

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

**UTILIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO PARA TOMADA DE  
DECISÕES NO CONTEXTO DA INDÚSTRIA 4.0: UMA  
APLICAÇÃO INSERIDA NO CONCEITO DE GÊMEO  
DIGITAL**

**Carlos Henrique dos Santos**

**Itajubá, julho de 2019**

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

**Carlos Henrique dos Santos**

**UTILIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO PARA TOMADA DE  
DECISÕES NO CONTEXTO DA INDÚSTRIA 4.0: UMA  
APLICAÇÃO INSERIDA NO CONCEITO DE GÊMEO  
DIGITAL**

**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: Engenharia de Produção**

**Orientador:** Prof. Dr. Fabiano Leal

**Coorientador:** Prof. Dr. José Antonio de Queiroz

**Julho de 2019**

**Itajubá**

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

**Carlos Henrique dos Santos**

**UTILIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO PARA TOMADA DE  
DECISÕES NO CONTEXTO DA INDÚSTRIA 4.0: UMA  
APLICAÇÃO INSERIDA NO CONCEITO DE GÊMEO  
DIGITAL**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 30 de julho de 2019, conferindo ao autor o título de **Mestre em Ciências em Engenharia de Produção.**

**Banca examinadora:**

Prof. Dr. Fabiano Leal (orientador)

Prof. Dr. José Antonio de Queiroz (coorientador)

Prof. Dr. Alexandre Ferreira de Pinho (UNIFEI)

Prof. Dr. Breno Gontijo Tavares (INATEL)

Itajubá

2019

# DEDICATÓRIA

De maneira especial, à minha namorada  
Alice e aos meus pais, Maria e Raimundo.

## AGRADECIMENTOS

Chega ao fim mais uma página deste meu livro da vida e que conta uma das etapas mais importantes vividas por mim até então. Livro este, o qual muitas vezes escrevemos sem perceber que sempre estaremos vivendo ciclos, completando etapas e desafios e que, em cada página escrita, nos é incumbida a missão de deixar o nosso legado, a nossa marca e o nosso aprendizado. Hoje, só posso dizer que sou vitorioso e grato.

Grato primeiramente a Deus, pelo dom da vida e por iluminar meus caminhos com pessoas maravilhosas, oportunidades valiosas e experiências inesquecíveis.

Grato aos meus amados pais, Maria e Raimundo, por todo amor, cuidado, apoio e todos os mais incontáveis valores e ensinamentos desta vida. Por me permitirem sonhar tão alto e, mais ainda, por não pouparem esforços para me proporcionar a base mais sólida e linda que eu pudesse imaginar.

Grato à minha querida namorada Alice, por aceitar o desafio de sonharmos juntos, por acreditar em mim em todos os momentos, por todo amor, carinho e paciência e, acima de tudo, por escrever comigo esta e as próximas páginas dessa vida.

Grato aos meus irmãos, Eduardo, Luciano e Eliana, por todo apoio nestes longos anos de caminhada, pela paciência, suporte e pela amizade diária de vocês, sem a qual eu jamais chegaria até aqui.

Grato ao meu orientador, Professor Fabiano Leal, pelo voto de confiança, por todo o suporte desde a graduação e durante a minha trajetória no mestrado e, sobretudo, pelo exemplo como exímio professor.

Grato ao meu coorientador, Professor Queiroz, por enxergar em mim o potencial para área acadêmica desde a graduação, por todas as oportunidades e desafios a mim confiados e por todo suporte e confiança nestes anos. Obrigado por seu meu grande mentor nesta jornada!

Aos meus amigos e demais professores do grupo de pesquisa NEAAD, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e também da graduação, os quais fizeram parte desta etapa.

À querida UNIFEI, por me permitir uma formação que vai muito além do âmbito profissional. Por fim, agradeço à CAPES e à empresa objeto de estudo deste trabalho, por todo o incentivo dado a esta pesquisa.

A todos, muito obrigado!

# EPÍGRAFE

*“Feliz aquele que transfere o que sabe e aprende o que ensina.”*

**Cora Coralina**

## RESUMO

O advento de novas tecnologias traz impactos significativos na forma com que sistemas e processos são geridos. Neste caso, destaca-se o cenário da Indústria 4.0, termo que se refere a um novo conceito de indústria, o qual prega processos e sistemas cada vez mais automatizados, integrados e digitalizados em prol de maior eficiência. Ainda neste contexto, notam-se também grandes mudanças quanto à utilização de diversas ferramentas e conceitos já conhecidos, os quais ganham novas aplicações e escopos de atuação, frente a processos cada vez mais complexos e um mercado cada dia mais competitivo. Tendo em vista tal cenário, destaca-se a possibilidade de utilização da simulação como Gêmeo Digital, isto é, uma cópia virtual e inteligente capaz de espelhar processos reais dentro do conceito de Sistemas Ciber-físicos, nome dado a um dos pilares da Indústria 4.0. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo a análise quanto à aplicabilidade da simulação como Gêmeo Digital em um processo real com baixo grau de automatização, cenário desafiador quanto à aderência aos preceitos da Indústria 4.0. O processo escolhido como objeto de estudo corresponde a uma atividade de abastecimento de materiais em postos *kanbans* dispostos nas linhas de produção de uma indústria aeronáutica. A partir do método de Modelagem e Simulação, foi possível a concepção, construção e implementação de um Gêmeo Digital por meio da simulação. Neste caso, avaliou-se as vantagens e limitações, bem como o papel da simulação como ferramenta facilitadora quanto à implementação de conceitos da Indústria 4.0 em processos com pouca ou nenhuma preparação. No que se refere aos resultados da pesquisa, obteve-se um Gêmeo Digital que, por meio da Simulação a Eventos Discretos (SED) e de uma interface intermediária, extrai os dados advindos do processo, simula as possíveis rotas de abastecimento e fornece as opções de rota mais eficientes. Nota-se que o Gêmeo Digital tornou o processo, objeto deste estudo, um sistema inteligente e conectado com os demais sistemas da operação, fato este que está de acordo com os preceitos da Indústria 4.0. Além disso, na busca por maior eficiência, nota-se também que tal aplicação vai ao encontro dos princípios da filosofia enxuta, uma vez que foi possível reduzir movimentações e transportes desnecessários na ordem de 20%. Finalmente, conclui-se que a utilização da simulação como Gêmeo Digital em um processo real com baixo grau de automatização se mostrou possível a partir da presente pesquisa, fato este que ilustra a versatilidade da ferramenta frente aos desafios impostos pela evolução da indústria.

**Palavras-chave:** Simulação a Eventos Discretos, Indústria 4.0, Gêmeo Digital.

# ABSTRACT

The advent of new technologies brings significant impacts on the way that systems and processes are managed. In this case, we highlight the scenario of Industry 4.0, a term that refers to a new concept of industry, which preaches processes and systems increasingly automated, integrated and digitized for a greater efficiency. Also in this context, there are great changes regarding the use of several tools and concepts already known, which has been gaining new applications and scopes of action, in front of increasingly complex processes and a more competitive market. Given this scenario, it is possible to use the simulation as Digital Twin, concept which refers to a virtual and intelligent copy capable to reflect real processes inside the context of Cyber-physical Systems, one of the pillars of Industry 4.0. Thus, the present work aims to analyze the applicability of the Digital Twin simulation in a real process with a low degree of automation, which is a challenging scenario regarding adherence to the precepts of Industry 4.0. The process chosen as the object of study corresponds to an activity of supplying materials at *kanban* stations arranged on the production lines of an aeronautical industry. Applying the Modeling and Simulation method, it was possible to design, construct and implement a Digital Twin through the simulation. In this case, we evaluated the advantages, limitations, and the role of the simulation as a tool to facilitate the implementation of Industry 4.0 concepts in processes with little or no preparation. About the results of the research, a Digital Twin was obtained through Discrete Event Simulation (DES) and an intermediate interface, which extracts the data coming from the process, simulates the possible supply routes and provides the most efficient route options. It is noted that the Digital Twin made the process, object of this study, an intelligent system and connected with the other systems of the operation, a fact that is in accordance with the precepts of Industry 4.0. In addition, aiming for greater efficiency, it is also noted that such application matches the Lean Philosophy, since it was possible to reduce unnecessary movements and transports by the order of 20%. Finally, it is concluded that the use of the Digital Twin simulation in a real process with a low degree of automation was shown possible from the present research, a fact that illustrates the versatility of the tool in front of the challenges imposed by the evolution of the industry.

**Keywords:** Discrete Events Simulation, Industry 4.0, Digital Twin.



# LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1- Papel da simulação dentro do contexto da Indústria 4.0.....	16
Figura 2.1- Métodos de coleta de dados em projetos de simulação.....	26
Figura 2.2- Estruturação dos Sistemas Ciber-físicos por meio de cinco fases.....	38
Figura 2.3- Estrutura do Gêmeo Digital e seus componentes.....	45
Figura 3.1- Classificação da pesquisa.....	49
Figura 3.2- Classificação da pesquisa dentro do método de modelagem e simulação...	50
Figura 3.3- Ilustração da planta produtiva objeto deste estudo.....	51
Figura 3.4- Método para condução de projetos de simulação.....	53
Figura 3.5- Proposta de alteração do método para condução de projetos de simulação.	56
Figura 4.1- Síntese da proposta de utilização da simulação integrada ao processo real.	58
Figura 4.2- Modelo conceitual do processo (Parte 1: Recebimento e estocagem).....	59
Figura 4.3- Modelo conceitual do processo (Parte 2: Abastecimento de <i>kanbans</i> ).....	60
Figura 4.4- Teste de normalidade <i>Anderson-Darling</i> para os parâmetros de entrada....	65
Figura 4.5- Vistas 2D e 3D do modelo computacional.....	65
Figura 4.6- Interfaces de programação orientada a objeto e via <i>ProcessFlow</i> .....	68
Figura 4.7- <i>Dashboard</i> de interface entre o processo real e o modelo de simulação.....	73
Figura 4.8- Fluxo de dados entre o sistema real e o modelo de simulação.....	74
Figura 4.9- Teste para tamanho de amostra.....	80
Figura 4.10- Gráfico de comparação entre os dados reais e as réplicas da simulação...	80
Figura 4.11- Resultado do teste ANOVA.....	81
Figura 4.12- Série temporal para os resíduos após teste ANOVA.....	82
Figura 4.13- Lógica de otimização de cenários através do <i>software</i> de simulação.....	84
Figura 4.14- Fluxograma referente ao processo de abastecimento de materiais.....	86
Figura 4.15- Comparação da rota otimizada vs. demais rotas possíveis.....	87

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 2.1 – Comparação entre os métodos de condução de projetos de simulação.....	33
Quadro 4.1 – Integração entre o processo real e o modelo de simulação.....	71
Quadro 4.2- Classificação da validação operacional quanto à observação do sistema...	76
Quadro 4.3- Simulação em aplicações tradicionais vs. Gêmeo Digital.....	90

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1- Medidas de posição dos parâmetros.....	64
Tabela 4.2- Medidas de dispersão dos parâmetros.....	64
Tabela 4.3- Inferência estatística para os parâmetros.....	65
Tabela 4.4- Parâmetros da amostra piloto para definição do número de réplicas.....	78
Tabela 4.5- Teste de normalidade para os resíduos.....	82

# LISTA DE ABREVIACÕES

CPS - *Cyber-physical Systems*

ERP - *Enterprise Resource Planning*

IDEF-SIM - *Integrated Definition Methods - Simulation*

IOT - *Internet of Things*

MRP - *Material Requirement Planning*

NASA - *National Aeronautics and Space Administration*

SBA - *Simulação Baseada em Agentes*

SED - *Simulação a Eventos Discretos*

VBA - *Visual Basic for Applications*

# SUMÁRIO

<b>1.INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1. Contextualização.....	15
1.2. Justificativa .....	17
1.3. Objetivos .....	18
1.4. Estrutura do trabalho.....	19
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>20</b>
2.1. Simulação.....	20
2.1.1. Conceitos e definições gerais .....	20
2.1.2. Simulação a Eventos Discretos (SED) e seu papel na indústria moderna.....	22
2.1.3. Vantagens e limitações da SED no contexto industrial atual .....	28
2.1.4. Papel da SED como ferramenta de apoio aos Conceitos Enxutos.....	31
2.1.5. Métodos para condução de projetos de SED .....	32
2.2. Indústria 4.0 e sistemas Ciber-físicos .....	34
2.2.1. Conceitos e definições .....	34
2.2.2. Oportunidades e desafios da Indústria 4.0 e Sistemas Ciber-físicos .....	38
2.2.3. Papel da Indústria 4.0 e Sistemas Ciber-físicos no apoio aos Conceitos Enxutos ..	41
2.2.4. Gêmeo Digital para a concepção do sistema Ciber-físico.....	43
2.3. Construção do Gêmeo Digital por meio da Simulação.....	45
<b>3. MÉTODO DE PESQUISA .....</b>	<b>47</b>
3.1. Classificação da pesquisa.....	47
3.2. Objeto de estudo .....	50
3.3. Método para condução do projeto de simulação.....	51
<b>4. APLICAÇÃO .....</b>	<b>57</b>
4.1. Modelagem conceitual .....	57
4.1.1. Objetivos e definição do sistema .....	57
4.1.2. Construção do modelo conceitual.....	58
4.1.3. Validação do modelo conceitual.....	61
4.1.4. Documentação do modelo conceitual .....	62
4.1.5. Modelagem dos dados de entrada.....	62
4.2. Modelagem computacional.....	65
4.2.1. Construção do modelo computacional .....	66
4.2.2. Verificação do modelo computacional .....	69

4.2.3. Definição dos dados de atualização do modelo e das respostas desejadas.....	70
4.2.4. Estruturação da interface com o processo real .....	72
4.2.5. Validação do modelo computacional .....	75
4.3. Modelagem operacional.....	83
4.3.1. Definição dos cenários a serem testados .....	83
4.3.2. Execução periódica dos cenários .....	84
4.3.3. Análises e tomada de decisões.....	85
4.4. Considerações finais .....	86
4.5. Discussão teórica .....	89
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>92</b>
5.1. Síntese dos resultados .....	92
5.2. Limitações da pesquisa .....	94
5.3. Recomendações para trabalhos futuros.....	94
<b>APÊNDICE A – Dados para validação do modelo.....</b>	<b>96</b>
<b>APÊNDICE B – Resíduos dos dados de validação .....</b>	<b>97</b>
<b>APÊNDICE C – Dados para comparação das rotas .....</b>	<b>98</b>
<b>APÊNDICE D – Submissões e publicações realizadas .....</b>	<b>99</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>100</b>
<b>ANEXO A – Tabela de símbolos IDEF-SIM.....</b>	<b>107</b>

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Contextualização

A simulação computacional consolidou-se, no decorrer das últimas décadas, como uma valiosa ferramenta de análise e apoio à tomada de decisões. De maneira geral, a simulação se destacou em aplicações nos mais diversos setores, incluindo hospitais, aplicações militares, serviços, logística, dentre outros. Entretanto, o maior triunfo da ferramenta diz respeito a aplicações em ambientes de manufatura (NEGAHBAN e SMITH, 2014). Neste caso, diversas são as vantagens oriundas da utilização da simulação, como a possibilidade de investigar o comportamento de sistemas complexos, realizar experimentos do tipo “o que ocorre se” e possibilidade de avaliar mudanças em sistemas reais, sem a necessidade de intervenções nos mesmos (BANKS et al., 2010; GREASLEY e OWEN, 2016). Além disso, Zarrin e Azadeh (2017) ressaltam que a simulação possui papel fundamental no apoio à implementação e manutenção dos Conceitos Enxutos visando maior eficiência dos processos.

