como o desbalanceamento entre as capacidades da linha de teste e os tipos de modelo testados. A informação da diferença entre tempos conforme o modelo que estava sendo testado era apenas uma percepção geral e será analisado com obtenção de dados e simulações.

As informações presentes no sistema, não estavam acuradas conforme era preciso com apontamentos de finalização acumulados ao final do mês e sem a percepção de confiáveis pela parte do gestor da linha, portanto, foi feita uma cronoanálise baseada nas etapas mapeadas para cada teste.

4.1.2 Construção do modelo conceitual

A modelagem conceitual do processo foi realizada utilizando o mapeamento IDEF-SIM, apresentada por Leal, Almeida e Montevechi (2008), sendo utilizada para melhor compreensão do processo analisado para posterior análise em SED, visto que se aproxima das necessidades de informações para o modelo computacional.

O processo modelado no IDEF-SIM da Figura 12 apresenta todas as etapas que compõe a fase de teste, objeto de pesquisa deste trabalho. Iniciando com a chegada dos equipamentos no teste, sendo a montagem sua etapa antecessora, as etapas iniciais de regulagem da porta e teste de isolamento são feitas de maneiras subsequentes e preparam o equipamento para as

etapas em paralelo (teste de tração e ajuste nos cabos), esta é a fase de teste que finaliza a montagem/organização dos componentes elétricos.

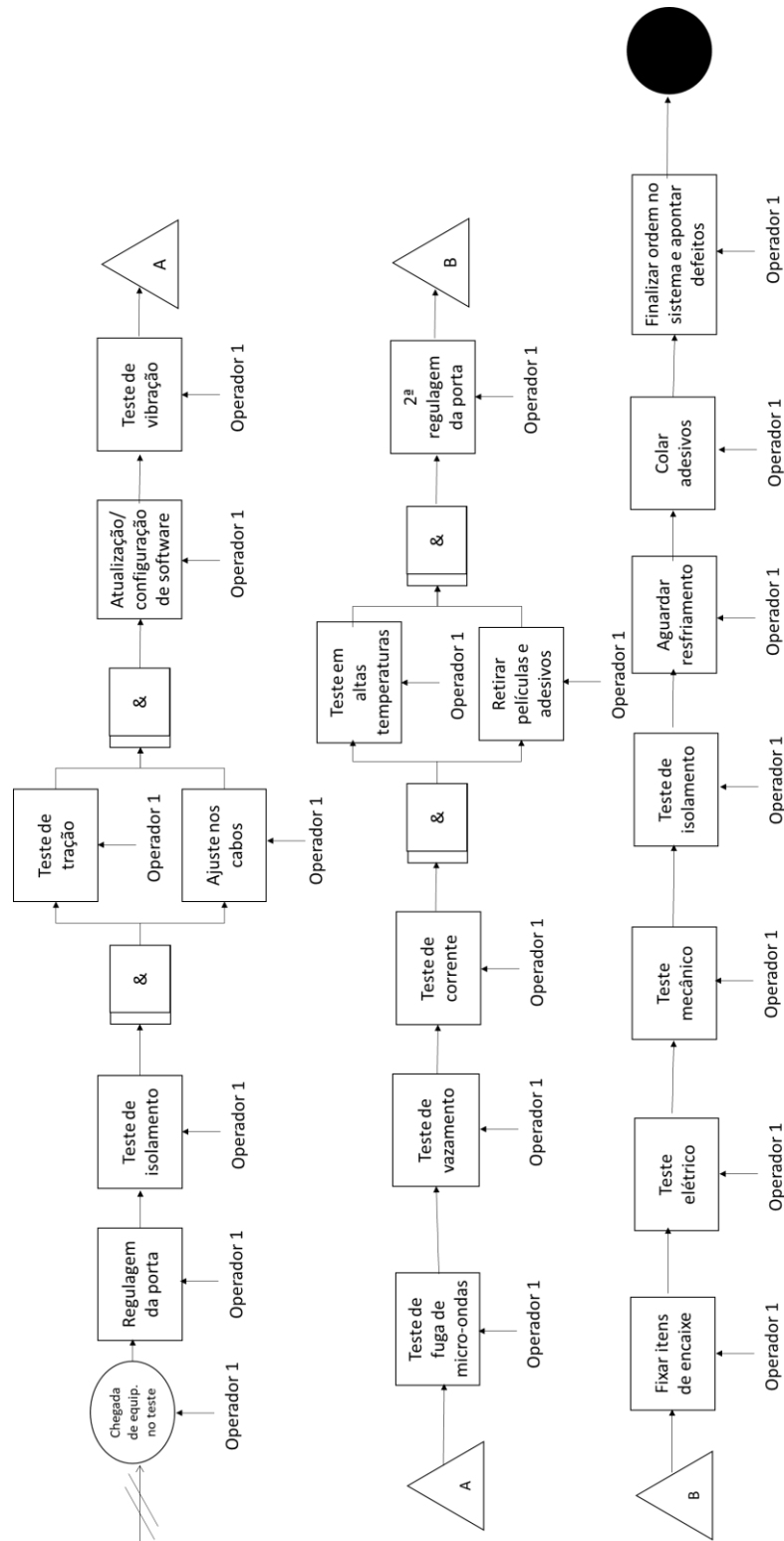


Figura 12 – Modelo conceitual de SED
Fonte: Própria, autor.

Em seguida, são feitas as etapas de atualização e configuração de software, desta forma o equipamento segue para testes em relação a sua funcionalidade elétrica e física que são feitos de maneira subsequente: teste de fuga de micro-ondas, teste de vazamento e teste de corrente. Passado pelos testes de funcionalidade ele o equipamento está pronto para ser aquecido pela primeira vez, e enquanto se aquece são feitas as etapas de finalização estética (retirada de película e adesivos).

Finalizado o teste de altas temperaturas e feita a finalização estética é feita a 2ª regulagem da porta, encaixes finais, teste elétrico, teste mecânico, teste de isolamento e estando o equipamento ainda não totalmente resfriado após o teste de altas temperaturas é preciso esperar seu resfriamento total para seguir com a adesivagem, finalizada a adesivagem todos os testes foram feitos e será apontado finalização no sistema e os defeitos, caso tenham ocorrido.

O processo de teste acontece com 1 técnico operador do início ao fim, o equipamento fica parado e os itens de teste necessários estão dispostos à menos de 1m de distância. Há duas áreas de testes que estão dispostas cada uma no final de uma linha de produção, ambas linhas (linha 1 e linha 2) podem abastecer a área de teste onde devem estar dispostos os equipamentos que aguardam o início do teste, e, os equipamentos da linha 1 e 2 podem abastecer quaisquer testes.

4.1.3 Modelagem dos dados de entrada

Os dados utilizados foram baseados em observação direta. Todo o processo foi acompanhado detalhadamente para compreender as micro-tarefas que o compõem. Após o mapeamento das etapas, elaborou-se uma ficha de coleta de dados, e os tempos de cada etapa de teste foram medidos manualmente (Quadro 3).

De posse das amostras de tempo, utilizou-se o software *ExpertFit*, disponível no *FlexSim*, para identificar as distribuições estatísticas que melhor se ajustam a cada conjunto de dados coletados.

Segundo Nelson, Wan e Staum (2021), a modelagem de dados de entrada é uma das etapas mais críticas da simulação, pois é nela que se traduzem os elementos estocásticos do sistema com base em dados reais limitados. A escolha da distribuição adequada e de seus parâmetros influencia diretamente a acurácia e a credibilidade dos resultados simulados, sendo

recomendável testar múltiplas distribuições e comparar a qualidade do ajuste antes de selecionar o modelo final.