Porém, devido à sua natureza de fácil aplicação e adaptação, nota-se que a forma de utilização da simulação, seus objetivos, bem como suas características principais vêm sofrendo mudanças importantes com o passar dos anos. Percebe-se hoje que a exposição à grande velocidade e volume de mudanças impacta diretamente na forma em que os sistemas e processos são geridos e, neste contexto, a utilização da simulação também está sujeita a tais mudanças. Mais especificamente no âmbito da manufatura, a simulação deixa de ser uma ferramenta de análises pontuais e passa a ser peça fundamental e de utilização constante no contexto da indústria moderna, ou como é chamada, Indústria 4.0 (RODIČ, 2017).

O termo Indústria 4.0, referência ao que seria a quarta revolução industrial, diz respeito à uma nova era industrial baseada em companhias e processos inteligentes, os quais almejam o aumento de sua eficiência a partir da integração de ambientes reais e virtuais por meio da utilização de tecnologias emergentes (WAN, CAI e ZHOU, 2015). Dentre os pilares dessa nova era industrial, além da já conhecida Tecnologia de Informação, estão soluções como Internet das Coisas, *Big data* e Tecnologia de Nuvem, os quais viabilizam a conexão entre diversos processos e equipamentos, processamento de dados em grande volume e variedade, bem como fluxos de dados e informações sem a necessidade de equipamentos físicos, respectivamente. Além desses, outro importante pilar da Indústria 4.0, o qual também é viabilizado por meio dos demais pilares, é o chamado Sistema Ciber-físico, este que diz respeito à virtualização dos

processos e sistemas reais a partir de cópias digitais inteligentes (ZHONG et al., 2017; XU, XU e LI, 2018).

Ainda no contexto da Indústria 4.0, ao se considerar cópias virtuais de processos reais, surge o termo Gêmeo Digital como referência à vertente virtual dos Sistemas Ciber-Físicos. Neste caso, entende-se o Gêmeo Digital como sendo uma cópia virtual que representa os sistemas físicos e que é abastecida por dados reais de maneira automática, visando a otimização de tais sistemas e o retorno de respostas, instruções ou comandos com certo grau de autonomia (VACHÁLEK et al., 2017; KUNATH e WINKLER, 2018). É exatamente no contexto dos Sistemas Ciber-físicos, mais precisamente no que se refere ao Gêmeo Digital, que a simulação ganha espaço no contexto da Indústria 4.0. Como os Gêmeos Digitais se referem a cópias virtuais com certa inteligência e que visam, sobretudo, a otimização de decisões, observa-se que a simulação pode ser utilizada como tal, sendo, portanto, uma alternativa na concepção de tais gêmeos (RODIČ, 2017). Vale ressaltar também que os preceitos da Indústria 4.0, incluindo os Sistemas Ciber-físicos, também estão alinhados à busca por maior eficiência nos processos, a qual figura entre os objetivos principais dos Conceitos Enxutos (URIARTE, NG e MORIS, 2018). A figura 1.1 ilustra o posicionamento da simulação como Gêmeo Digital no contexto da Indústria 4.0 e de seus pilares.



Figura 1.1- Papel da simulação dentro do contexto da Indústria 4.0

Fonte: Adaptado de Zhong et al. (2017), Rodič (2017) e Xu, Xu e Li (2018)

Tendo em vista o cenário apresentado, o presente trabalho se baseia na possibilidade de utilização da simulação como Gêmeo Digital visando, dessa forma, compor um Sistema Ciber-físico de um objeto de estudo real. A partir de tal aplicação, pretende-se avaliar a convergência da simulação com relação a tal aplicação, bem como avaliar as dificuldades e oportunidades advindas da mesma.



## 1.2. Justificativa

Quanto à utilização da simulação como Gêmeo Digital, notam-se oportunidades de pesquisa no que se refere à aplicação de tal conceito em ambientes reais, visto certa defasagem de casos práticos na literatura. Neste contexto, Kritzinger et al. (2018) relatam que, ao analisar os trabalhos que abordam o conceito de Gêmeo Digital na manufatura e áreas correlatas, com enfoque para as publicações dos últimos cinco anos, apenas 26% deles referem-se a pesquisas onde houve, de fato, implementação em casos reais. Vale ressaltar que tal informação foi obtida a partir das bases da Scopus e do Google Scholar, por meio da busca das palavras-chave “*Digital Twin, Digital Twin in manufacturing, Digital Twin in maintenance, Digital Twin in PPC, Digital Twin in production planning e Digital Twin in layout planning*”.

Além disso, no que se refere a trabalhos que exploram a utilização da simulação como Gêmeo Digital, nota-se que tal conceito é pouco explorado pelos trabalhos presentes na literatura, sendo alguns destes apenas abordagens iniciais e que pouco exploram os benefícios de tal utilização (RODIČ e KANDUČ, 2015; SCHLUSE e ROSSMANN, 2016; JAIN e LECHEVALIER, 2016; THIERS, SPROCK e MCGINNIS, 2016; UHLEMANN, LEHMANN e STEINHILPER, 2017; DAMIANI et al., 2018). Neste caso, a utilização da simulação como base para a criação de Gêmeos Digitais permite que se explore os benefícios principais da ferramenta, como baixo investimento, possibilidade de se analisar o comportamento dos sistemas de maneira flexível no decorrer do tempo, alta capacidade quanto aos recursos gráficos, possibilidade de utilização de outras ferramentas de análise de maneira integrada, dentre outras (FISHMAN, 2001; BANKS et al., 2010; SHARMA, 2015; TURNER et al., 2016; PRAJAPAT e TIWARI, 2017). Ainda, nota-se certa defasagem na literatura quanto a métodos para condução de projetos de simulação neste âmbito. Montevechi et al. (2015) relatam os métodos mais utilizados em projetos de simulação, entretanto, visando sua utilização como Gêmeo Digital, há a necessidade de se adaptar tais métodos de forma que permitam tal aplicação.

Outro ponto a ser explorado é com relação às atuais dificuldades em se implementar os conceitos da Indústria 4.0, incluindo o Gêmeo Digital. Tais dificuldades se devem a aspectos financeiros, uma vez que tal implementação demanda grandes investimentos, bem como aspectos estruturais, já que deve haver uma preparação dos processos e sistemas visando adequá-los aos preceitos da Indústria moderna (RÜTTIMANN E STÖCKLI, 2016; UHLEMANN, LEHMANN e STEINHILPER, 2017). Tortorella e Fettermann (2017) ressaltam que as dificuldades de se implementar os conceitos da Indústria 4.0 são ainda mais relevantes quando se trata de países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil. Isso ocorre devido ao

fato de a Indústria 4.0 pregar processos cada vez mais inteligentes e automatizados, conforme ressaltam Rüttimann e Stöckli (2016), embora tal automatização nem sempre seja possível ou viável em determinados processos. Este cenário fica ainda mais evidente ao se tratar de países em desenvolvimento, tornando o termo Indústria 4.0 muitas vezes um conceito utópico para diversos segmentos industriais pertencente a estes países.

De forma a explorar tais lacunas de conhecimento, pretende-se analisar a implementação de um Gêmeo Digital por meio da simulação, mais precisamente a Simulação a Eventos Discretos (SED), em um processo real com grande influência humana, baixo grau de automatização e com características comuns à maioria dos processos industriais do país. Tal processo pertence a uma indústria do ramo aeronáutico situada no Brasil e refere-se à uma atividade de abastecimento de materiais em postos *kanbans*, os quais ficam dispostos nas linhas produtivas da empresa. Adequar tal processo aos preceitos da Indústria 4.0 significaria alto investimento frente a uma expectativa baixa de retorno, visto que o processo possui uma função de apoio aos processos principais da empresa. Além disso, por se tratar de uma planta produtiva relativamente extensa, a distância percorrida durante o abastecimento de materiais impacta diretamente no tempo de abastecimento e na eficiência do processo, sendo tal fato motivador para a implementação do Gêmeo Digital visando a otimização desse parâmetro. Vale ressaltar que a atividade de abastecimento de materiais compõe apenas um dos diversos processos da empresa, sendo este trabalho uma primeira abordagem quanto a implementação dos conceitos da Indústria 4.0 na empresa objeto deste estudo. Tal fato delimita o escopo de atuação da pesquisa ao processo de abastecimento de materiais nos postos *kanbans*.

### 1.3. Objetivos

Visto a pouca exploração da utilização da simulação como Gêmeo Digital, aliada às dificuldades de se implementar os preceitos da Indústria 4.0, principalmente em processos com pouca ou nenhuma automatização, o presente trabalho pretende responder à seguinte pergunta de pesquisa: **é possível implementar um Gêmeo Digital e suas características principais, por meio da utilização da simulação, em um processo com baixo grau de automatização?** Dessa forma, o objetivo geral do presente trabalho é analisar a aplicabilidade de um Gêmeo Digital, construído a partir da simulação, em um processo real e com baixo grau de automatização. Pretende-se, neste contexto, avaliar as vantagens e limitações quanto à utilização da simulação, representada neste trabalho pela SED, como Gêmeo Digital, bem como destacar o papel da ferramenta como agente facilitador no que se refere à implementação dos

conceitos da Indústria 4.0 em processos com pouca ou nenhuma preparação para tal. Além disso, o presente trabalho possui os seguintes objetivos específicos:

- Propor um método para condução de projetos de simulação como Gêmeo Digital;
- Alcançar, por meio da implementação do Gêmeo Digital, uma maior eficiência no processo objeto deste estudo, bem como torná-lo mais inteligente, tendo em vista a tomada de decisões.

## **1.4. Estrutura do trabalho**

A presente pesquisa está estruturada em cinco capítulos. O **Capítulo 1** apresenta uma introdução do trabalho, abordando a contextualização do tema, as justificativas científicas que embasam tal pesquisa, os objetivos gerais e específicos do trabalho e a forma com que o mesmo está estruturado. Já o **Capítulo 2** apresenta um embasamento teórico sobre os principais conceitos abordados no trabalho. Primeiramente são apresentados aspectos gerais sobre a simulação, seguidos por características específicas da SED e com enfoque maior na evolução da ferramenta no decorrer dos anos. Logo em seguida é abordado o conceito de Indústria 4.0, Sistemas Ciber-físicos e Gêmeo Digital e, por fim, aborda-se a utilização da simulação como Gêmeo Digital no âmbito da Indústria 4.0.

No **Capítulo 3** é apresentado o método de pesquisa, o qual aborda a classificação da pesquisa, o objeto de estudo em que se pretende aplicar o trabalho e, por fim, o método para a condução de tal aplicação, ou seja, as etapas a serem seguidas. O **Capítulo 4** trata da aplicação de fato, seguindo as etapas sugeridas no capítulo 3, no objeto de estudo definido também no terceiro capítulo. Finalmente, o **Capítulo 5** contém as conclusões da pesquisa, a qual apresenta as limitações do estudo, bem como as oportunidades para trabalhos futuros. Por último, encontram-se as referências utilizadas no trabalho, apêndices e anexos.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

Nesta seção serão apresentados, primeiramente, aspectos gerais da simulação, tendo em vista seus conceitos e definições principais, bem como suas classificações. Neste caso, será dado um enfoque maior à Simulação a Eventos Discretos (SED), suas vantagens e limitações, o papel da ferramenta no apoio aos Conceitos Enxutos, além dos métodos para condução de projetos SED. Vale ressaltar que a simulação será abordada tendo em vista sua evolução e utilização no contexto da indústria moderna. Em seguida, serão abordados a Indústria 4.0 e Sistemas Ciber-físicos. Para tal, também serão tratados aspectos gerais, vantagens e limitações, o papel da indústria moderna e dos Sistemas Ciber-físicos no que se refere à filosofia enxuta e, finalmente, será abordado o Gêmeo Digital como parte fundamental na concepção dos Sistemas Ciber-físicos. Por fim, explora-se a construção do Gêmeo Digital por meio da simulação, destacando as oportunidades e desafios de tal utilização, bem como tendências futuras neste âmbito de aplicação.

### **2.1. Simulação**

#### **2.1.1. Conceitos e definições gerais**

A simulação baseia-se na imitação de um processo real em um certo intervalo de tempo. Neste caso, há a criação de uma história baseada nos sistemas reais, seguida pela formulação de inferências acerca das características representativas destes sistemas (BANKS, 1998). Law (2014) ressalta que a simulação é uma das técnicas mais amplamente utilizadas na área de Pesquisa Operacional, destacando suas inúmeras aplicações enquanto ferramenta, como: concepção e análises de sistemas de manufatura; avaliações de sistemas financeiros; concepção e análises de sistemas de transporte, de serviços e militares; dentre outras aplicações. Banks et al. (2010) destacam que o comportamento dos sistemas pode ser analisado por meio dos chamados modelos de simulação. Neste caso, os modelos são construídos através de observações e inferências sobre o sistema a ser investigado e, de acordo com os autores, tais inferências podem ser expressas por meio de técnicas e relações matemáticas, lógicas e/ou simbólicas.

Apesar da simulação ser uma técnica desenvolvida em tempos prévios aos recursos computacionais, foi a partir da segunda guerra mundial que a ferramenta ganhou força por meio da evolução dos computadores, sendo então entendida como simulação computacional (NANCE e SARGENT, 2002). Com o advento de recursos computacionais, a simulação obteve

rápido crescimento, ganhando novos recursos e campos de atuação com o passar dos anos (GOLDSMAN, NANCE e WILSON, 2010). Fishman (2001) relata que a modelagem de sistemas complexos se tornou um meio de sobrevivência para diversas áreas como engenharia, áreas relacionadas à saúde, telecomunicações, militares, transporte, dentre outras. Para o autor, a modelagem é capaz de fornecer respostas para tomada de decisões a um custo relativamente baixo. Neste caso, devido à complexidade crescente dos sistemas com os quais se tem contato, a simulação se tornou uma ferramenta imprescindível quanto à modelagem dos mesmos. Chwif e Medina (2015) complementam ao relatar que a simulação consegue capturar com fidelidade as características dos sistemas reais, estes que apresentam grande complexidade devido à sua natureza dinâmica que se altera no decorrer do tempo, bem como à sua natureza aleatória, ou seja, regida por variáveis aleatórias.