Quadro 3 – Parâmetros das distribuições calculadas

Atividade	EXPERT FIT (L1)	EXPERT FIT (L2)
1	exponential(0.01077, 0.01590, getstream(current))	
2		johnsonbounded(0.09089, 0.32259, 0.4968, 0.68040, getstream(current))
3		exponential(0.01077, 0.01590, getstream(current))
4		johnsonbounded(0.00601, 0.37586, -0.46473, 0.70674, getstream(current))
5	gamma(0.07554, 0.02370, 1.34857, getstream(activity))	beta(0.00150, 0.12107, 2.42040, 1.76870, getstream(activity))
6	johnsonbounded(0, 0.03003, 0.20552, 0.12401, getstream(activity))	johnsonbounded(0.01852, 0.19699, 1.31120, 1.16489, getstream(activity))
7	beta(0.03309, 0.04589, 1.8306, 0.38305, getstream(activity))	
8		gamma(0.0, 0.01997, 2.86826, getstream(current))
9		weibull(0, 0.0468, 2.74870, getstream(current))
10	pareto(0.01379, 2.25648, getstream(current))	pareto(0.01379, 2.25648, getstream(current))
11		exponential(0.00686, 0.03148, getstream(current))
12	exponential(0.00773, 0.02248, getstream(current))	exponential(0.00773, 0.02248, getstream(current))
13		johnsonbounded(0.01887, 0.08342, 0.34537, 0.46991, getstream(current))
14	johnsonbounded(5.73457, 0.07231, -0.18963, 1.10338, getstream(current))	johnsonbounded(5.73457, 0.07231, -0.18963, 1.10338, getstream(current))

15	loglaplace(0.0, 0.25000, 3.01693, getstream(activity))	weibull(0.0, 0.05613, 2.81517, getstream(activity))
16	johnsonbounded(0.02844, 0.12430, 0.33038, 0.75123, getstream(current))	
17		johnsonbounded(0.02844, 0.12430, 0.33038, 0.75123, getstream(current))
18		pareto(0.07837, 6.05241, getstream(current))
19	johnsonbounded(0.12578, 0.69817, 1.38849, 0.85556, getstream(current))	johnsonbounded(0.12578, 0.69817, 1.38849, 0.85556, getstream(current))
20	johnsonbounded(0.01029, 0.07018, 0.19915, 0.66771, getstream(current))	johnsonbounded(0.01029, 0.07018, 0.19915, 0.66771, getstream(current))
21		johnsonbounded(0.06174, 0.12857, 0.53900, 1.34743, getstream(current))
22	pareto(0.06305, 6.89194, getstream(current))	pareto(0.06305, 6.89194, getstream(current))
23	erlang(0.00729, 0.01719, 2.0, getstream(current))	
24	erlang(0.00729, 0.01719, 2.0, getstream(current))	erlang(0.00729, 0.01719, 2.0, getstream(current))
25	loglaplace(0.0, 0.28333, 5.84318, getstream(current))	loglaplace(0.0, 0.28333, 5.84318, getstream(current))
26	exponential(0.01175, 0.01908, getstream(current))	
27	exponential(0.01175, 0.01908, getstream(current))	exponential(0.01175, 0.01908, getstream(current))
28	exponential(0.00866, 0.02348, getstream(current))	

Fonte: Própria, autor.

Em relação ao turno de trabalho, a etapa de teste utiliza o turno administrativo 7:30h às 17:18h de segunda-feira a sexta-feira.

4.2 Fase de implementação

Na fase de implementação a construção do modelo computacional é feita, verificada, validada e assim será parte fundamental para auxílio na etapa de análise. No caso deste trabalho a implementação será feita no *software FlexSim*, mas, poderia ter sido feita em *softwares* diferentes que permitem o uso da SED.

4.2.1 Construção do modelo computacional

Na fase de implementação, o processo de produção foi implementado no *software FlexSim* que permite construir representações gráficas e lógicas do sistema real para representar as etapas de montagem, teste e fluxos intermediários. A Figura 13 demonstra o *layout* do processo simulado, com a representação gráfica das operações e dos recursos envolvidos.



Figura 13 – Linha de produção simulada no FlexSim®
Fonte: Própria, autor.

A modelagem do processo contempla montagem e teste, com foco no teste. Nesta simulação o processo inicia com a simulação do equipamento entrando na linha de montagem, seguindo para teste e armazenamento. Há no modelo duas linhas de montagem com 8 postos em cada linha, seguidas de postos de teste, que são fisicamente próximos. Ao todo são 8 postos de teste, que podem ser abastecidos por ambas as linhas. A modelagem considerou também a variabilidade dos processos, como a diferença nos tempos de montagem de diferentes tipos de equipamentos. O modelo foi ajustado para refletir fielmente o sistema real, de modo que os resultados das simulações pudessem ser usados para identificar gargalos e sugerir melhorias.

Além disso, o modelo 3D se faz necessário para a melhor compreensão.

Foi usado o *Process Flow* para auxílio na construção do modelo, que contém os itens, as instruções e o processo de teste.

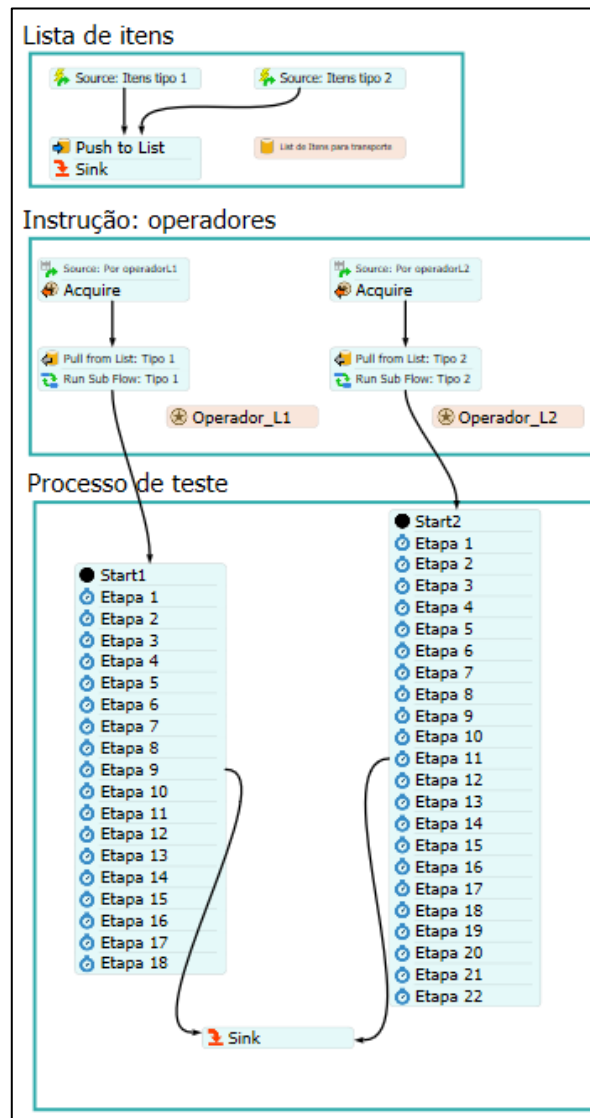


Figura 14 – *Process Flow*
Fonte: Própria, autor.

4.2.2 Verificação e validação do modelo computacional

Para a validação do modelo, foram testados os tempos coletados por meio da crono análise, que representam as etapas do processo produtivo. Como os dados não apresentaram normalidade, procedeu-se com a validação utilizando testes não paramétricos.

Assim, a análise de probabilidade foi realizada para verificar a distribuição dos dados reais e simulados. Como ilustrado na Figura 15 e na Figura 16, ambos os conjuntos de dados apresentam desvios significativos em relação à normalidade, justificando o uso de testes estatísticos não paramétricos para validação do modelo.

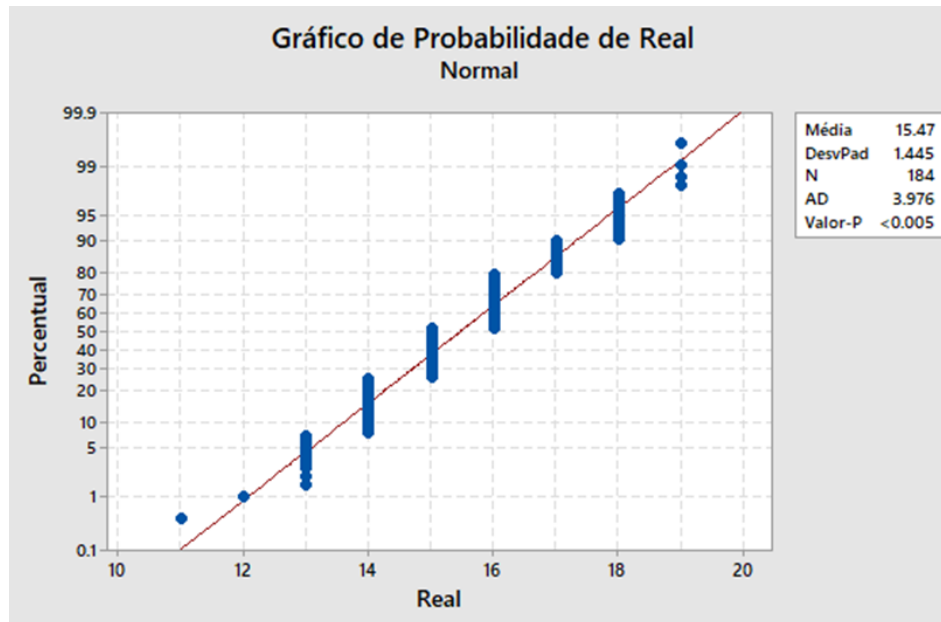


Figura 15 – Gráfico de probabilidade dos dados reais
Fonte: Própria, autor.

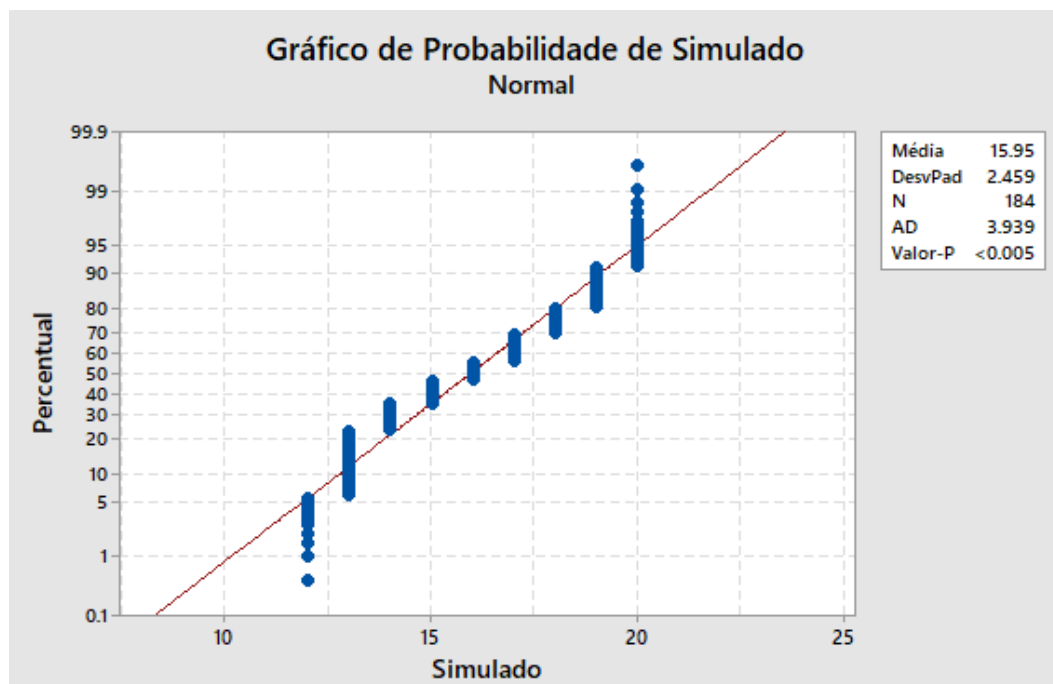


Figura 16 – Gráfico de probabilidade dos dados simulados
Fonte: Própria, autor.

No teste de normalidade, considera-se como hipótese nula (H_0) que os dados seguem uma distribuição normal, enquanto a hipótese alternativa (H_1) afirma que os dados não seguem uma distribuição normal. A regra de decisão baseia-se no *p-value*: quando *p-value* > 0,05, não se rejeita H_0 , indicando que os dados podem ser considerados normalmente distribuídos; por outro lado, quando *p-value* ≤ 0,05, rejeita-se H_0 , indicando que os dados não apresentam distribuição normal. No caso analisado, observou-se que *p-value* < 0,005 para a linha 1 e para a linha 2. Portanto, a hipótese nula é rejeitada, concluindo-se que os dados não seguem uma distribuição normal.

Nesse trabalho, o modelo de simulação foi validado seguindo o *framework* ilustrado na Figura 15, que descreve as principais etapas do processo de validação em estudos de simulação. Conforme apresentado na Figura 17, as etapas envolvem desde a coleta de dados até a comparação com os valores reais.