Para Nance e Sargent (2002), a simulação pode ser compreendida sob diferentes aspectos, os quais variam de acordo com o critério de classificação. Pode-se classificar a ferramenta de acordo com seus objetivos, sendo o principal deles a **Análise**, onde pretende-se imitar determinado sistema de forma a compreender seu comportamento. Há também objetivos relacionadas a **Educação e Treinamento**, onde são avaliados conceitos através de suas aplicações em um modelo simulado, **Avaliação de sistemas**, onde pretende-se avaliar se o sistema é capaz de atender a determinados requisitos, **Pesquisa**, onde se testa comportamentos em um modelo de simulação a fim de comparar resultados e testar hipóteses, dentre outros objetivos.

Pode-se também classificar os modelos de simulação quanto sua representação de tempo e estado. Há a chamada **Simulação de Monte Carlo**, onde utiliza-se de geradores de números aleatórios para simular sistemas físicos e matemáticos, sem se considerar o comportamento do sistema no decorrer do tempo. Por outro lado, ao se considerar o comportamento temporal de um sistema, há a chamada **Simulação Contínua**, onde retrata-se mudanças de estado de um sistema em um intervalo de tempo contínuo, e a **Simulação a Eventos Discretos (SED)**, a qual descreve mudanças de estado de um sistema, em intervalos discretos de tempo, a partir da ocorrência de eventos (NANCE e SARGENT, 2002; LAW, 2014; CHWIF e MEDINA, 2015). Law (2014) complementa que, no caso de sistemas em que se deseja avaliar o comportamento no decorrer do tempo, o critério de escolha entre a simulação contínua ou discreta dependerá da natureza do sistema a ser modelado, bem como dos objetivos do estudo.

Por fim, vale ainda ressaltar a existência da **Simulação Baseada em Agentes (SBA)**, que de acordo com Macal e North (2014), trata-se de uma modelagem composta por agentes individuais, autônomos e interativos. Neste caso, os agentes geralmente representam pessoas

ou grupos e os mesmos interagem uns com os outros e como com o meio no qual eles pertencem, este que pode ser de natureza contínua ou discreta. Observa-se um número cada vez maior de problemas que possuem requisitos específicos, os quais não podem ser modelados através dos métodos de modelagem como a simulação contínua e a SED, carecendo de alternativas como a SBA (SIEBERS et al., 2010; MACAL e NORTH, 2014).

Já no que se refere à evolução da simulação, Rodič (2017) destaca que a ferramenta, considerando seus diferentes tipos e classificações, se consolidou nas últimas décadas nos mais diversos setores e áreas de atuação, contribuindo para redução de custos em processos, desenvolvimento de produtos, aumento da qualidade de produtos e serviços, dentre outras contribuições. Jahangirian et al. (2010) ilustram o fato de que a simulação consegue atender às necessidades crescentes de se lidar com diferentes camadas de decisão dentro dos sistemas empresariais, fato este que vai ao encontro dos preceitos da indústria moderna. Para Uriarte, Ng e Moris (2018), técnicas de otimização são cada vez mais empregadas em conjunto com a simulação, tornando a ferramenta mais robusta e capaz de fornecer soluções ótimas ou quase ótimas para os tomadores de decisão. Os autores ainda complementam com o fato de que a simulação evoluiu nas últimas décadas, deixando de ser uma ferramenta para especialistas para se tornar uma ferramenta amplamente presente em operações das mais diversas áreas e níveis de decisão.

Tendo em vista a capacidade da SED de realizar análises de sistemas que alteram seu comportamento em intervalos discretos de tempo, característica comum aos ambientes industriais, e, ainda, levando em consideração sua capacidade de atender aos requisitos e preceitos dos sistemas atuais, o presente trabalho irá utilizar dessa técnica na condução da pesquisa. Dessa forma, os próximos tópicos, ao tratar da simulação, irão se referir especificamente à SED.

### **2.1.2. Simulação a Eventos Discretos (SED) e seu papel na indústria moderna**

A SED, conforme caracterizado anteriormente, diz respeito à modelagem de sistemas que evoluem instantaneamente em pontos separados no tempo. Neste caso, tais pontos no tempo são representados por ocorrências capazes de mudar o estado do sistema representado pelo modelo de simulação (LAW, 2014). De maneira simplificada, Tako e Robinson (2010) descrevem a SED como um sistema capaz de representar entidades individuais que se movem através de filas, atividades e locais, em pontos discretos no tempo e, neste contexto, os modelos são geralmente de natureza estocástica. Ainda, tais entidades interagem com as atividades e locais a partir do sequenciamento dos eventos programados no modelo de simulação (OPACIC

e SOWLATI, 2016). Fishman (2001) ressalta que a SED é capaz de oferecer técnicas de análise com erros relativamente pequenos, além de ser possível sua utilização de forma conjunta com métodos analíticos, como otimização por exemplo. De forma a ilustrar a aplicabilidade da SED, Uriarte, Ng e Moris (2018) revelam que a ferramenta é a técnica de simulação mais popular de apoio à tomada de decisões em sistemas de manufatura. Neste contexto, há exemplos de sua utilização em um amplo escopo de atuação e em diferentes níveis de tomada de decisão, abrangendo desde decisões operacionais até os altos níveis de gestão (JAHANGIRIAN et al., 2010). Tako e Robinson (2010) salientam que, embora a SED tenha sido utilizada amplamente no ambiente manufatureiro, tal utilização passa a se tornar expressiva também no setor de serviços, como aeroportos, *call centers*, redes de *fast food*, restaurantes, bancos, hospitais, dentre outros.

No que se refere à condução de projetos envolvendo a SED, há inúmeros métodos disponíveis na literatura (MONTEVECHI et al., 2015). Banks et al. (2010) descrevem alguns passos comumente presentes em diversos estudos envolvendo a SED:

- I. Formulação do problema:** é a primeira etapa da condução de projetos de simulação e nela deve-se garantir a clara definição do problema antes de seguir para as próximas etapas. Neste contexto, Balci (2012) complementa sobre a importância do que ele chama de “Credibilidade da formulação do problema”, a qual se refere ao quão bem estruturada e precisa é a definição do problema a ser abordado;
- II. Definição dos objetivos e planejamento geral do projeto:** os objetivos estão relacionados às perguntas que se deseja responder através da simulação. Já no que diz respeito ao planejamento geral do projeto, deve-se estimar os recursos necessários para a sua execução (BANKS et al., 2010). Law (2009) ressalta que um modelo de simulação deve sempre ser desenvolvido para um conjunto particular de objetivos e, neste caso, um modelo que é válido para um objetivo pode não ser para outro;
- III. Modelagem conceitual:** o modelo conceitual é a primeira abordagem do problema e passo fundamental para a condução do projeto de simulação, sendo este a abstração de um modelo de um processo real. Neste contexto, existem diversos métodos e ferramentas para representação do modelo conceitual (ROBINSON, 2008);
- IV. Coleta de dados:** tal fase é constituída pela identificação e coleta de dados necessários para a simulação e está intimamente ligada ao modelo conceitual. Enquanto a identificação de dados está relacionada ao processo que destaca os conjuntos de dados necessários e suas propriedades desejadas, como precisão, período de amostragem e

formato, a coleta de dados pode ser definida como um processo para obter estes conjuntos de dados previamente identificados (ONGOO e HILL, 2014);

- V. Modelagem computacional:** a modelagem computacional refere-se à tradução do modelo conceitual através de alguma linguagem de simulação ou simulador. Neste contexto, nota-se que os simuladores, *softwares* específicos para simulação, dominam o mercado e, neste caso, há uma tendência se tornarem cada vez mais customizados para aplicações específicas, como manufatura, engenharia, serviços, dentre outras (CHWIF e MEDINA, 2015);
- VI. Verificação do modelo:** para Sargent (2013), esta etapa objetiva garantir que a programação e implementação do modelo computacional esteja correta;
- VII. Validação do modelo:** uma vez que os modelos de simulação são utilizados frequentemente para tomada de decisões baseadas em seus resultados, há a preocupação quanto à precisão e validade desses resultados. Neste contexto, para Sargent (2014), a validação visa justamente garantir que o modelo de simulação apresente resultados suficientemente bons e corretos para determinada aplicação. Ainda quanto à validação do modelo, há diversas técnicas disponíveis na literatura, as quais abordam ferramentas qualitativas e quantitativas, bem como objetivas e subjetivas. A escolha de qual técnica utilizar irá depender da aplicação e também da equipe envolvida no projeto (CHWIF e MEDINA, 2015; SARGENT, GOLDSMAN e YAACOUB, 2016);
- VIII. Definição de experimentos:** segundo Balci (2012), trata-se do processo de formulação de um plano de execução da simulação visando a obtenção de determinadas respostas. Ainda segundo o autor, tal planejamento deve levar em conta as inferências que se deseja realizar a partir do experimento e, neste caso, deve-se considerar também os custos estimados para tal;
- IX. Simulação de cenários e análise:** trata-se da execução da simulação a partir dos experimentos previamente planejados. Neste caso, a análise refere-se à avaliação dos indicadores de performance do sistema simulado, nos quais se baseia a tomada de decisões (BANKS et al. 2010);
- X. Documentação do projeto:** a documentação do projeto de simulação em diferentes níveis de abstração é de extrema importância para que se garanta a comunicação e aprendizagem no decorrer do projeto. Neste contexto, a documentação apropriada de um projeto de simulação é um pré-requisito essencial para a avaliação da qualidade quanto às atividades de manutenção, reutilização ou reprodução do modelo de simulação e seus resultados (OSCARSON e MORIS, 2002; TRIEBIG e KLÜGL, 2009);



**XI. Implementação:** a fase de implementação diz respeito à tomada de decisões baseadas nos resultados precedentes. Neste contexto, Banks et al. (2010) relatam que o sucesso desta fase está diretamente ligado às demais etapas descritas anteriormente.

Quanto à aplicação da SED nos sistemas de manufatura, conforme descrito anteriormente e de maneira mais detalhada, nota-se que a ferramenta está presente em diversas aplicações como *design* de produtos e *layouts*, planejamento e controle, elaboração de estratégias, alocação de recursos, treinamento, dentre outras (JAHANGIRIAN et al. 2010). Negahban e Smith (2014) destacam a expectativa de que a aplicação da SED na concepção e operação do sistema de manufatura continue crescendo e evoluindo no futuro, uma vez que o setor continua sendo uma parte importante da economia global e se torna mais competitivo com o passar dos anos. Os autores relatam ainda a necessidade de técnicas mais eficientes para lidar com a crescente complexidade das operações de manufatura, sendo de extrema importância o surgimento de abordagens híbridas, onde a SED é acoplada a uma ou mais técnicas. Neste contexto, Negahban e Smith (2014) ressaltam que o desenvolvimento de novas e mais robustas ferramentas de otimização e análise, bem como a incorporação delas em *softwares* de simulação comerciais melhora o desempenho destes *softwares* e amplia suas aplicações.

Entretanto, apesar da grande aplicabilidade da SED em diversas áreas e contextos, Rodič (2017) relata que a ferramenta vem sendo utilizada, nos últimos anos, em casos onde há um escopo de atuação e tempo definidos. Para o autor, a simulação, assim como qualquer outra ferramenta inserida neste contexto, sofrerá modificações no contexto da indústria moderna. Para Negahban e Smith (2014), com a evolução dos sistemas e da indústria de forma geral, muito mais atenção deve ser dada à integração da simulação com níveis superiores de gerenciamento e sistemas de controle corporativos, a fim de aumentar o engajamento das partes interessadas quanto à utilização da ferramenta. Além disso, apesar da perspectiva defendida por Uriarte, Ng e Moris (2018) de que a simulação se tornará uma ferramenta ainda mais importante, sendo tecnologia chave no contexto da Indústria do futuro, Skoogh, Perera e Johansson (2012) salientam para o fato de que muitas empresas têm falhado em usufruir das vantagens trazidas pela ferramenta, considerando o contexto da indústria moderna. Tal fato ilustra a necessidade de mudança na forma com que a simulação é utilizada e, neste caso, o alto custo em função do tempo empregado na utilização da ferramenta figura como um dos principais fatores que motivam tais mudanças (BARLAS e HEAVEY, 2016).

Quanto ao tempo empregado em projetos envolvendo a SED, Barlas e Heavey (2016) relatam que a fase de coleta de dados é a mais demorada, podendo representar até 40% do tempo total

do projeto. Neste caso, as principais causas são: existência de diversas fontes de coleta de dados, estes que muitas vezes possuem baixa qualidade, e necessidade de se trabalhar melhor tais dados antes de inseri-los no modelo. Em função dessa dificuldade, algumas vertentes da simulação foram criadas visando sanar tal dificuldade. Diversas aplicações na literatura ilustram técnicas e métodos de coleta, processamento e entrada de dados nos modelos de simulação e, neste caso, pode-se classificar tais métodos em três tipos básicos, conforme ilustra a figura 2.1 (SKOOGH, PERERA e JOHANSSON, 2012; BARLAS e HEAVEY, 2016).