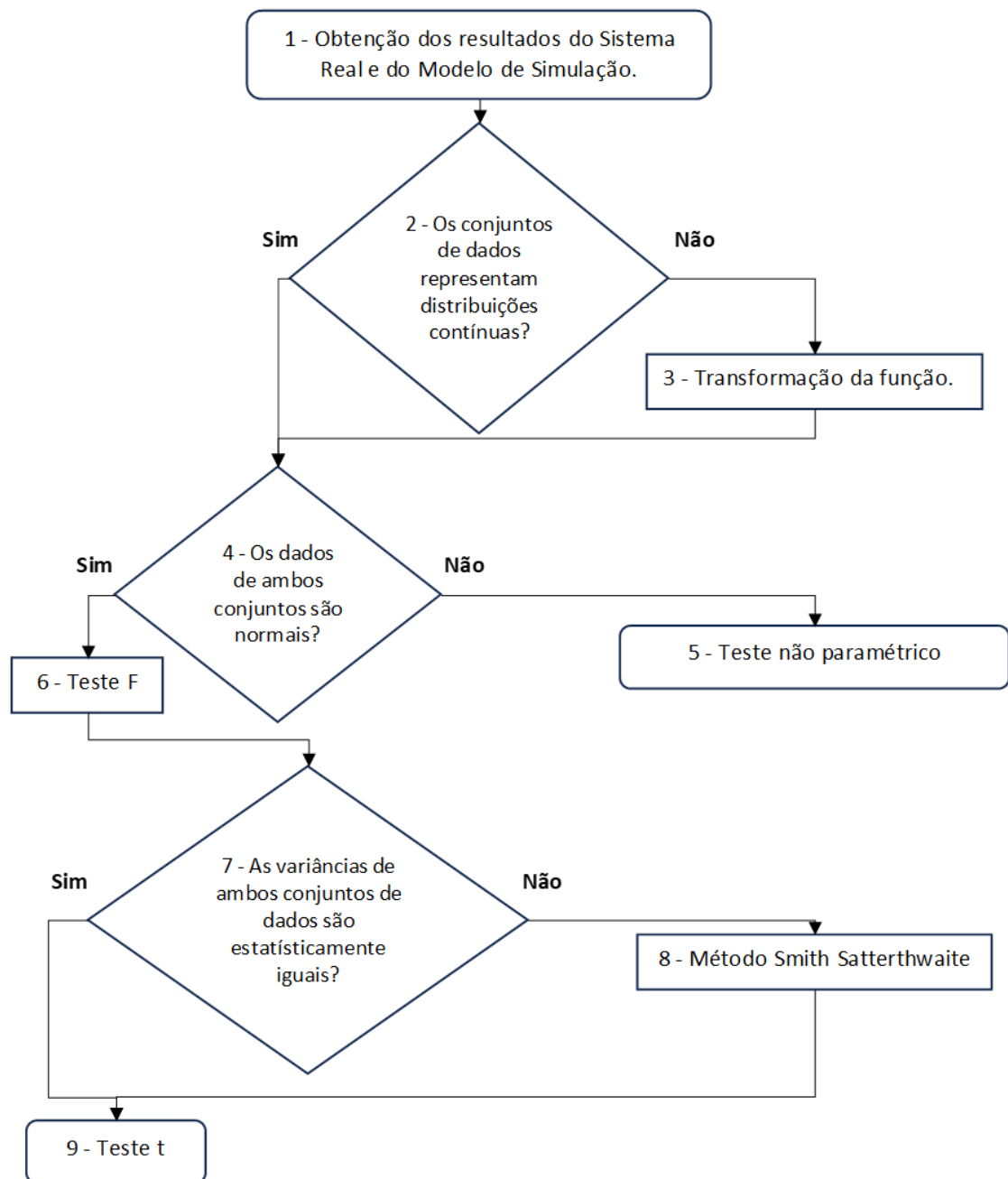


Figura 17 – Fluxograma traduzido do *framework* da validação de modelos de simulação.
 Fonte: Adaptado de Leal *et al.* (2011).

Foi realizado um teste específico para dados não paramétricos, o teste de Mann Whitney. Segundo Leal, Silva e Sopelete (2005), o teste de Mann–Whitney é indicado para verificar se dois grupos independentes apresentam diferenças estatisticamente significativas ou se podem ser considerados provenientes da mesma população. Sua aplicação requer que os dados estejam ao menos em escala ordinal, uma vez que o procedimento se baseia no ranqueamento das observações. Trata-se de um dos testes não paramétricos mais robustos e sensíveis, sendo

amplamente utilizado como alternativa ao teste t para amostras independentes quando os pressupostos de normalidade não são atendidos. Em determinadas situações, o teste de Mann–Whitney pode inclusive apresentar maior poder estatístico para rejeição da hipótese nula em comparação ao teste t.

O teste de Mann–Whitney segue a seguinte interpretação do *p-value* na comparação entre Dados Simulados e Reais

- *p-value* < 0,05: Um *p-value* menor que 0,05 (considerando o nível de significância comum de 5%) sugere que há uma diferença estatisticamente significativa entre o valor simulado e o valor real. Isso significa que a discrepância observada é grande o suficiente para que seja improvável que os dois conjuntos de dados tenham a mesma origem, sugerindo que o modelo simulado não está representando fielmente o sistema real.
- *p-value* ≥ 0,05: Um *p-value* maior ou igual a 0,05 sugere que não há uma diferença estatisticamente significativa entre os dados reais e simulados. Isso implica que qualquer diferença observada pode ser explicada pelo acaso, e, portanto, o modelo simulado pode ser considerado uma representação aceitável da realidade.

Identificou-se que o *p-value* encontrado no teste não-paramétrico é maior que 0,05, indicando que não há diferença estatisticamente significativa entre os dados simulados e os dados reais. Assim, o modelo foi validado estatisticamente, mostrando que representa adequadamente o sistema real. Essa validação é fundamental para assegurar a confiabilidade dos resultados subsequentes.

Com base na análise inicial, foi aplicado o teste não paramétrico para a Linha 1. Os resultados obtidos, apresentados na Tabela 1, indicam que o *p-value* encontrado é maior que 0,05, validando o modelo simulado para essa linha de produção. De forma semelhante, o teste não paramétrico foi realizado para a Linha 2. Na Tabela 1 estão os resultados obtidos, reforçando que não há diferenças significativas entre os dados reais e simulados. De maneira a consolidar em tabela os valores reais e simulados foi feita a Tabela 1 de comparação.

Tabela 1 – Teste de Mann-Whitney (Real vs. Simulado)

1. Método	LINHA 1		LINHA 2	
Descrição	Valor		Valor	
η_1	Mediana de Real		Mediana de Real	
η_2	Mediana de Simulado		Mediana de Simulado1	
Diferença	$\eta_1 - \eta_2$		$\eta_1 - \eta_2$	
2. Estatísticas Descritivas	LINHA 1		LINHA 2	
Amostra	N	Mediana	N	Mediana
Real	184	15	367	11
Simulado	184	16	367	11
3. Estimativa da Diferença	LINHA 1		LINHA 2	
Diferença	IC para a diferença	Confiança atingida (%)	IC para a diferença	Confiança atingida (%)
-0,0000000	(-1; 0,0000000)	95,01	(0,0000000; 0,0000000)	95,00
4. Teste	LINHA 1		LINHA 2	
Hipótese	Formulação		Formulação	
Hipótese nula (H_0)	$\eta_1 - \eta_2 = 0$		$\eta_1 - \eta_2 = 0$	
Hipótese alternativa (H_1)	$\eta_1 - \eta_2 \neq 0$		$\eta_1 - \eta_2 \neq 0$	
5. Resultados do Teste	LINHA 1		LINHA 2	
Método	Valor W	Valor-p	Valor W	Valor-p
Não ajustado para empates	32317,00	0,110	134727,50	0,960
Ajustado para empates	32317,00	0,106	134727,50	0,960

Fonte: Própria, autor.

Assim, sob a perspectiva estatística, o modelo pode ser considerado validado, uma vez que reproduz de maneira consistente o comportamento do sistema real dentro do nível de confiança estabelecido.

4.3 Fase de análise

Esta fase diz respeito à última fase da modelagem segundo o *framework* proposto por Montevechi *et al.* (2010), passa pela operacionalização do modelo, definindo os cenários e executando-os. Posteriormente, as análises estatísticas são feitas e assim obtêm-se as conclusões e recomendações.

4.3.1 Definição do projeto

Após a validação do modelo computacional, foram definidos cenários experimentais com o objetivo de avaliar alternativas para o aumento da capacidade produtiva da linha estudada. A elaboração desses cenários foi baseada na análise do fluxo produtivo e dos indicadores obtidos durante a etapa de modelagem, que permitiram identificar a etapa de testes como principal restrição do sistema.

O cenário inicial, denominado Cenário 0, representa a situação atual da operação e foi utilizado como referência para comparação dos demais cenários. A partir da análise detalhada das atividades realizadas na etapa de testes, observou-se que parte significativa do tempo era consumida pela atividade de ajuste da porta do equipamento. Essa atividade não agrega valor ao processo de testes, pois consiste na correção de uma não conformidade originada durante a montagem.

Com base nessa observação, foi proposto o Cenário 1, no qual a atividade de ajuste da porta foi eliminada da etapa de testes, assumindo-se que o problema passaria a ser resolvido na sua origem, durante o processo de montagem. Espera-se que a remoção dessa atividade reduza o tempo médio de permanência dos equipamentos na etapa de testes, aumentando a capacidade produtiva sem a necessidade de investimentos em infraestrutura ou recursos adicionais.

Apesar da expectativa de melhoria proporcionada pelo Cenário 1, a análise preliminar indicou que a etapa de testes poderia continuar atuando como restrição do sistema. Dessa forma, foi proposto o Cenário 2, que incorpora a melhoria prevista no Cenário 1 e adiciona um posto de teste em cada linha de produção. A hipótese avaliada nesse cenário é que o aumento da capacidade disponível na operação restritiva permita elevar significativamente o volume produzido, possibilitando o atendimento da demanda projetada e a superação das metas produtivas estabelecidas pela organização.

A comparação entre os cenários permite avaliar não apenas os ganhos decorrentes da eliminação de atividades que não agregam valor, mas também os benefícios associados à ampliação da capacidade produtiva. Dessa forma, torna-se possível identificar qual estratégia apresenta maior potencial de melhoria e quais intervenções são mais adequadas para aumentar o desempenho global do sistema.

4.3.2 Definição do projeto e execução dos cenários

Sendo o objetivo geral deste trabalho projetar a etapa de teste através do uso de um modelo de SED é necessário efetivar este projeto agora com todo o sistema de teste modelado conceitualmente e computacionalmente.

Portanto, o primeiro cenário proposto foi eliminar esta etapa que não é necessária. Retirando esta etapa foi possível observar que a capacidade de produção obteve um aumento, visto que esta era uma das atividades que despendia maior tempo no teste. Sendo possível alcançar a marca da meta projetada inicialmente de 32 equipamentos por dia, se aproximando, mas sem alcançar a meta otimista de 36 equipamentos por dia.

Na Tabela 2 apresenta-se uma amostragem comparativa das taxas obtidas com a simulação da capacidade atual, chamada de “Cenário 0” e a capacidade sem a execução da atividade de ajuste, chamada de “Cenário 1”.

Tabela 2 – Dados Cenário 0 X Cenário 1

Cenários:	Cenário 0			Cenário 1		
Descrição:	Simulado - Cenário atual			Simulado - Cenário SEM ATIVIDADE DE AJUSTE		
DIA	Teste 1	Teste 2	TOTAL	Teste 1	Teste 2	TOTAL
Dia 1	14	10	24	20	14	34
Dia 2	14	11	25	20	15	35
Dia 3	12	13	25	20	15	35
Dia 4	14	12	26	21	16	37
Dia 5	13	12	25	18	16	34
Dia 6	14	12	26	21	19	40
Dia 7	12	12	24	20	15	35
Dia 8	13	12	25	21	17	38
Dia 9	14	11	25	20	16	36
Dia 10	13	13	26	21	14	35
Dia 11	14	11	25	18	16	34
Dia 12	14	12	26	20	12	32
Média	13	12	25	20	15	35

Fonte: Própria, autor.

Analisando os dados obtidos na comparação do Cenário 0 com o Cenário 1, pode-se observar que a média do total produzido aumenta em cerca de 41%, cerca de 10 unidades em 12 dias. Ao realizar a análise de forma financeira significa cerca de R\$ 240.000,00 de faturamento para a empresa a cada 12 dias (preço médio de venda R\$24.000,00). No ano com 250 dias úteis de produção, significa R\$ 5.000.000,00.

O segundo cenário incluiu a melhoria proposta pelo primeiro cenário em conjunto com o aumento da capacidade do teste das duas linhas e neste modelo foi possível alcançar cerca de 54 equipamentos por dia em média, como é possível observar na Tabela 3 a amostra de 12 dias.

Analisando os dados obtidos na comparação Cenário 0 e Cenário 2, pode-se observar que a média do total produzido aumenta em cerca de 115%, cerca de 29 unidades em 12 dias. Ao realizar a análise de forma financeira significa cerca de R\$ 696.000,00 de faturamento para a empresa a cada 12 dias (preço médio de venda R\$24.000,00). No ano com 250 dias úteis de produção, significa R\$ 14.500.000,00.

Tabela 3 – Dados Cenário 0 X Cenário 2

Cenários:	Cenário 0			Cenário 1		
Descrição:	Simulado - Cenário atual			Simulado - Cenário SEM ATIVIDADE DE AJUSTE + AUMENTO DE CAPACIDADE DO TESTE		
DIA	Teste 1	Teste 2	TOTAL	Teste 1	Teste 2	TOTAL
Dia 1	14	10	24	26	28	54
Dia 2	14	11	25	25	28	53
Dia 3	12	13	25	25	31	56
Dia 4	14	12	26	26	34	60
Dia 5	13	12	25	23	27	50
Dia 6	14	12	26	26	31	57
Dia 7	12	12	24	24	28	52
Dia 8	13	12	25	28	27	55
Dia 9	14	11	25	25	30	55
Dia 10	13	13	26	25	28	53
Dia 11	14	11	25	23	31	54
Dia 12	14	12	26	24	27	51
Média	13	12	25	25	29	54

Fonte: Própria, autor.



Figura 18 – Configuração da linha de produção após a adição de um posto de trabalho no FlexSim®.
Fonte: Própria, autor.

Portanto, adicionalmente ao primeiro cenário proposto foi eliminando esta etapa que não é necessária e incluso 1 posto de teste adicional em cada linha. A capacidade de produção teve um aumento de cerca de 115%. Sendo possível alcançar a marca da meta otimista e excedendo em cerca de 18 equipamentos, sendo obtido este valor pela simulação permite com que a empresa, de maneira antecipada, observe qual será a estratégia visto que estoques podem ser formados apresentando assim de maneira prática o benefício do uso da simulação para apoio à tomada de decisão.

5 CONCLUSÕES

5.1 Considerações iniciais

Esta seção finaliza a dissertação, sintetizando os principais resultados alcançados ao longo do estudo, avaliando o atendimento aos objetivos específicos descritos na Seção 1.1 e indicando possíveis direções para pesquisas futuras.

5.2 Conclusões e contribuições

Este trabalho apresentou a aplicação da modelagem e simulação em um ambiente produtivo industrial com o auxílio do software *FlexSIM*® para analisar gargalos, ociosidades e propor melhorias no processo produtivo. Por meio da validação estatística, utilizando o *framework* de Montevechi *et al.* (2010), foi possível verificar que os dados simulados representaram de forma adequada os dados reais, mesmo em um cenário de distribuição que não se apresenta normal.

Os resultados obtidos permitem responder à questão de pesquisa proposta neste estudo, a qual buscava compreender como a ampliação da capacidade no processo de testes influencia o desempenho de uma linha de produção de equipamentos industriais. As simulações demonstraram que intervenções nessa etapa impactam diretamente o fluxo produtivo e eleva significativamente a produtividade diária da linha. Dessa forma, confirma-se que a ampliação da capacidade do processo de testes constitui uma alternativa eficaz para melhorar o desempenho global do sistema produtivo analisado.

Na prática, os resultados destacam como a simulação pode ser utilizada como ferramenta estratégica para aumentar a produtividade e melhorar a tomada de decisões em ambientes industriais. A simulação indicou que a eliminação da atividade corretiva no processo de testes elevou a produção média para aproximadamente 35 equipamentos por dia, representando aumento de cerca de 41% em relação à condição inicial. Quando combinada com a inclusão de um novo posto de trabalho na etapa de testes, a produção média alcançou 54 equipamentos por dia, representando aumento de cerca de 115% em relação à condição inicial. Evidenciando o impacto da ampliação da capacidade sobre o desempenho do sistema produtivo.

Permitindo, portanto, ao retornar as perguntas iniciais responder de maneira afirmativa:

- Qual é o impacto da restrição identificada no desempenho global da linha de produção?

O impacto é de aumento da produção, e, a linha de produção é sensível a mudanças na etapa de teste.

- A ampliação da capacidade no processo de testes melhora o desempenho global da linha de produção?