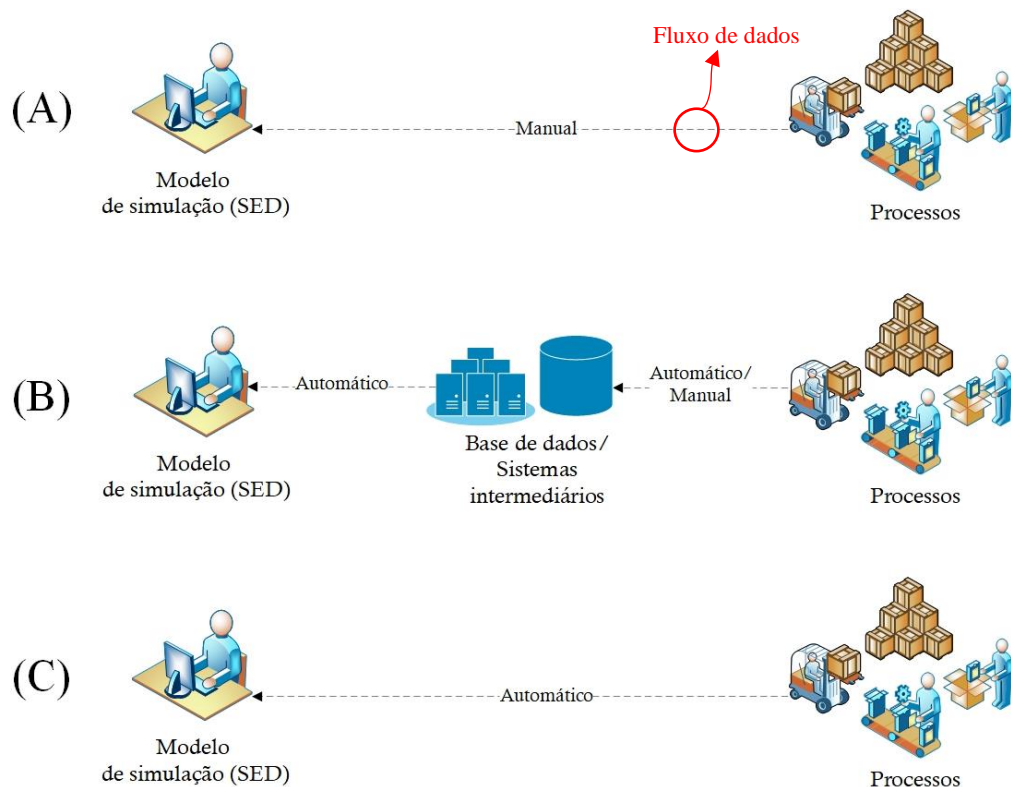


Figura 2.1- Métodos de coleta de dados em projetos de simulação

Fonte: adaptado de Skoogh, Perera e Johansson (2012) e Barlas e Heavey (2016)

O método (A) ilustra projetos tradicionais de simulação, onde a coleta dos dados que abastecem o modelo é realizada manualmente, fato este que impacta diretamente no tempo de projeto. Já o método (B) representa um meio intermediário quanto à coleta de dados, esta que é realizada de maneira manual e/ou automática e, em seguida, os dados são armazenados em bancos de dados e/ou sistemas intermediários responsáveis por trabalhar tais dados antes de direcioná-los para o modelo de simulação. Por fim, o método (C) representa uma nova forma de se trabalhar com a simulação, onde dados reais são coletados automaticamente e abastecem o modelo de simulação sem a necessidade de sistemas intermediários.

Skoogh, Perera e Johansson (2012) relatam que, a despeito de aplicações utilizando o método (A), o qual referencia projetos tradicionais de simulação e que desprende grandes tempos para coleta de dados, há uma tendência até o ano de 2020 para que haja ascensão dos métodos (B) e (C), visando maior agilidade nos projetos de simulação. Os autores complementam que o método (B), por possuir sistemas intermediários, permite que os dados sejam trabalhados antes de serem inseridos no modelo de simulação. Neste caso, diversos autores defendem a presença de sistemas intermediários, como ilustrado por Rodič e Kanduč (2015), os quais complementam que, ao se utilizar dados reais coletados de maneira automática para o modelo de simulação, é quase inevitável a utilização de sistemas intermediários para garantir a validade dos dados. Já Barlas e Heavey (2016) citam que, em se tratando de métodos de entrada automática de dados, método (C), há casos onde o modelo de simulação é atualizado sempre que ocorrem mudanças nos sistemas reais, sendo, portanto, o modelo de simulação um reflexo das mudanças do sistema que ele representa.

Ao se tratar de modelos de simulação atualizados por meio de dados reais coletados de maneira automática, a literatura aborda dois termos que podem ser eventualmente confundidos. Neste contexto, surgem as variantes *Near Real Time Simulation* e *Real Time Simulation*, ou em português, **Simulação em Tempo Quase Real** e **Simulação em Tempo Real**, respectivamente. Tais conceitos representam alternativas intermediárias visando sanar os problemas envolvendo coleta de dados para simulação. Vale ressaltar que tais termos extrapolam a SED e são aplicados também aos demais tipos de simulação. Neste caso, os modelos de simulação são abastecidos por dados advindos de processos e sistemas reais, no entanto, a diferença para os métodos tradicionais de simulação é que tais dados são coletados continuamente e de maneira automática, possibilitando a atualização do modelo de simulação frente às mudanças reais (VAHDATIKHAKI e HAMMAD, 2014; VAHDATIKHAKI e HAMMAD, 2015).

Na simulação em tempo quase real, o termo “quase” implica um certo atraso no tempo em que a simulação captura os dados suficientes para atualizar o modelo. Neste caso, o modelo de simulação é atualizado de acordo com as chamadas “rodadas de atualização”, termo que faz referência às atualizações periódicas do modelo. Além disso, o intervalo de tempo entre tais rodadas pode variar de acordo com o propósito com o qual a simulação está sendo utilizada, ou seja, o tempo de atraso do modelo de simulação frente ao processo real está intimamente ligado às características deste processo (VAHDATIKHAKI e HAMMAD, 2014). Por outro lado, na chamada Simulação em Tempo Real, tal atraso no tempo é praticamente desprezível, tornando as rodadas de atualização praticamente contínuas.

Para Saez et al. (2018), a Simulação em Tempo Real prevê uma atualização do modelo de simulação de maneira sincronizada com os processos reais e, diferentemente das demais técnicas de simulação onde as análises visam a redução de custos, melhoria de produtividade e/ou análise dos sistemas, a utilização da ferramenta em tempo real visa principalmente o monitoramento e avaliação do desempenho dos sistemas reais. Neste contexto, Akhavian e Behzadan (2012) ressaltam que a Simulação em Tempo Real é bastante explorada nas mais diversas áreas práticas e campos científicos. Entretanto, Song e Eldin (2012) salientam que, em aplicações que envolvem o chamado “tempo real”, deve-se garantir uma estrutura de coleta contínua de dados, fato que pode ser um desafio, tanto financeiro quanto prático, para determinados casos e aplicações. Há casos na literatura ilustrando ambas as técnicas de simulação nas mais diversas áreas, com destaque para a Simulação em Tempo Real nos últimos anos, fato decorrente dos avanços tecnológicos que possibilitam, dentre outras funcionalidades, a aquisição simultânea de dados dos sistemas simulados (BOTÍN, VAMPBELL e GUZMÁN, 2015; HEGER, GRUNDSTEIN e FREITAG, 2017; CASSETTARI et al., 2017; ZHENG et al., 2017; OU, DYKE e PRAKASH, 2017; SAEZ et al., 2018; LEE, 2019).

### **2.1.3. Vantagens e limitações da SED no contexto industrial atual**

Rodič (2017) relata que a utilização da SED nos campos práticos e científicos está consolidada e vem passando por evoluções no decorrer dos anos. Neste contexto, pode-se destacar diversas vantagens associadas à utilização da ferramenta. Greasley e Owen (2016) destacam que a ferramenta permite investigar o comportamento de sistemas complexos e, por meio do auxílio computacional e de experimentos, auxilia no entendimento dos sistemas e de seus comportamentos. Já Banks et al. (2010) complementam que a SED permite ao tomador de decisão analisar procedimentos, regras, fluxos, dentre outras modificações estruturais nos sistemas reais de maneira segura e confiável. Além disso, por meio da ferramenta, pode-se: testar alterações em *layouts* e em sistemas de transporte, sem que haja o comprometimento dos recursos; compreender fenômenos que afetam o sistema estudado e avaliar interações e hipóteses acerca de tal sistema; realizar análises de maneira flexível no que se refere a percepção de tempo, permitindo acelerar ou reduzir a velocidade com que o sistema opera no modelo simulado; avaliar as respostas fornecidas pelo sistema a partir da alteração das variáveis de entrada no modelo; dentre outras vantagens (BANKS et al., 2010; SHARMA, 2015).

Outro aspecto que garante vantagens à SED é o quesito gráfico e visual. Segundo Robinson et al. (2014), situações onde o problema é mal definido e/ou complexo, há certa subjetividade e, neste caso, a implementação das melhorias carecem de uma participação ativa dos clientes.

Neste contexto, os recursos gráficos e exibição animada dos modelos de SED criam um potencial de engajamento nos clientes e contribuem para o sucesso do projeto de simulação. Ainda neste âmbito, Turner et al. (2016) ressaltam que quanto maior o realismo fornecido pelos modelos de simulação, maior a compreensão do objeto de estudo por parte dos envolvidos no projeto, bem como melhor a análise de pontos chave do sistema analisado. Os autores ainda destacam que, com o avanço e popularização das tecnologias disponíveis, algumas ferramentas vêm ganhando cada vez mais espaço em conjunto com a simulação, como é o caso da Realidade Virtual. Neste caso, técnicas como escaneamento 3D, sensores e recursos computacionais possibilitam certa imersão nos modelos de simulação por meio de óculos de realidade virtual, contribuindo para uma maior interação e manipulação do modelo, além de estar alinhado com os preceitos da indústria moderna (TURNER et al., 2016).

Além disso, a simulação possui grande potencial também no que se refere a técnicas de ensino e treinamentos (BARIL et al., 2016; OPACIC e SOWLATI, 2016). Neste contexto, Monks, Robinson e Kotiadis (2014) relatam que a utilização da simulação como ferramenta de apoio a experimentações contribui com a aprendizagem e compreensão dos envolvidos na análise, promovendo melhores soluções se comparado a experimentos que não utilizam a simulação. Ainda, uma vez que grande parte dos projetos de SED possuem tempo limitado, a reutilização de modelos oferece uma rota de aprendizado alternativa para futuras análises (MONKS, ROBINSON e KOTIADIS, 2014; GOGI, TAKO e ROBINSON, 2016).

Já no que se refere à integração da SED com outras ferramentas de análise, April et al. (2014) relatam que em casos complexos, onde há não-linearidades e incertezas, além de uma difícil modelagem, a simulação se destaca devido à sua possibilidade de trabalhar em conjunto com ferramentas de otimização, tornando-a uma alternativa robusta para análises. Além disso, Prajapat e Tiwari (2017) relatam sobre o crescente uso de uma variedade de métodos de inteligência artificial e de otimização em conjunto com a SED. Reséndiz et al. (2018) complementam que a combinação da SED com outros métodos de otimização tem sido fundamental para a utilização da ferramenta. Tais afirmações resultam na evolução da SED como ferramenta de apoio à tomada de decisões, a qual vem se tornando cada vez mais robusta e integrada à outras ferramentas.

Entretanto, apesar das inúmeras vantagens trazidas pela SED, há também algumas limitações da ferramenta, fato este que deve ser considerado ao iniciar projetos de simulação. Para Banks et al. (2010), nas aplicações tradicionais de projetos de SED, geralmente há a necessidade de pessoas especializadas para a construção, manipulação e interpretação dos resultados advindos de modelos de simulação, carecendo muitas vezes de investimentos em treinamentos e

capacitação das pessoas envolvidas no projeto. Além disso, o autor relata que há casos onde a utilização da simulação não é necessária e/ou recomendada, uma vez que soluções analíticas são possíveis e até mesmo preferíveis. Outro fato relacionado às limitações da SED é relatado por Robinson et al. (2014), os quais destacam que, devido às características de determinados sistemas, a complexidade exigida nas modelagens torna a simulação uma técnica muitas vezes não aplicável ou inviável.

Guimarães, Leal e Mendes (2018) relatam também que o grande número de opções de *softwares* e pacotes de simulação disponíveis no mercado podem contribuir para uma escolha errada de qual *software* e quais pacotes utilizar. Para os autores, uma escolha errada pode contribuir para resultados indesejáveis como perdas financeiras, grandes tempos de modelagem, interrupções no projeto e falta de recursos essenciais, levando a decisões pouco embasadas ou errôneas. Já no que se refere à Simulação em Tempo Real ou Quase Real, embora tal solução seja uma boa alternativa para a sanar a demora na coleta de dados em projetos de simulação tradicionais, Saez et al. (2018) salientam que a complexidade e a natureza estocástica dos dados, além das dificuldades de coleta dos mesmos, podem ser fatores limitantes quanto à utilização da ferramenta. Neste caso, os autores complementam que a coleta de informações e o cálculo de métricas em tempo real podem ser desafiadoras sem estruturas adequadas de automação e controle.

Ainda no contexto da simulação em Tempo Real ou Quase Real, Skoogh, Perera e Johansson (2012) ressaltam ainda que, ao abastecer o modelo de simulação com dados reais coletados de maneira automática, surgem alguns desafios relacionados à garantia de acuracidade e validade dos dados, bem como à necessidade de robustez a erros e eliminação de duplicidades e redundâncias. Os autores complementam que, devido a tais desafios e às limitações tecnológicas, há poucas perspectivas, até 2020, para utilização em larga escala de sistemas de entrada automática de dados sem necessidade de interfaces intermediárias para tratamento prévio desses dados. Neste caso, Barlas e Heavey (2016) relatam que, devido ao fato de haver inúmeras fontes de dados necessários para o abastecimento dos modelos de simulação, há a necessidade de mais pesquisas com foco em interfaces integradoras de coleta e tratamento desses dados, as quais devem ser mais interativas e de fácil utilização. Finalmente, Rodič e Kanduč (2015) complementam que a construção de modelos SED carece que os dados do processo sejam extraídos, analisados e preparados especialmente para o modelo. Dessa forma, para garantir a credibilidade e autenticidade quanto ao processo real, os autores defendem que deve haver sistemas de integração entre o modelo, sistemas auxiliares e dados do processo real.

#### 2.1.4. Papel da SED como ferramenta de apoio aos Conceitos Enxutos

Finalmente, destaca-se a aderência da simulação com a filosofia *Lean*, ou em português filosofia enxuta. Tal filosofia baseia-se na eliminação de desperdícios e na melhoria dos fluxos, visando, dentre outros objetivos, melhorar a eficiência dos processos e sistemas (OHNO, 1997). Para tal, pode-se visualizar as atividades de um sistema sob três óticas distintas, de acordo com Hines e Taylor (2000): **(1) Atividades que agregam valor**, **(2) Atividades que não agregam valor, porém que são necessárias** e, por fim, **(3) Atividades que não agregam valor e que são desnecessárias**. Os autores complementam sobre a necessidade de se reduzir ao máximo as atividades do tipo (2), bem como eliminar, sempre que possível, as atividades do tipo (3), sendo ambas consideradas desperdícios. Além disso, Ohno (1997), ao tratar especificamente dos desperdícios, classifica-os em sete tipos principais:

- I. Superprodução:** desperdício decorrente de se produzir mais do que a demanda ou antes do tempo no qual há a demanda;
- II. Estoques:** sejam estes de matéria prima, de produtos em elaboração ou de produtos acabados;
- III. Espera:** tempos onde não há agregação de valor em meio ao fluxo produtivo, seja devido à presença de ociosidades ou à formação de filas durante o processo;
- IV. Transporte de produtos:** transportes excessivos ou desnecessários de materiais e/ou produtos e que não agregam valor, podendo ser reduzidos e/ou evitados;
- V. Movimentação de pessoas:** desperdício relacionado à movimentação excessiva ou desnecessária de pessoas em meio ao fluxo produtivo e que não agrega valor;
- VI. Processamento não necessário:** etapas desnecessárias, inadequadas ou ineficientes durante o processo produtivo e que podem ser evitadas ou modificadas sem prejuízos para o fluxo produtivo;
- VII. Produtos defeituosos:** desperdícios relacionados a reparos, retrabalhos ou refugos e que acarretam custos desnecessários.