A melhora do desempenho da linha de produção foi simulada em um ambiente validado e demonstrou aumento na taxa de produção nos cenários analisados a partir de 41%.

- Quais efeitos das alterações na etapa de teste podem gerar sobre a meta de produção?

Os efeitos gerados são positivos e podem ser validados gerando impacto real, visto que a capacidade das etapas anteriores ao teste e seguintes ao teste são terceirizáveis ou flexíveis, ou seja, o aumento da mão de obra interfere diretamente na meta da linha diferentemente do teste que havia necessidade de compra de bancadas específicas para os testes que são realizados. Esta análise se deve ao rigor metodológico que foi seguido do *framework* proposto por Montevechi *et al.* (2010).

Assim, este trabalho contribui não apenas para a melhoria da operação analisada, mas também para o avanço metodológico no uso de simulação para resolução de problemas industriais.

5.3 Verificação do objetivo principal

Sendo o objetivo principal a pesquisa investigar, por meio da SED, alternativas para melhoria da capacidade de uma linha de produção de equipamentos industriais, foi atingido o objetivo, uma vez que a aplicação da SED permitiu investigar alternativas de ampliação da capacidade do processo de testes e avaliar seus impactos sobre o desempenho do sistema produtivo. É possível, ainda, destacar que foi possível experienciar todos os benefícios observados na literatura. Alguns dos benefícios observados são experimentação segura e de baixo risco, permitindo aceitação facilitada pela empresa alvo da pesquisa, pois não gerou custos altos nem gera a dependência de orçamentos extra e não interferiu no sistema real, evitando impactos negativos na produção. Sendo vista apenas como análise positiva e bem aceita.

Em relação aos resultados obtidos foi possível experienciar também o benefício da robustez. Como a modelagem incorpora variáveis estocásticas para representar a variabilidade real do sistema, os resultados obtidos nos relatórios tendem a apresentar maior robustez e aderência ao comportamento operacional observado quando comparados aos métodos tradicionais de cálculo utilizados no dimensionamento de recursos, que normalmente se baseiam em premissas determinísticas e simplificadas.

Por fim, as saídas do software utilizada eram de fácil extração, compreensão e análise sendo uma fonte confiável para o apoio na tomada de decisão de melhorias que culminaram na melhoria da produção de fato, tendo como base o modelo gerado através da SED, aplicada de maneira coordenada pelo *framework* amplamente utilizado proposto por Montevechi *et al.* (2010) neste caso utilizando do software *FlexSim* que permitiu a aplicação da SED.

5.4 Verificação dos objetivos específicos

Esta seção da dissertação encerra a análise dos objetivos específicos descritos no item 1.3. Para contemplá-los e verificar a hipótese estabelecida, foram definidos e considerados os seguintes objetivos específicos:

1. Construir um modelo de simulação representativo do sistema produtivo atual, utilizando a SED;

A construção do modelo foi validada na seção 4.2.2 onde foi possível a verificação de que o modelo é condizendo com a realidade através da etapa de implementação, onde é validado o modelo. Este demonstrou que a representação desenvolvida é estatisticamente aderente ao sistema produtivo real. A partir dos tempos obtidos por meio da cronoanálise das etapas do processo, realizou-se inicialmente a análise de normalidade, constatando-se que os dados reais e simulados não apresentavam distribuição normal, conforme evidenciado nos gráficos de probabilidade das Linhas 1 e 2 (Figuras 17 e 18).

Diante dessa característica estocástica, optou-se pela aplicação de testes não paramétricos, em consonância com o *framework* de validação adotado (adaptado de Leal *et al.*, 2011). Os testes de Mann-Whitney aplicados às duas linhas de produção indicaram *p-values* superiores a 0,05, evidenciando que não há diferença estatisticamente significativa entre os dados reais e simulados. Dessa forma, conclui-se que o modelo apresenta consistência

estatística e capacidade de reproduzir adequadamente o comportamento do sistema real, conferindo confiabilidade técnica aos resultados e às análises subsequentes realizadas no estudo. E, portanto, o objetivo específico 1 foi atingido.

2. Analisar o comportamento operacional da linha de produção, buscando identificar possíveis restrições de capacidade no fluxo produtivo;

A avaliação do impacto do aumento de capacidade do teste foi conduzida na seção 4.3, por meio da definição e execução de cenários no modelo de simulação previamente validado. A partir da identificação da etapa de teste como gargalo do sistema, através do levantamento de capacidades de todas as etapas do processo como demonstrado na Figura 8 e da simulação validada. Foi proposta a retirada de uma das etapas da produção, inicialmente, foi conduzida uma análise detalhada do processo produtivo, na qual se identificou que parte do tempo consumido na etapa de teste estava associado à correção de um erro proveniente da etapa anterior da linha de produção, relacionado ao ajuste da porta dos equipamentos. Em adicional, houve a proposta da inclusão de um posto adicional na Linhas 1 e 2, com o objetivo de analisar os efeitos dessas alterações sobre o desempenho global da linha de produção.

Com base nessa constatação, foi estruturado o primeiro cenário de simulação, no qual essa atividade corretiva foi eliminada. A inclusão de um novo posto de teste, em adicional ao primeiro cenário, foi escolhida como segundo cenário pois seria a restrição real do teste após a análise do modelo conceitual, visto que bancadas seriam necessárias para alcance de maiores taxas de produção.

Dessa forma, conclui-se que essa análise, buscando identificar possíveis restrições de capacidade no fluxo produtivo, foi possível através do rigor metodológico que foi seguido no *framework* de Montevechi *et al.*, (2010), e visto como uma resposta na dedicação em realizar a modelagem conceitual. Portanto, o objetivo específico 2 foi atendido.

3. Desenvolver cenários de simulação que representem alternativas de ampliação da capacidade no processo de testes, considerando a necessidade de atendimento das demandas futuras previstas pela empresa;

O desenvolvimento dos cenários de simulação foi realizado na seção 4.3, a partir do modelo computacional previamente validado. Inicialmente, permitida através de uma análise detalhada do processo produtivo, na etapa de modelagem conceitual.

Com base nessa constatação, foi estruturado o primeiro cenário de simulação, no qual essa atividade corretiva foi eliminada. A inclusão de um novo posto de teste foi escolhida como segundo cenário pois seria a restrição real do teste após a análise do modelo conceitual, visto que bancadas seriam necessárias para alcance de maiores taxas de produção.

Para avaliar os resultados, foram extraídos os dados simulados do cenário 1, simulando a retirada da necessidade de execução de uma etapa do processo que era retrabalho, alcançando 41% de aumento da taxa de produção e executado o cenário 2 simulando a retirada da etapa retirada no cenário 1 e incluindo um posto de teste em cada linha, alcançando 115% de aumento da taxa de produção quando comparado ao cenário inicial.

Dessa forma, os cenários desenvolvidos permitiram representar diferentes estratégias de melhoria do processo, contemplando tanto ajustes operacionais quanto alterações estruturais na capacidade do sistema, com o objetivo de avaliar a viabilidade de atendimento às demandas futuras previstas pela empresa. E, portanto, foi possível alcançar o objetivo específico 3.

4. Avaliar os efeitos dessas alterações sobre o desempenho do sistema produtivo, considerando o indicador operacional taxa de produção.

A avaliação dos efeitos das alterações propostas foi realizada por meio da análise dos resultados obtidos nas simulações dos cenários desenvolvidos.

No primeiro cenário, a eliminação da atividade corretiva associada ao ajuste da porta reduziu significativamente o tempo despendido na etapa de teste, refletindo diretamente no aumento da capacidade produtiva diária. Já no segundo cenário, a inclusão de um novo posto de trabalho nas etapas de teste promoveu um aumento ainda mais significativo no aumento da capacidade produtiva diária.