No âmbito da indústria moderna, Uriarte, Ng e Moris (2018) concluem que a filosofia enxuta continuará sendo fator chave para alcançar maiores eficiências por parte das organizações. Os autores complementam que as soluções trazidas pela evolução da indústria irão auxiliar na implementação e sanar dificuldades encontradas atualmente para a implementação da filosofia. Neste contexto, a simulação possui papel fundamental na implementação e manutenção dos Conceitos Enxutos nas organizações. Baril et al. (2016) relatam que a SED pode contribuir para um alcance mais rápido dos objetivos envolvendo a implementação dos Conceitos Enxutos. Os

autores citam ainda que a simulação pode ser utilizada para se testar os efeitos das soluções enxutas antes de implementá-las de fato, auxiliar em treinamentos acerca da filosofia e, conseqüentemente, encorajar os envolvidos no projeto quanto à proposição de melhorias para o sistema. Ainda, para Zarrin e Azadeh (2017), no que diz respeito à implementação dos Conceitos Enxutos, muitas vezes tratam-se de soluções que podem ser conflitantes e/ou com múltiplos objetivos, fato este que dificulta uma análise preliminar dos seus efeitos para o sistema. Neste caso, a SED atua justamente para minimizar tais dificuldades e fornecer boas previsões aos tomadores de decisão. Além disso, no que se refere ao nível gerencial, os autores revelam que, ao avaliar as soluções enxutas previamente à sua implementação, os gestores podem construir argumentos convincentes ao comparar o desempenho dos sistemas antes e após a implementação da filosofia enxuta. Por fim, pode-se citar diversas aplicações na literatura que abordam a utilização da simulação integrada aos Conceitos Enxutos (FRAZZON et al. 2017; ZARRIN e AZADEH, 2017; MAHMOOD et al., 2018; RESÉNDIZ et al., 2018).

### **2.1.5. Métodos para condução de projetos de SED**

Os métodos para condução de projetos de simulação apresentam sequências de passos que guiam o desenvolvimento desses projetos, estabelecendo fluxos lógicos que auxiliam os responsáveis pela implementação de trabalhos desta natureza (MONTEVECHI et al., 2015). Para Law (2009), a existência de um método estruturado para condução de projetos em simulação é imprescindível para o desenvolvimento e sucesso destes. Ainda neste contexto, Montevechi et al. (2015) destacam que há métodos mais simples e superficiais e outros mais detalhados e completos e, neste caso, a escolha do mais adequado a ser utilizado deve levar em conta as características do projeto, bem como as vantagens e facilidades oferecidas por cada um dos métodos disponíveis. Os autores avaliam os métodos mais utilizados em projetos de simulação, comparando-os quanto as suas etapas e atividades principais, bem como sua robustez e, neste contexto, destacam-se os métodos propostos por Law (2009), Montevechi et al. (2010), Balci (2012), Sargent (2013), dentre outros.

Law (2009) sugere um método de sete etapas, as quais englobam desde a formulação do problema até a apresentação dos resultados. Já Sargent (2013) relata um método com três etapas principais, chamadas de Definição do problema, Modelagem conceitual e Modelagem computacional, e demais etapas intermediárias, as quais dizem respeito à validação e verificação das etapas principais. Já no que se refere a métodos mais completos, Balci (2011) e Montevechi *et al.* (2010) se destacam, propondo etapas mais detalhadas. Balci (2011) propõe um método composto por onze etapas principais e que são intercaladas por fases de validação,



verificação e análise quanto à qualidade das mesmas. Dessa forma, permite-se avaliações intermediárias das etapas durante todo o projeto. Por fim, Montevechi *et al.* (2010) propõem um método dividido em três grandes fases, chamadas de Concepção, Implementação e Análise, estas que são compostas por um total de doze etapas principais que englobam desde a definição dos objetivos e do sistema, até a etapa de conclusões e recomendações. Montevechi *et al.* (2015) analisaram também outros métodos comumente utilizados, possibilitando assim a comparação destes no que se refere às suas etapas principais, conforme apresenta o quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Comparação entre os métodos de condução de projetos de SED

Etapas		Mitroff et al. (1974)	Banks et al. (1998)	Robinson and Robinson (2000)	Carson II (2005)	Law (2009)	Montevechi et al. (2010)	Sargent (2010)	Balci (2011)
1	Grande fase de " <b>concepção</b> "						x		
2	Definição do sistema real	x		x				x	x
3	Formulação do problema	x	x		x	x	x	x	x
4	Especificação dos requerimentos								x
5	Modelagem conceitual	x	x	x	x	x	x	x	x
6	Validação do modelo conceitual					x	x	x	x
7	Especificação do design								x
8	Documentação dos dados				x		x		
9	Coleta e modelagem dos dados de entrada		x		x	x	x		x
10	Grande fase de " <b>implementação</b> "						x		
11	Construção dos submodelos computacionais								x
12	Construção do modelo computacional	x	x	x	x	x	x	x	x
13	Verificação do modelo computacional		x		x		x	x	x
14	Validação do modelo computacional	x	x		x	x	x	x	x
15	Grande fase de " <b>análise</b> "						x		
16	Planejamento e análise de experimentos		x	x	x	x	x	x	x
17	Análise dos dados			x	x		x		
18	Documentação dos dados e datas		x			x			x
19	Conclusões e recomendações	x		x		x	x		
20	Apresentação dos resultados				x	x			x
21	Implementação	x	x	x					

Fonte: adaptado de Montevechi *et al.* (2015)

Nota-se que, dentre as 21 etapas listadas pelos autores, os métodos sugeridos por Montevechi et al. (2010) e Balci (2011) se apresentam como alternativas mais completas, fato este que embasa a escolha do método a ser trabalhado no presente trabalho.

## **2.2. Indústria 4.0 e sistemas Ciber-físicos**

### **2.2.1. Conceitos e definições**

O termo Indústria 4.0 foi proposto pelo governo alemão em 2011 e representa a evolução da indústria ao fazer alusão ao que seria a quarta revolução industrial (RODIČ, 2017). Rüttimann e Stöckli (2016) relatam que as três primeiras revoluções industriais se referem a marcos científicos e inovadores. A primeira foi marcada pela máquina a vapor, enquanto a segunda foi ilustrada pela utilização da eletricidade como motriz para as linhas produtivas. Já a terceira revolução é associada à onda computacional e das tecnologias de informação. Entretanto, a quarta revolução industrial não representa uma revolução inovadora e tecnológica, mas sim uma revolução em como as companhias irão reconhecer e lidar com os desafios tecnológicos. Além disso, a Indústria 4.0 representa uma meta politicamente estabelecida para a indústria moderna, cuja intenção é integrar e virtualizar os sistemas industriais, visando uma era de produção totalmente automatizada, integrada e conectada (RÜTTIMANN E STÖCKLI, 2016; URIARTE, NG e MORIS, 2018). Segundo Rodič (2017), tal integração, no âmbito organizacional, engloba todas as divisões de negócio e da cadeia de agregação de valor com auxílio da digitalização.

De maneira simplificada, Uriarte, Ng e Moris (2018) relatam que a Indústria 4.0 refere-se a pessoas, sistemas, processos e ambientes, os quais são conectados continuamente uns com os outros e, além disso, são capazes de se mover de um mundo físico para um ambiente virtualizado. Neste contexto, todos os dados, tecnologias de informação e sistemas em geral necessitarão estar totalmente integrados, sendo a conexão entre os ambientes físicos e virtuais a representação de um novo aspecto dos processos produtivos na indústria do futuro (RODIČ, 2017). Rüttimann e Stöckli (2016) salientam que a Indústria 4.0 é uma tendência inevitável e se concretizará de qualquer forma. Para os autores, a digitalização na indústria já começou há muito tempo e ainda está em andamento, sendo que as evoluções tecnológicas quanto à conexão, à disponibilidade e ao processamento dos dados farão toda a diferença no futuro.

Ainda quanto às tendências futuras da indústria, Lee, Bagheri e Kao (2015) relatam que, no contexto da indústria moderna, o desenvolvimento tecnológico recente resultou na oferta e disponibilidade das tecnologias supracitadas, impactando na natureza competitiva das

indústrias e levando-as a se mover em direção à implementação de metodologias de alta tecnologia. Uriarte, Ng e Moris (2018) salientam que a indústria do futuro traz importantes mudanças nas organizações, as quais necessitarão adaptar suas máquinas, sistemas e competências pessoais, visando assim a permanência competitiva no mercado. Neste cenário, há uma exigência cada vez maior por empresas que possuem flexibilidade quanto à sua demanda, aumento da customização de produtos e processos, produtos com ciclo de vida mais curtos, bem como processos e serviços mais complexos. Ainda neste contexto e no que se refere especificamente à manufatura, a próxima geração da indústria promete melhorar a flexibilidade frente a um maior grau de customização, ao mesmo tempo em que buscará alavancar a qualidade e produtividade (ZHONG et al., 2017).

Xu, Xu e Li (2018) ressaltam que, no cenário econômico global, nota-se a necessidade crescente de uma indústria reformulada e a qual permitirá um aumento do nível de digitalização e informatização em prol de um aumento da eficiência e competitividade. Para os autores, o desenvolvimento e avanços tecnológicos permitirão a viabilidade de inúmeras soluções de crescimento para as indústrias e tal fato é evidenciado pelo número crescente de áreas que vem explorando os benefícios da digitalização. Neste contexto, o termo Indústria 4.0 vem sendo referenciado em diversos setores nos últimos anos e, no âmbito da manufatura, Zhong et al. (2017) o associam ao conceito de *Smart Manufacturing*, ou em português Manufatura Inteligente. Para os autores, a Manufatura Inteligente propõe o uso intensificado de tecnologias avançadas de forma a impactar na qualidade dos produtos, na eficiência de produção e nos níveis de serviço.

De forma a ilustrar de maneira mais detalhada as implicações trazidas pela manufatura inteligente, Mueller, Chen e Riedel (2017) citam algumas delas como: (1) rápida identificação, localização e diagnóstico de parâmetros internos das operações; (2) capacidade de detectar dados físicos e medir o desempenho dos mesmos; (3) capacidade de processar dados para a obtenção de informações relevantes; (4) capacidade de interagir com objetos inteligentes e sistemas de informação centralizados; (5) multifuncionalidade para diferentes aplicações; dentre outras. Ainda quanto às tecnologias emergentes que possibilitam tais implicações da indústria do futuro, pode-se citar aquelas que compõem os pilares da Indústria 4.0 (ZHONG et al., 2017; XU, XU e LI, 2018):

- I. **Internet das coisas:** segundo Trappey et al. (2017), a chamada *Internet of Things* (IOT), ou em português Internet das coisas, atua como uma tecnologia facilitadora para a próxima geração da indústria. Segundo os autores, de maneira simplificada, o foco

principal da IOT é estabelecer conexões entre os objetos físicos presentes no meio industrial com uma rede de internet onipresente, permitindo, assim, que haja coleta e troca de informações de maneira contínua entre tais objetos. Ainda neste contexto, Manavalan e Jayakrishna (2019) complementam que a IOT, por meio do compartilhamento de dados em tempo real, vem ganhando espaço em diversos setores industriais, como a área aeroespacial, *supply chain*, manufatura, dentre outros;

- II. Tecnologia de nuvem:** também conhecida como *Cloud* ou *Cloud Computing*, em inglês, Xu, Xu e Li (2018) relatam que tal tecnologia permite o compartilhamento, alocação e obtenção de dados através de redes e servidores, tudo de maneira flexível e facilitando as operações que envolvem tais dados e informações. Os autores ressaltam que as companhias necessitam cada vez mais de dados para a tomada de decisões e, neste caso, o processamento destes sem o auxílio da nuvem requer múltiplos recursos computacionais, os quais tornam o processo ineficiente. Liu e Xu (2017) complementam que a tecnologia de nuvem pode ser amplamente utilizada na Indústria 4.0 para aumentar o compartilhamento de dados entre as fronteiras da empresa, melhorando o desempenho do sistema por meio de uma maior agilidade e flexibilidade, além de contribuir para a redução de custos;
- III. Big data:** para Qi e Tao (2018), a tecnologia intitulada *Big data* refere-se a técnicas de organização, processamento e análise de uma grande quantidade e variedade de dados brutos, estruturados ou não, visando obter informações a partir dos mesmos. Os autores ressaltam que, no ambiente manufatureiro, há um cenário de grande volume de dados estruturados, não estruturados e semiestruturados, os quais são gerados a partir do ciclo de vida dos produtos e processos. Neste contexto, através da análise envolvendo *Big Data* e por meio de modelos e algoritmos de análise de dados, os tomadores de decisão podem encontrar gargalos dos processos, perceber as causas e impactos dos problemas, prever soluções, dentre outras facilidades trazidas pela tecnologia;
- IV. Tecnologia de informação:** de acordo com Zhong et al. (2017), as tecnologias de informação referem-se a toda estrutura que estabelece o processamento e transferência de sinais, dados e informações e que envolve diversas mídias e equipamentos os quais necessitam destes dados. Apesar de não ser novidade, tais tecnologias se potencializam no âmbito da Indústria 4.0, sendo combinadas com as soluções de IOT e *cloud*;
- V. Sistemas Ciber-físicos:** Mueller, Chen e Riedel (2017) descrevem o Sistema Ciber-físico, ou *Cyber-physical System (CPS)* em inglês, como a junção de sistemas físicos e virtuais, os quais são conectados por meio de uma rede local ou global, com autonomia

parcial ou completa, bem como com controle em tempo real, sendo capaz de cooperar com a interface humana para tomada de decisões. Para os autores, tal conceito possui o foco não somente na coleta e processamento de dados do sistema em tempo real, mas também na análise estrutural destes dados para abastecer processos com certo grau de autonomia e inteligência. Neste contexto, Shin, Cho e Oh (2018) relatam que o CPS desempenha um papel crucial na concepção da Indústria 4.0, pois atua como um meio de vincular o mundo físico, como sensores, atuadores, dispositivos móveis, máquinas, dentre outros, a um espaço virtual, de forma a espelhar o comportamento do mundo real e possibilitar o processamento de seus respectivos dados com foco no gerenciamento em tempo real.