Os resultados obtidos indicam que as modificações propostas contribuem para melhorar o desempenho global do sistema produtivo, aumentando a eficiência operacional e reduzindo os impactos de gargalos no fluxo de produção. Assim, conclui-se que as alternativas avaliadas por meio da simulação demonstram potencial para elevar a produtividade da linha e proporcionar maior capacidade de atendimento à demanda, reforçando a utilidade da SED como

ferramenta de apoio à tomada de decisão em ambientes industriais. E, por fim, foi alcançado o objetivo específico 4.

5.5 Trabalhos futuros

Com o término desta dissertação, identificam-se diversas oportunidades para trabalhos futuros que podem complementar e aprofundar os resultados obtidos. Entre elas, destacam-se a análise dos impactos decorrentes de alterações estruturais no layout geral da fábrica e no layout específico da linha de produção estudada, bem como a avaliação dos efeitos de uma possível expansão física da planta industrial. Além disso, recomenda-se a investigação de restrições em outras etapas do processo produtivo, visando identificar novos gargalos e oportunidades de melhoria. Outra possibilidade consiste na realização do Mapeamento do Fluxo de Valor (*Value Stream Mapping*), permitindo uma visão mais abrangente dos fluxos de materiais e informações. Sugere-se ainda o aprofundamento no uso das ferramentas e recursos gráficos disponibilizados pelo software de simulação utilizado, de modo a ampliar as análises e a visualização dos resultados. Por fim, estudos voltados para a avaliação de cenários relacionados a variações de demanda de longo prazo podem contribuir para o planejamento estratégico da capacidade produtiva e para a tomada de decisões mais assertivas em ambientes de crescente competitividade.

REFERÊNCIAS

- ATTAR, Ahmad; JIN, Yuqing; LUIS, Martino; ZHONG, Shuya; SUCALA, Voicu Ion. **Simulation-based production process analysis with KPIs**. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2023, San Antonio, TX, USA. Proceedings... San Antonio: IEEE, 2023.
- BANKS, J.; CARSON, J. S.; NELSON, B. L.; NICOL, D. M. **Discrete-Event System Simulation**. 5. ed. Upper Saddle River: Pearson Education, 2010.
- BERTRAND, J. Will M.; FRANSOO, Jan C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, 2002.
- BORSI, L. *et al.* Hybrid simulation modeling: a systematic literature review and future research directions. *Simulation Modelling Practice and Theory*, Amsterdam, v. 127, p. 102756, 2023.
- BRAILSFORD, S. C.; ELDABI, T.; KUNC, M.; MUSTAFEE, N.; OSORIO, A. F. **Hybrid simulation modelling in operational research: a state-of-the-art review**. *European Journal of Operational Research*, v. 278, n. 3, p. 721–737, 2019. DOI: 10.1016/j.ejor.2018.10.025.
- BROWNING, Shannon; BALL, Elizabeth; PERETZ, Zary; WILKES, Stephen. *Meta-models for buffer sizing in high-speed packaging systems*. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2024, Orlando, FL, USA.
- BUER, S. V.; STRANDHAGEN, J. O.; CHAN, T. S. **The link between Industry 4.0 and lean manufacturing: mapping current research and establishing a research agenda**. *International Journal of Production Research*, v. 56, n. 8, p. 2924–2940, 2018. DOI: 10.1080/00207543.2018.1442945.
- CHWIF, Leonardo; MEDINA, Afonso Celso. **Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria & aplicações**. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.
- CIAUȘU-SLIWA, Martin Robert *et al.* *Discrete-Event Simulation for Smart Manufacturing: Assessing Software, Industry Adoption, and Future Research Challenges*. **Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași. Machine Constructions Section**, v. 71, n. 1, p. 105-124, 2025.
- CORLU, C. G.; HUNTER, S. R.; LAM, H.; ONGGO, B. S.; SHORTLE, J.; BILLER, B. (eds.). *Proceedings of the 2023 Winter Simulation Conference*, San Antonio, TX, USA: IEEE, 2023. ISBN 979-8-3503-6966-3.
- FENG, Qi; SHANTHIKUMAR, J. George. The framework of parametric and nonparametric operational data analytics. **Production and Operations Management**, v. 32, n. 4, p. 1150–1168, 2023.
- FIPS PUBS - Federal Information Processing Standards Publications. Integration definition for function modeling (IDEF0). **National Institute of Standards and Technology, Computer Systems Laboratory, Gaithersburg**, n. 183, 1993.

FLEURY, Maria Tereza Leme; WERLANG, Sergio R. C. Pesquisa aplicada: conceitos e abordagens. GV Pesquisa – Anuário de Pesquisa GVPesquisa, Fundação Getulio Vargas, Rio de Janeiro, 2017.

FRANKLIN, Martin M.; TROLLIP, Gerda. *Fueling the Future: Digital Twin Implementation at Westinghouse*. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2025, Seattle, WA, USA. Proceedings... Seattle: IEEE/ACM, 2025.

FRIEDERICH, C.; LAZAROVA-MOLNAR, S. **Conceptual model and data validation in data-driven simulation studies**. In: *Proceedings of the 2023 Winter Simulation Conference*, San Antonio, TX, USA: IEEE, 2023.

GHASEMI, Amir; LAZAROVA-MOLNAR, Sanja; HEAVEY, Cathal. Supply Chain Digital Twin Framework for Hybrid Manufacturing Strategy Selection: A Case Study from the Semiconductor Industry. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2024, Orlando, FL, USA. Proceedings... Orlando: IEEE/ACM, 2024.

GIGANTE, Rodrigo Luiz; AZEVEDO, Aníbal Tavares de. Study of the impact of the start time of work shift on the efficiency of an emergency system through a simulation model of discrete events. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 29, e4421, 2022.

GRUBER, S.; GUTSCHI, C.; FURIAN, N.; VÖSSNER, S. **A simulation-based approach for evaluating different model mixes for production planning of a contract manufacturer in the automotive industry**. In: *Proceedings of the 2023 Winter Simulation Conference*.

HUERTA-TORRUCO, V.A.; HERNANDÉZ-URIBE, O.; CÁRDENLAS-ROBLEDO, L.A.; RODRÍGUEZ-OLIVARES, N. A. Effectiveness of Virtual Reality In Discrete Event Simulation Models for Manufacturing Systems. **Computers & Industrial Engineering**, 2022.

IVANOV, Vitalii; AMELIN, M.; HAIDABRUS, B. *Simulation software for smart manufacturing: a review*. **Discover Applied Sciences**, 2025.

KAMBLE, S. S.; GUNASEKARAN, A.; GHADGE, A.; RAUT, R. **A performance measurement system for Industry 4.0 enabled smart manufacturing system in SMMEs – A review and empirical investigation**. *International Journal of Production Economics*, v. 229, p. 107853, 2020. DOI: 10.1016/j.ijpe.2020.107853.

KRAJEWSKI, L. J.; MALHOTRA, M. K.; RITZMAN, L. P. **Operations management: processes and supply chains**. 13. ed. Hoboken: Pearson, 2023.

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

LEAL F, ALMEIDA; MONTEVECHI J.A.B. 2008. Uma Proposta de Técnica de Modelagem Conceitual para a Simulação através de elementos do IDEF. In: Anais do XL Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Joao Pessoa, PB.

LEAL, F., COSTA, R. F. DA S., MONTEVECHI, J. A. B., ALMEIDA, D. A. DE, & MARINS, F. A. S. (2011). **A practical guide for operational validation of discrete simulation models**. *Pesquisa Operacional*, 31(1), 57-77.