No âmbito da manufatura, alguns autores citam outros pilares da Indústria 4.0, como integração de dados e sistemas; sistemas adaptáveis, flexíveis e com certa automação; segurança na comunicação; Inteligência Artificial (IA); dentre outros (LU, 2017; YIN, STECKE e LI, 2018). Todavia, nota-se que tais conceitos acabam por estar inseridos, de certa forma, nos cinco pilares descritos anteriormente. Os Sistemas Ciber-físicos, por exemplo, demandam a integração de dados e sistemas, sistemas adaptáveis, flexíveis e com certa automação, bem como certa inteligência por parte de sua vertente virtual, podendo demandar inclusive o conceito de Inteligência Artificial. Portanto, considera-se neste trabalho a classificação da Indústria 4.0 em cinco pilares principais, conforme proposto por Zhong et al. (2017) e Xu, Xu e Li (2018). Ainda, nota-se que o Sistema Ciber-físico parece trazer consigo os demais pilares, uma vez que só é possível a representação virtual de um sistema real a partir de tecnologias de processamento de dados, conectividade e integração. Portanto, o Sistema Ciber-físico age como um pilar chave para a difusão dos princípios da Indústria 4.0 (MUELLER, CHEN e RIEDEL, 2017). Para a concepção de tais sistemas, Shin, Cho e Oh (2018) sugerem uma visão baseada em cinco níveis complementares:

- **Nível de conexão:** trata-se do nível mais básico, o qual requer a obtenção dos dados físicos por meio de sensores, equipamentos, *Enterprises Resources Programs* (ERPs), dentre outros;
- **Nível de conversão:** refere-se ao segundo nível e responsável pela conversão dos dados brutos, objetivando extrair informações dos mesmos;
- **Nível cibernético:** o terceiro nível atua como um ponto central de informações. Neste caso, todas as informações extraídas no nível anterior são transferidas para o nível

cibernético, permitindo a estruturação do modelo virtual a partir das informações conectadas e integradas;

- **Nível cognitivo:** já o quarto nível permite uma visualização remota do sistema físico e refere-se ao nível de processamento das informações visando o apoio à tomada de decisões. Tais decisões são baseadas no estado atual do sistema físico, fato que favorece uma melhor gestão desse sistema;
- **Nível de configuração:** o último nível, chamado de nível de configuração, pode ser entendido como o momento em que há o retorno do espaço virtual para o espaço físico. Neste caso, têm-se um sistema de controle que poderá agir no sistema real baseando-se nas decisões advindas do nível cognitivo.

A figura 2.2 ilustra tal modelo de cinco fases sugerido por Shin, Cho e Oh (2018).

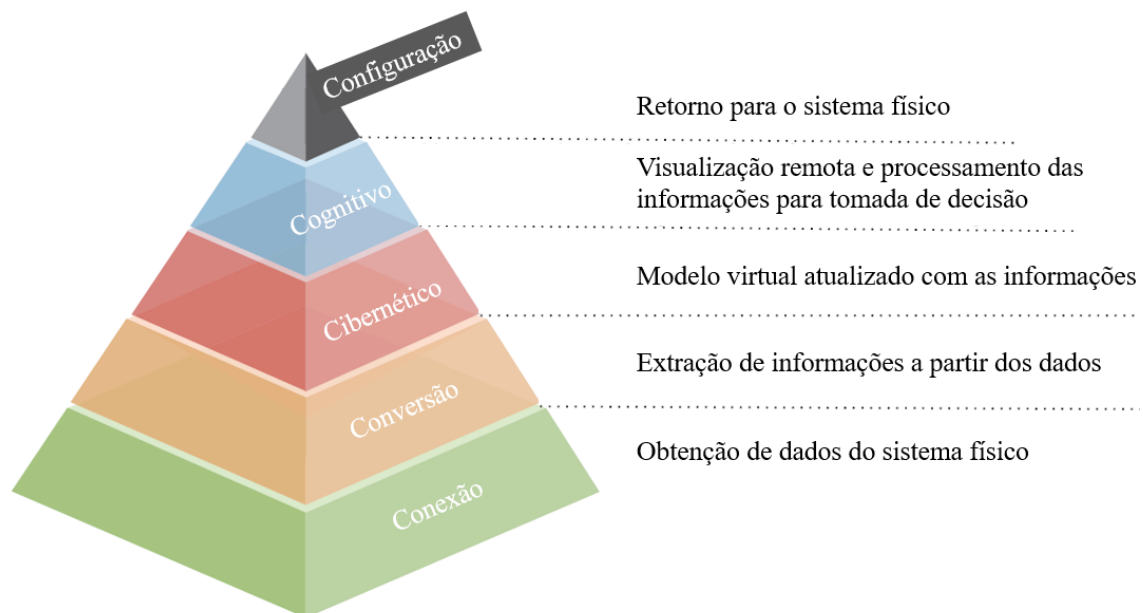


Figura 2.2- Estruturação dos Sistemas Ciber-físicos por meio de cinco fases

Fonte: adaptado de Shin, Cho e Oh (2018)

### 2.2.2. Oportunidades e desafios da Indústria 4.0 e Sistemas Ciber-físicos

Espera-se, com o advento da Indústria 4.0 e de seus pilares, o aparecimento de oportunidades de crescimento para as empresas, as quais conseguirão sanar grande parte das dificuldades vivenciadas em seus processos. Entretanto, há também cenários desafiadores com os quais as mesmas terão de lidar e, segundo Rodič (2017), mesmo que as empresas não estejam interessadas em aderir seus processos aos conceitos da Indústria 4.0, a própria concorrência e parceiros irão exigir isso, uma vez que as organizações operam em rede.

No que se refere aos benefícios trazidos pela Indústria 4.0, Lu (2017) destaca que seus princípios permitem o alcance de um nível mais alto de eficiência operacional e produtividade, bem como um nível mais alto de automação dos processos. O autor cita inúmeras vantagens trazidas pelo advento da Indústria 4.0, como customização da produção, capacidade de adaptação, melhora na interface homem-máquina, alta integração de dados, dentre outras. Além disso, o autor ressalta ainda que a Indústria 4.0 não significa apenas uma indústria mais tecnológica, uma vez que se trata de processos industriais de alta agregação de valor e gestão do conhecimento. Já Pereira e Romero (2017) complementam que a Indústria 4.0 representa um enorme potencial em muitas áreas e sua implementação terá impactos em toda a cadeia de valor, melhorando os processos de produção e engenharia, otimizando a qualidade dos produtos e serviços, melhorando o relacionamento entre clientes e organizações, trazendo novas oportunidades de negócios e benefícios econômicos, mudando os requisitos de educação e transformando o atual ambiente de trabalho. De maneira mais precisa, os autores dividem os benefícios trazidos pela Indústria 4.0 em seis áreas principais: **(1) Processos industriais, (2) Produtos e serviços, (3) Modelos de negócio e mercado, (4) Economia, (5) Ambiente de trabalho** e, por fim, **(6) Desenvolvimento pessoal**. A seguir, são descritas separadamente cada uma dessas áreas e seus respectivos impactos positivos:

- 1. Processos industriais:** esta é a área que mais será impactada pelos preceitos da Indústria 4.0, a qual passará a contar com maior flexibilidade nas operações e uma alocação de recursos mais eficiente. Além disso, as operações serão capazes de se controlar, adaptar e reagir a mudanças de maneira autônoma ou semiautônoma, além de possuírem conexão com toda a rede produtiva, logística e todas as demais que compõem tais processos (PEREIRA e ROMERO, 2017). Neste contexto, Wang et al. (2016) ressaltam que os processos inteligentes serão capazes de produzir produtos personalizados e em pequenos lotes, sem que tais características impactem na eficiência e na lucratividade desses processos;
- 2. Produtos e serviços:** Pereira e Romero (2017) relatam que os produtos e serviços se tornarão cada vez mais modulares e ajustáveis ao perfil de quem os adquire, promovendo assim a personalização em massa, a qual visa de atender aos requisitos específicos de cada cliente. Tortorella e Fettermann (2017) complementam que a Indústria 4.0 permite uma melhor interpretação da demanda do cliente e agiliza o processo de troca de informações e dados na cadeia de valor;

3. **Modelos de negócio e mercado:** uma vez que as cadeias de valor estão se tornando mais responsivas, a Indústria 4.0 traz uma interação mais próxima com os clientes e a adaptação de modelos de negócios passa a considerar cada vez mais as exigências do mercado. Dessa forma, espera-se uma quebra de barreiras quanto às estruturas físicas e acesso à informação. Neste contexto, Safar et al. (2018) relatam que as mudanças quanto ao modelo de negócio e mercado irão abranger tanto as empresas novas quanto as já atuantes no mercado;
4. **Economia:** aspectos como a digitalização trazida pela Indústria 4.0 irão agir como motriz para o desenvolvimento e inovação, fato que trará mudanças positivas significativas no mercado e, conseqüentemente na economia (PEREIRA e ROMERO, 2017);
5. **Ambiente de trabalho:** para Pereira e Romero (2017), com um aumento significativo no número dispositivos inteligentes, cresce também a relevância das interfaces homem-máquina, as quais irão promover uma melhor interação entre estes dois elementos. Tal fato, para os autores, acarreta em um foco maior nos trabalhadores e na sua importância para o sistema no qual ele opera;
6. **Desenvolvimento pessoal:** no que se refere às características pessoais, a Indústria 4.0 traz a visão do futuro do trabalho, o qual exigirá novas competências e irá demandar oportunidades para a aquisição das competências necessárias através de treinamento e educação. Tal cenário acarretará em novas oportunidades de emprego, suprimindo aquelas que serão reduzidas em função dos avanços tecnológicos. Neste contexto, Santos e Benneworth (2019) complementam que a Indústria 4.0 vem modificando as profissões e a maneira como elas são aprendidas, impactando diretamente nas metodologias de ensino e aprendizagem.

Rodič (2017) relata que muitos dos requisitos necessários para a implementação dos conceitos da Indústria 4.0 já estão disponíveis, como sensores, elementos de controle, suporte para utilização da tecnologia de nuvem, softwares integrados, dentre outros. Entretanto, apesar das vantagens evidenciadas a partir a implementação da Indústria 4.0 e dos Sistemas Ciber-físicos, há também alguns desafios a serem enfrentados pelas organizações no que se refere à aderência de seus processos aos preceitos da Indústria 4.0. Neste contexto, Uriarte, Ng e Moris (2018) relatam que as empresas atuais possuem grandes desafios, como a necessidade de adaptação de máquinas e processos, introdução de novas tecnologias, provisão de novos conhecimentos e competências requeridas para os funcionários, bem como evolução dos sistemas e práticas de



gestão. Além disso, Uhlemann, Lehmann e Steinhilper (2017) relatam que, apesar do termo Indústria 4.0 estar sendo amplamente difundido, nota-se grandes incertezas acerca dos benefícios econômicos oriundos dessa nova era industrial, frente ao grande investimento necessário para adequar os processos às exigências tecnológicas.

Xu, Xu e Li (2018) relatam que os desafios a serem enfrentados no âmbito da Indústria 4.0 podem ser classificados como desafios técnicos, desafios quanto à padronização das implementações e, por fim, quanto à segurança e privacidade de dados e informações. Para os autores, os desafios técnicos dizem respeito à infraestrutura atual das empresas, a qual ainda não está preparada para a era da digitalização. Já quanto aos desafios relacionados à padronização, segundo os autores, ainda há certa defasagem no que diz respeito à padronização da implementação de princípios e componentes referentes à Indústria 4.0. Por fim, os desafios quanto à segurança e privacidade dos dados e informações, os autores salientam que, na medida em que os sistemas e processos se tornam conectados, uma preocupação fundamental é assegurar a segurança dos dados e informações que possibilitam tal conexão.

Por fim, outro desafio a ser enfrentado no contexto da Indústria 4.0 refere-se à necessidade de pesquisas na área (TORTORELLA e FETTERMANN, 2017). Dentre as perspectivas futuras para a Indústria 4.0, destacam-se: necessidade de um *framework* genérico para guiar a implementação dos conceitos da Indústria 4.0; necessidade de estudos acerca da implementação dos Sistemas Ciber-físicos através de interfaces integradas e modelos orientados a dados, aptos a analisar e orientar tomada de decisões em tempo real; carência de métodos de verificação dos Sistemas Ciber-físicos, garantindo assim sua validade quanto aos seus resultados; dentre outros (ZHONG et al., 2017; XU, XU e LI, 2018).

### **2.2.3. Papel da Indústria 4.0 e Sistemas Ciber-físicos no apoio aos Conceitos Enxutos**

Sanders, Elangeswaran e Wulfsberg (2016) analisam o ambiente fabril no contexto da Indústria 4.0, sob a perspectiva da filosofia enxuta. Para os autores, os sistemas de manufatura passam a usufruir dos benefícios oriundos da integração em tempo real das diversas áreas que os compõem, visando, sobretudo, a minimização dos desperdícios em escala organizacional. Já Uriarte, Ng e Moris (2018) listam diversos trabalhos envolvendo a análise da filosofia enxuta no âmbito da Indústria 4.0. Os autores também defendem que a integração dos princípios da Indústria 4.0 tende a potencializar a aplicação dos Conceitos Enxutos. As tecnologias e soluções provindas da Indústria 4.0 se aderem perfeitamente aos Conceitos Enxutos, além de serem

capazes de sanar diversas dificuldades encontradas a partir da implementação da filosofia, dentre elas: pouca flexibilidade por parte dos processos produtivos; pouca acuracidade e velocidade quanto às informações advindas das diversas áreas que compõem a cadeia de valor; pouco controle e garantia de manutenção das práticas enxutas após aplicadas, dentre outras (SANDERS, ELANGESWARAN e WULFSBERG, 2016).

Rüttimann e Stöckli (2016) relatam que o pouco conhecimento acerca dos Conceitos Enxutos e dos princípios da Indústria 4.0 pode levar à ideia errada de que tais pilares são incompatíveis. Neste contexto, Tortorella e Fettermann (2017) citam que companhias que implementam amplamente os Conceitos Enxutos são mais propensas em adotar os princípios da Indústria 4.0 e, além disso, sua performance operacional tende a ser melhorada através da combinação desses dois pilares. Rüttimann e Stöckli (2016) complementam que, embora a inteligência e tecnologias embarcadas na Indústria 4.0 prometam maiores desempenhos dos sistemas fabris, é importante ressaltar que nenhuma dessas soluções são válidas caso não se considere a teoria que embasa a eficiência operacional, ou seja, a filosofia enxuta.

Ainda, Sanders, Elangeswaran e Wulfsberg (2016) inferem que a Indústria 4.0 está equipada com soluções de alto nível, as quais possuem as ferramentas necessárias para a implementação e manutenção dos Conceitos Enxutos. Por outro lado, Sony (2018) relata também que é possível que os princípios enxutos possam servir como diretriz filosófica para a integração das diversas áreas, sendo tal integração uma das premissas da Indústria 4.0. Tortorella e Fettermann (2017) relatam que as empresas mais experientes, no que se refere a implementação da filosofia enxuta, apresentam maior propensão à implementação dos princípios da Indústria 4.0.

Buer, Strandhagen e Chan (2018) complementam que a literatura apresenta diversos trabalhos que abordam a integração entre os Conceitos Enxutos e a Indústria 4.0. Entretanto, há ainda campo de pesquisa visando entender melhor como cada um desses pilares impacta o outro em casos práticos. Ainda para os autores, baseando-se nos trabalhos realizados nos últimos anos, nota-se que a relação entre tais pilares pode ser entendida sob quatro perspectivas: (1) as tecnologias trazidas pela Indústria 4.0 apoiam o desenvolvimento das práticas enxutas; (2) a filosofia enxuta facilita a implementação dos princípios da Indústria 4.0; (3) cada um dos pilares afeta diferentes dimensões de desempenho nos sistemas nos quais são aplicados; (4) fatores relacionados ao ambiente no qual são implementados tais pilares podem influenciar de diferentes maneiras os resultados oriundos de tal integração.

#### 2.2.4. Gêmeo Digital para a concepção do sistema Ciber-físico

Uma vez que os Sistemas Ciber-físicos sugerem cópias virtuais dos processos reais, conforme descrito nos tópicos anteriores, além de exigirem certo grau de inteligência para tais cópias, surge então o conceito de **Gêmeo Digital** ou em Inglês, *Digital Twin*. De maneira simplificada, Boschert e Rosen (2016) descrevem o Gêmeo Digital como sendo uma representação virtual que descreve o comportamento de um componente, produto ou sistema, incluindo as principais informações necessárias para a avaliação dos mesmos durante todo o seu ciclo de vida. Dessa forma, nota-se que o Gêmeo Digital atua como a representação virtual à qual se referem os Sistemas Ciber-físicos (KUNATH e WINKLER, 2018). Ainda neste contexto, Uhlemann, Lehmann e Steinhilper (2017) relatam que o Gêmeo Digital representa um pré-requisito fundamental para a concepção desses sistemas.

O nome Gêmeo Digital foi criado por Shafo et al. (2010) e se referia, primeiramente, às cópias virtuais dos sistemas físicos pertencentes ao contexto aeroespacial norte americano, por meio da NASA. De acordo com a sua primeira definição, o Gêmeo Digital é uma ferramenta de simulação multi-física, multi-escala e probabilística de um sistema, a qual utiliza dados reais coletados de maneira automática para espelhar os comportamentos físicos por meio de um modelo virtual. Além disso, o Gêmeo Digital é ultrarrealista e pode representar um ou mais sistemas físicos, visando principalmente avaliar e recomendar mudanças para tais sistemas a fim de otimizá-los (SHAFO et al., 2010).

No decorrer dos anos, desde que o conceito foi criado, nota-se diversas definições acerca do Gêmeo Digital e suas características principais. Kritzinger et al. (2018) relatam que, apesar de ser reconhecido inicialmente como um espelhamento virtual de um produto ou processo, o Gêmeo Digital é mais que puramente um espelho virtual, uma vez que inclui algoritmos capazes de avaliar o sistema real e orientar decisões baseadas no comportamento desse sistema. Já Tao et al. (2018) ressaltam como sendo as principais características do Gêmeo Digital, a capacidade de espelhar o sistema físico de maneira altamente sincronizada e fiel, a conexão com diversas fontes de dados, a qual permite que os dados sejam coletados em tempo real, processados e retornados ao sistema físico e, por fim, a capacidade de otimizar os sistemas físicos enquanto os espelha virtualmente.

No que se refere ao contexto industrial, Kunath e Winkler (2018) relatam que, frente à crescente complexidade dos sistemas produtivos, trabalhadores mais experientes tendem a prever consequências e traçar soluções de maneira mais fácil e eficiente, quando comparados a outros com menos experiência. Neste caso, o Gêmeo Digital visa justamente evitar tal cenário ao

prever diferentes soluções e seus respectivos impactos, além de recomendar melhores decisões levando-se em consideração as características do ambiente real. Zhong et al. (2017) complementam ao relatar que, no contexto da Indústria 4.0, os sistemas produtivos serão capazes de monitorar os processos reais e transferir informações para o Gêmeo Digital, o qual será capaz de auxiliar na tomada de decisão em cooperação com humanos, máquinas, sensores, dentre outros, compondo assim o Sistema Ciber-físico.

No que tange os componentes do Gêmeo Digital, Tao et al. (2018) revelam que o mesmo é composto basicamente por três partes principais: (1) sistemas físicos, os quais se deseja espelhar; (2) sistemas virtuais, que representam o físico de maneira detalhada e suficiente; (3) sincronismo entre ambos os sistemas. Já Rodič (2017) relata, de maneira mais detalhada, os componentes necessários para a concepção do Gêmeo Digital. Para o autor, é necessário compreender dois conceitos principais, a **Sombra Digital** e o **Controlador Digital**, ou em Inglês, *Digital Shadow* e *Digital Master*, respectivamente. Para o autor, o conceito de Sombra Digital refere-se à coleta estruturada dos dados advindos do sistema real. Uma vez que os dados dos sistemas reais são coletados em tempo real, bem como organizados de forma a permitir sua utilização para a tomada de decisão, têm-se a Sombra Digital destes sistemas. Para Stark, Kind e Neumeyer (2017), qualquer sistema físico composto por produtos e/ou processos produz uma Sombra Digital ao se considerar os dados provindos destes produtos e processos.

A partir da Sombra Digital, há a necessidade de transferir tais informações para um modelo virtual que descreve o sistema real e, dessa forma, têm-se a figura do Controlador Digital. Tal sistema age como sendo uma interface que, a partir da Sombra Digital, utiliza de algoritmos, modelos de simulação e otimização, bem como de ferramentas de auxílio à tomada de decisão, a fim de permitir que haja o espelhamento inteligente do sistema real. Além disso, o Gêmeo Digital pode ser entendido como a junção da Sombra Digital e do Controlador Digital (STARK, KIND e NEUMEYER, 2017; RODIČ, 2017). A figura 2.3 ilustra tal composição do Gêmeo Digital.

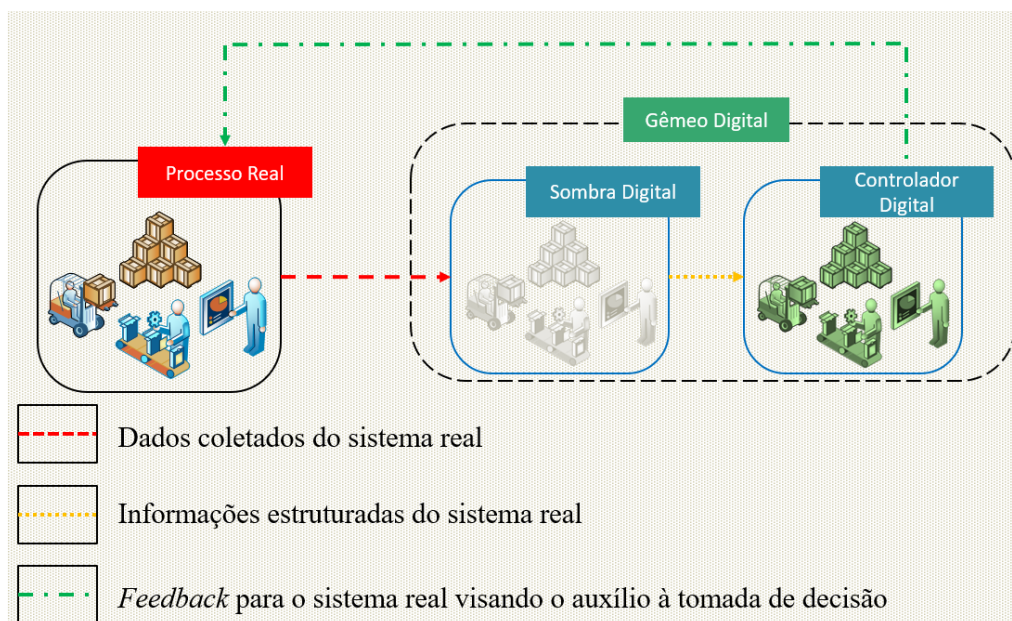


Figura 2.3- Estrutura do Gêmeo Digital e seus componentes

Fonte: adaptado de Stark, Kind e Neumeyer (2017) e Rodič (2017)

### 2.3. Construção do Gêmeo Digital por meio da Simulação

Dentre as ferramentas que irão se destacar no ambiente da Indústria 4.0, juntamente com os Sistemas Ciber-físicos por meio do Gêmeo Digital, Rodič (2017) ressalta que a Simulação a Eventos Discretos é peça chave na concepção da indústria do futuro. Para o autor, a SED é capaz de realizar justamente o papel do Gêmeo Digital na Indústria 4.0 e tal conceito está relacionado com modelos de simulação integrados aos diversos sistemas de operações, de forma a fornecer suporte a estes sistemas durante todo o seu ciclo de vida. Neste contexto, Uriarte, Ng e Moris (2018) concordam ao afirmar que a virtualização, uma das características principais da Indústria 4.0, está diretamente ligada com o Gêmeo Digital e, neste âmbito, a SED possui importante papel para a concretização de tal virtualização. Por fim, Kritzinger et al. (2018) relatam que, no contexto da Indústria 4.0, o conceito de Gêmeo Digital explora a interface entre o físico e o virtual, baseando-se no ambiente real através de seus dados e utilizando-se de ferramentas como a simulação para avaliar cenários e apoiar a tomada de decisões.

No que tange a evolução da simulação, Boschert e Rosen (2016) ressaltam que a ferramenta vive a era do Gêmeo Digital nos últimos anos e, segundo os autores, sua concepção baseia-se na fácil modelagem e manipulação dos modelos, simulação integrada aos dados reais dos sistemas físicos, dados estes coletados de maneira automática, bem como uma simulação contínua ao longo de todo o ciclo de vida dos processos e produtos. Ainda para os autores, ao se referir à simulação no papel do Gêmeo Digital, deve-se considerar que o mesmo deve ser

planejado e construído para objetivos e aplicações específicas e, uma vez definidos tais objetivos, parte-se para a definição dos dados necessários, bem como a construção dos modelos de simulação para tal aplicação. Finalmente, Rodič (2017) complementa que deve-se considerar que a simulação sofrerá algumas mudanças quanto à sua utilização como Gêmeo Digital. Dentre elas, o autor destaca:

- Conectividade com os sistemas corporativos, como MRPs, ERPs, bases de dados, dentre outros, integrando verticalmente os sistemas;
- Modelos de simulação com alto nível de detalhes, pouca abstração e que exploram os recursos gráficos e visuais;
- Abastecimento automático dos modelos de simulação com os dados reais das operações, possibilitando o espelhamento virtual do mundo físico a partir da integração horizontal do sistema.

A concepção do Gêmeo Digital, ao se considerar a utilização da simulação como tal, começa com a fase de animação gráfica, a qual procura descrever com detalhes o ambiente físico e, em seguida são implementados os recursos de simulação visando a avaliação do desempenho do sistema físico. Neste caso, vale ressaltar ainda que a simulação pode ser utilizada com diferentes níveis de detalhes, ou seja, é esperado que determinadas análises demandem cenários mais detalhados e específicos, enquanto outras tenham uma abordagem mais abrangente do sistema físico analisado (SCHLUSE e ROSSMANN, 2016). Por fim, os autores relatam que a partir do uso da simulação para o desenvolvimento, caracterização, verificação, validação e otimização dos Gêmeos Digitais, os mesmos devem se tornar, com o passar dos anos, tão naturais quanto o desenvolvimento de *softwares*, por exemplo.

Além disso, Uriarte, Ng e Moris (2018) relatam que, no que se refere à implementação do Gêmeo Digital e demais conceitos e ferramentas da Indústria 4.0, há a necessidade de grandes investimentos para aquisição e implementação de novas tecnologias. Neste contexto, Uhlemann, Lehmann e Steinhilper (2017) concordam quanto à necessidade de altos investimentos visando promover a estrutura necessária para a implementação destes conceitos. Tendo em vista tal cenário, a simulação atua como ferramenta chave para facilitar a adaptação e evolução dos sistemas em busca de tais soluções tecnológicas, uma vez que se apresenta como uma alternativa financeiramente viável em comparação com as demais opções disponíveis, estas representadas, em sua maioria, por *softwares* que já acompanham determinados produtos e soluções e que possuem pouca flexibilidade e escopo limitado (DAMIANI et al., 2018; URIARTE, NG e MORIS, 2018).

Entretanto, apesar do grande potencial da utilização da simulação como Gêmeo Digital, nota-se que ainda há alguns desafios a serem superados, bem como oportunidades de pesquisa na área. Neste caso, Rodič (2017) relata que a adoção da simulação dentro dos conceitos da Indústria 4.0 requer uma participação conjunta entre pesquisadores e indústria, de forma a possibilitar a utilização de diferentes tecnologias, ferramentas e conceitos, bem como encurtar a distância entre o ambiente industrial e o de pesquisa. Quanto aos desafios desta nova era da simulação, dentro do contexto dos Sistemas Ciber-Físicos, o autor ainda ressalta a necessidade de pesquisas que abordem a validação do modelo de simulação, frente às mudanças e adaptações do sistema real. Já Uriarte, Ng e Moris (2018) relatam que, além da validação em tempo real, são necessárias também pesquisas envolvendo a integração de sistemas, maior segurança e troca de dados entre tais sistemas, disponibilidade, padronização e centralização desses dados em tempo real, dentre outras.

### 3. MÉTODO DE PESQUISA

Este capítulo apresenta o método de pesquisa a ser utilizado no presente trabalho. Primeiramente será apresentada a classificação da pesquisa, seguida de uma breve descrição do objeto de estudo e, por fim, será apresentado o método de condução do trabalho.

#### 3.1. Classificação da pesquisa

Para Prodanov e Freitas (2013), a pesquisa científica pode ser definida como um estudo planejado acerca de um problema ou situação e, neste caso, o método de abordagem destas situações é o que caracteriza o seu aspecto científico. Neste contexto, a classificação da pesquisa depende do ponto de vista adotado e pode auxiliar no direcionamento das atividades a serem executadas. Pode-se classificar a pesquisa quanto à sua natureza, quanto ao seu objetivo, quanto a sua abordagem e, por fim, quanto ao método utilizado (PRODANOV e FREITAS, 2013; MIGUEL et al., 2018).

##### I. Natureza da pesquisa

De acordo com Prodanov e Freitas (2013), a pesquisa pode ser classificada como **Básica**, a qual objetiva gerar conhecimentos científicos, porém sem aplicação prevista, ou **Aplicada**, quando os conhecimentos gerados objetivam a aplicação prática em problemas específicos. Baseando-se em tais considerações, pode-se classificar a presente pesquisa como **Aplicada**, uma vez que esta será desenvolvida em um objeto de estudo real e com viés prático.