LEAL, G.S., SILVA, D.A.O., and SOPELETE, M.C. Conceitos básicos de bioestatística. In: Pesquisa na área biomédica: do planejamento à publicação [online]. Uberlândia: EDUFU, 2005, pp. 137-180.

LÚCIO, J. S., MIRANDA, R. D. C., DOS SANTOS, C. H., & LÚCIO, T. A. V. (2025). Bringing together Lean Six Sigma and discrete event simulation: a systematic literature review. *International Journal of Lean Six Sigma*, 16(3), 635-659.

MACIEL, L. F.; SILVA, A. F. da; RODRÍGUEZ, E. C. A.; MARINS, F. A. S. Aplicação da simulação a eventos discretos no balanceamento de linha de montagem em uma empresa do setor automotivo. **Revista Produção Online**, v. 23, n. 4, 2024.

MANSOURI, Seyed Soheil; SIVARAM, Abhishek; SAVOIE, Christopher J.; GANI, Rafiqul. Models, modeling and model-based systems in the era of computers, machine learning and AI. *Computers & Chemical Engineering*, v. 194, 108957, 2025.

MAYER, R. J.; PAINTER, M. K.; WITTE, P. S. – IDEF Family of Methods for Concurrent Engineering and Business Re-engineering Applications. **Knowledge-Based Systems**. p. 1-77. 1992

METROPOLIS, N.; ULAM, S. (1949). The Monte Carlo Method. *Journal of the American Statistical Association*, 44(247), 335–341. <https://doi.org/10.1080/01621459.1949.10483310>

MINH, N. D. Toyota's production efficiency improvement management: best practice for productivity evaluation and operation improvement. **Journal of Advances in Management Research**, [S.l.], v. 20, n. 3, p. 366–385, 2023. Emerald Publishing Limited. DOI: 10.1108/JAMR-02-2022-0042. ISSN 2049-3207.

MONTEVECHI, J. A. B.; LEAL, F.; PINHO, A. F.; COSTA, R. F. S.; OLIVEIRA, M. L. M.; SILVA, A. L. F. Conceptual modeling in simulation projects by mean adapted IDEF: an application in a Brazilian tech company. In: Proceedings of the **Winter Simulation Conference, Baltimore, USA**, 2010.

MOURA, Cassiano Rodrigues; BORGES, William José; KOHLRAUSCH, Valnei. Otimização do processo de emissão de ordens de produção: um estudo de caso em uma indústria de confecção. **GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, Bauru, v. 15, n. 1, p. 171–191, 2020.

MOURTZIS, D.; ANGELOPOULOS, J.; PANOPOULOS, N. *Smart manufacturing and tactile internet based on 5G in Industry 4.0: challenges, applications and new trends*. *Electronics*, v. 10, n. 24, p. 3175, 2021. DOI: 10.3390/electronics10243175.

NEGHBAN, A.; SMITH, J. S. Simulation for manufacturing system design and operation: literature review and analysis. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 33, n. 2, p. 241-261, 2014.

NELSON, B. L., WAN, H., & STAUM, J. (2021). Reducing Simulation Input-Model Risk via Input Model Averaging. *INFORMS Journal on Computing*, 33(2), 643–658. <https://doi.org/10.1287/ijoc.2020.0994>.

OLIVEIRA, Luís Filipe Azevedo de; PERES, Igor Tona; ARAÚJO, Bianca Menezes. Avaliação de desempenho de um departamento de emergência no Rio de Janeiro: uma abordagem híbrida utilizando Simulação de Eventos Discretos e Análise Envoltória de Dados. *Gestão & Produção*, São Carlos, v. 31, 2024.

PICCININI A, PREVIDI F, CIMINI C, PINTO R, PIROLA F. Discrete event simulation for the reconfiguration of a flexible manufacturing plant. *IFAC-PapersOnLine* 2018;51:465–70. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.362>.

RAHMAN, S. M. A.; RAHMAN, M. F.; TSENG, T. -L. B.; KAMAL, T. A Simulation-Based Approach for Line Balancing Under Demand Uncertainty in Production Environment, 2023. *Winter Simulation Conference (WSC)*, San Antonio, TX, USA, 2023, pp. 2020-2030,

ROBINSON, S. Conceptual modeling for simulation: rethinking the foundations. *Journal of Simulation*, London, v. 14, n. 2, p. 99–113, 2020.

ROBINSON, S. *Simulation: The Practice of Model Development and Use*. 2. ed. Basingstoke: Palgrave Macmillan, 2014.

SALDANHA, J. P., PRICE, B. S., & THOMAS, D. J. (2023). A nonparametric approach for setting safety stock levels. **Production and Operations Management**, 32(4), 1150–1168.

SEIRINGER, Wolfgang; *et al.* A simulation framework for clearing function-based release date optimization in a Material Requirements Planning planned production system. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2023, San Antonio, TX, USA. Proceedings... San Antonio: IEEE, 2023.

SEMINI, M.; FAUSKE, H.; STRANDHAGEN, J. O. **Applications of discrete-event simulation to support manufacturing logistics decision-making: a survey**. In: Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference. Piscataway, NJ: IEEE.

SLACK, Nigel; BRANDON-JONES, Alistair. **Administração da produção**. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2020.

TANG, J.; DAI, Z.; JIANG, W.; WU, X.; ZHURAVKOV, M. A.; XUE, Z.; WANG, J. A comprehensive review of theories, methods, and techniques for bottleneck identification and management in manufacturing systems. *Applied Sciences*, v. 14, n. 17, 2024.

TAO, F.; QI, Q.; WANG, L.; NEE, A. Y. C. **Digital twins and cyber–physical systems toward smart manufacturing and industry 4.0: correlation and comparison**. *Engineering*, v. 5, n. 4, p. 653–661, 2019. DOI: 10.1016/j.eng.2019.01.014.

THUROW, Gabriel; ROLF, Benjamin; REGGELIN, Tobias; LANG, Sebastian. *Simulation-based production planning for an electronic manufacturing service provider using collaborative planning*. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2025, Seattle, WA, USA.

TONN, Chris; GRANT, John. *Constraint identification in semi-automated production systems*. In: **WINTER SIMULATION CONFERENCE**, 2024, Orlando, FL, USA.

TURRIONI, J. B.; MELLO, C. H. P. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção: estratégias, métodos e técnicas para condução de pesquisas quantitativas e qualitativas**. Itajubá: UNIFEI, 2012.

URBANI, M.; BRUNELLI, M.; COLLAN, M. A. **Comparison of Maintenance Policies for Multi-Component Systems Through Discrete Event Simulation of Faults**. IEEE Access, 2020.

WANG, J.; LIU, Y.; LI, P.; LIN, Z.; SINDAKIS, S.; AGGARWAL, S. **Overview of Data Quality: Examining the Dimensions, Antecedents, and Impacts of Data Quality**. *Journal of the Knowledge Economy*, ahead of print, 2023. DOI: 10.1007/s13132-022-01096-6.

WILSDORF, P.; ZSCHALER, S.; HAACK, F.; UHRMACHER, A. M. **Potential and challenges of assurance cases for simulation validation**. In: *Proceedings of the 2024 Winter Simulation Conference*, H. Lam *et al.* (eds.), Orlando, FL, USA: IEEE, 2024.

ZHANG, Y. *et al.* **Simulation methods for complex manufacturing systems: recent advances and future trends**. *International Journal of Production Research*, London, v. 60, n. 18, p. 5592–5610, 2022.

APÊNDICE – RELAÇÃO DE TRABALHOS ORIGINADOS DESSA DISSERTAÇÃO

1. Aplicação da simulação a eventos discretos para otimização da capacidade em uma fábrica do ramo de equipamentos industriais – XXXII SIMPEP