## II. Objetivo da pesquisa

Já quanto ao seu objetivo, a pesquisa pode ser classificada como **Exploratória**, quando objetiva-se descobrir e/ou compreender determinados fenômenos, bem como construir hipóteses acerca do mesmo; **Descritiva**, quando objetiva-se descrever características de determinada população ou fenômeno; e, por fim, **Explicativa**, quando a preocupação é identificar fatores que interferem em fenômenos. A pesquisa de caráter explicativo está vinculada a sistemas e processos reais e relacionada, em sua maioria, com métodos experimentais (GIL, 2002). Neste contexto, esta pesquisa pode ser classificada como **Explicativa**, já que serão analisados fenômenos de um processo real, visando obter relações entre estes e seus parâmetros, bem como serão propostas análises periódicas de cenários a fim de se otimizar o sistema.

## III. Abordagem da pesquisa

Miguel et al. (2018) salientam para dois tipos principais de abordagens de pesquisa. A primeira é a **Qualitativa**, onde destaca-se a ausência ou redução da quantificação e a interpretação de um fenômeno visando descrever, decodificar e entender suas variáveis. A segunda abordagem é a **Quantitativa**, na qual parte-se da teoria para posteriormente formular hipóteses, coletar dados através de observações, analisar os dados e, por fim, gerar resultados. Tal abordagem caracteriza-se pela mensuração das variáveis de pesquisa. Neste contexto, pode-se classificar a presente pesquisa como **Quantitativa**, uma vez que pretende-se analisar um sistema real de maneira a mensurar seus parâmetros e resultados. Neste caso, destacam-se as etapas de coleta de dados reais, execução de experimentos e análises e, posteriormente, interação com o sistema real, de forma a interferir no mesmo baseando-se nos resultados obtidos.

## IV. Método de pesquisa

Por fim, pode-se classificar a pesquisa por meio do método utilizado e, neste caso, Miguel et al. (2018) apresentam alguns possíveis métodos no que diz respeito à abordagem quantitativa. Dentre eles, destacam-se a **Pesquisa de Avaliação (survey)**, **Modelagem e Simulação** e **Experimentos**. O presente trabalho utilizará o método **Modelagem e Simulação**, onde, basicamente, manipula-se variáveis e seus níveis em um modelo matemático e/ou computacional. Tal modelo apresenta uma abstração da realidade e, a partir dos resultados e sem afetar o ambiente real durante tal manipulação, parte-se para as análises e conclusões as quais podem ou não inferir novamente no sistema real (MIGUEL et al., 2018). Para Bertrand e Fransoo (2002), no que se refere à utilização de modelos computacionais de simulação, tal



técnica é utilizada quando o caso em estudo é muito complexo para se utilizar modelos matemáticos formais e, geralmente, esse tipo de pesquisa possui maior relevância científica, uma vez que os modelos computacionais podem abranger uma variedade muito maior de casos. A figura 3.1 ilustra a classificação da presente pesquisa.

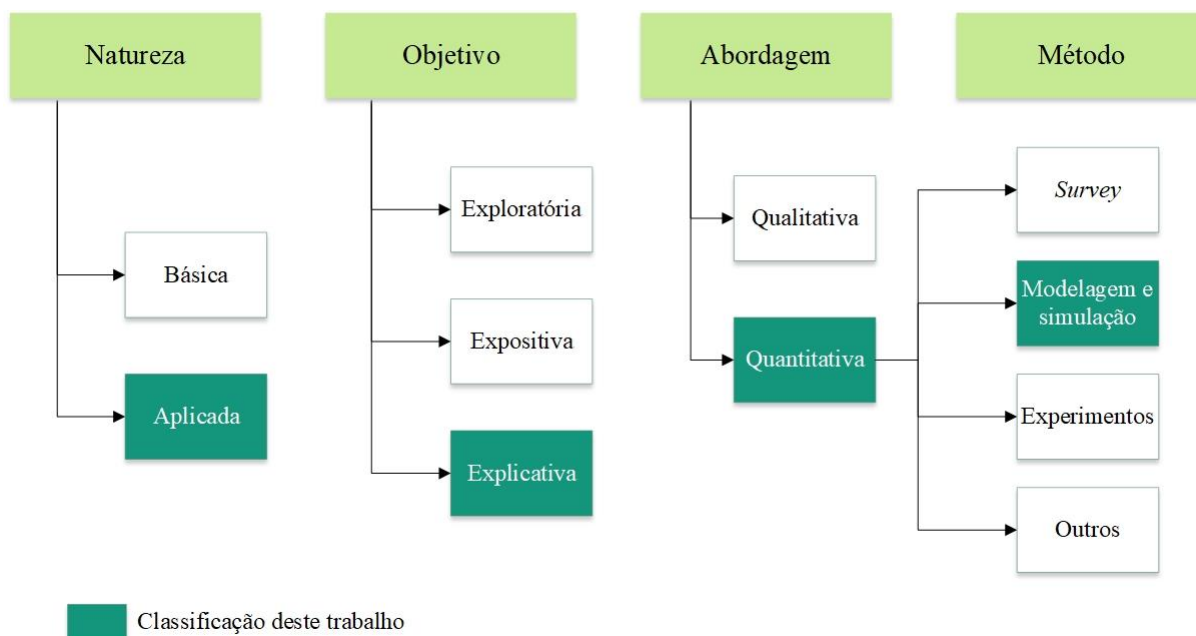


Figura 3.1- Classificação da pesquisa

Fonte: adaptado de Prodanov e Freitas (2013) e Miguel et al. (2018)

Dentro do método de Modelagem e Simulação, pode-se ainda classificar a pesquisa quantitativa em dois tipos: **Axiomática** e **Empírica**. A pesquisa axiomática estuda um determinado fenômeno de maneira idealizada e permite inferir e produzir conhecimento acerca de determinadas variáveis baseando-se em outras variáveis do modelo. Já a pesquisa empírica foca na relação entre os resultados do modelo e o processo real, de forma que haja uma busca pela correspondência exata entre ambos, objetivando inferir acerca de estratégias, decisões e ações as quais promovem a melhoria do sistema real (BERTRAND e FRANSOO, 2002; MIGUEL et al., 2018). Dessa forma, a presente pesquisa se classifica como **Empírica**, uma vez que trata-se de um trabalho desenvolvido a partir de uma análise de um processo real, objetivando fornecer referências para tomada de decisões baseando-se no comportamento deste sistema.

Por fim, de acordo com Miguel et al. (2018), os modelos de simulação podem ser utilizados para análise em um instante de tempo, chamados de **Modelos Estáticos**, ou para análise no decorrer do tempo, os **Modelos Dinâmicos**. No caso de modelos dinâmicos, estes podem ainda ser classificados em **Contínuos**, onde o comportamento de um sistema muda continuamente com o tempo, ou **Discretos**, onde são descritas mudanças em um sistema, as quais ocorrem em

pontos discretos do tempo. O presente trabalho irá utilizar de um **Modelo de Simulação Dinâmico** e que descreve **Eventos Discretos** no decorrer do tempo, representado pela **Simulação a Eventos Discretos (SED)**. A figura 3.2 ilustra a classificação final da pesquisa, dentro do método de modelagem e simulação.

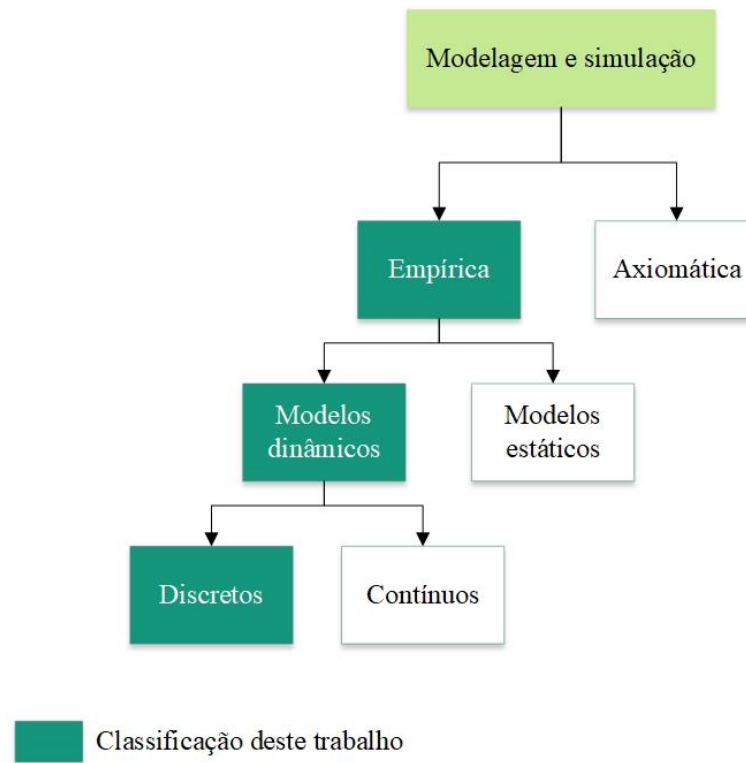


Figura 3.2- Classificação da pesquisa dentro do método de modelagem e simulação

Fonte: elaborado pelo próprio autor

### 3.2. Objeto de estudo

O objeto de estudo do presente trabalho é um processo de abastecimento de peças de uma indústria do ramo aeronáutico, o qual é composto por quatro linhas produtivas localizadas em diferentes pontos da planta e que possuem demandas independentes. Cada linha conta com um estoque intermediário no local, chamado de **posto *kanban***, permitindo que os materiais fiquem dispostos próximos à produção. Na medida em que tais materiais são consumidos, deve haver o reabastecimento periódico destes materiais nos respectivos postos *kanbans*, permitindo o correto funcionamento das linhas produtivas. Cabe destacar que estes postos são reabastecidos com materiais presentes no estoque geral da operação. A planta estudada possui uma área construída relativamente grande, uma característica comum às indústrias em geral, permitindo ao colaborador, responsável pelo abastecimento, a escolha de uma dentre inúmeras rotas de abastecimento possíveis. Neste contexto, a escolha da melhor rota de abastecimento está

relacionada muitas vezes à experiência do colaborador e não se pode afirmar que a rota escolhida é, de fato, a escolha mais eficiente.

O cenário apresentado constitui um problema corriqueiro presente em indústrias dos mais variados segmentos e justifica a contribuição deste estudo. Por meio da simulação como ferramenta diária de auxílio à tomada de decisão, objetiva-se reduzir desperdícios relacionados à movimentação de pessoas e ao transporte de materiais, tornando o processo de abastecimento mais enxuto e servindo de base para replicações em outros processos desta natureza. A figura 3.3 ilustra a localização dos postos *kanbans* presentes na planta, objeto deste estudo. Maiores detalhes sobre o processo de abastecimento são apresentados nas seções seguintes.

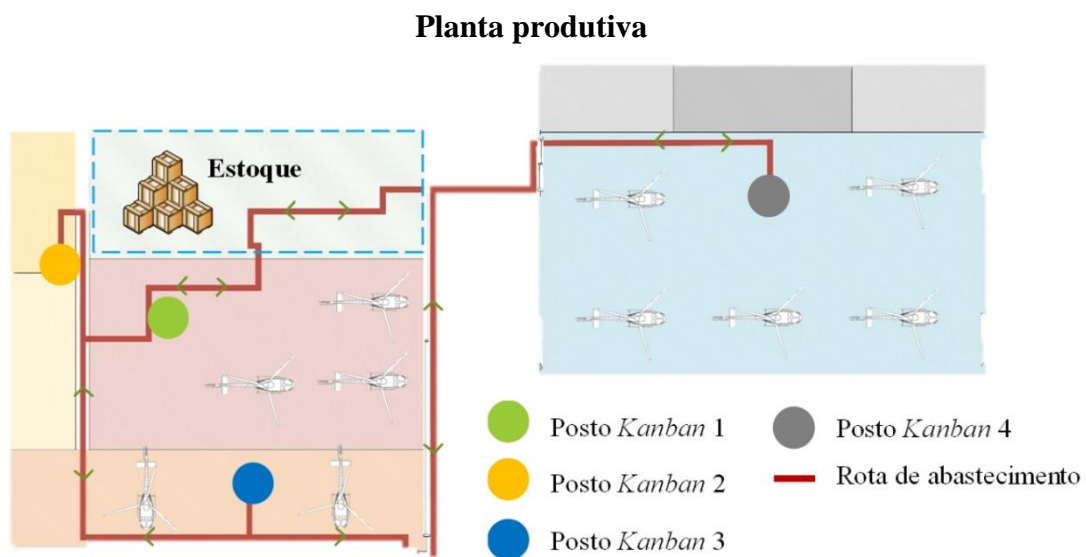


Figura 3.3- Ilustração da planta produtiva objeto deste estudo

Fonte: elaborado pelo próprio autor

### 3.3. Método para condução do projeto de simulação

Uma vez definido o método de pesquisa a ser utilizado, neste caso a Modelagem e Simulação por meio da Simulação a Eventos Discretos (SED), o próximo passo é estruturar as etapas a serem realizadas no decorrer da pesquisa, de forma a se alcançar os objetivos propostos. Para tal, há diversos trabalhos na literatura que abordam métodos para condução de projetos de simulação, conforme apresentado no capítulo 2 deste trabalho. Levando em consideração critérios relacionados à robustez e abrangência do método quanto às suas etapas principais, optou-se, neste trabalho, pela utilização do método proposto por Montevechi et al. (2010).

O método proposto pelos autores é estruturado em três grandes fases. A primeira fase é chamada de **Concepção**. Nela serão contempladas as seguintes atividades: (1) Definição dos objetivos e

do sistema, (2) Construção do modelo conceitual, (3) Validação do modelo conceitual, (4) Documentação do modelo conceitual e, por fim, (5) Modelagem dos dados de entrada do modelo. Como resultado da fase de Concepção, têm-se o Modelo Conceitual do objeto de estudo. Já a segunda fase é chamada de **Implementação** e apresenta as seguintes etapas: (6) Construção do modelo computacional, (7) Verificação do modelo computacional e (8) Validação do modelo computacional. As etapas de verificação e validação garantem que o modelo computacional represente fielmente o objeto do estudo. Dessa forma, o resultado desta fase é o chamado Modelo Operacional, o qual pode ser utilizado para experimentos e análises futuras. Finalmente, a última fase é a chamada **Análise**, a qual é composta pelas etapas: (9) Definição do projeto experimental, (10) Execução dos experimentos, (11) Análise estatística e, por fim, (12) Conclusões e recomendações. Tal método é apresentado em detalhes pela figura 3.4.

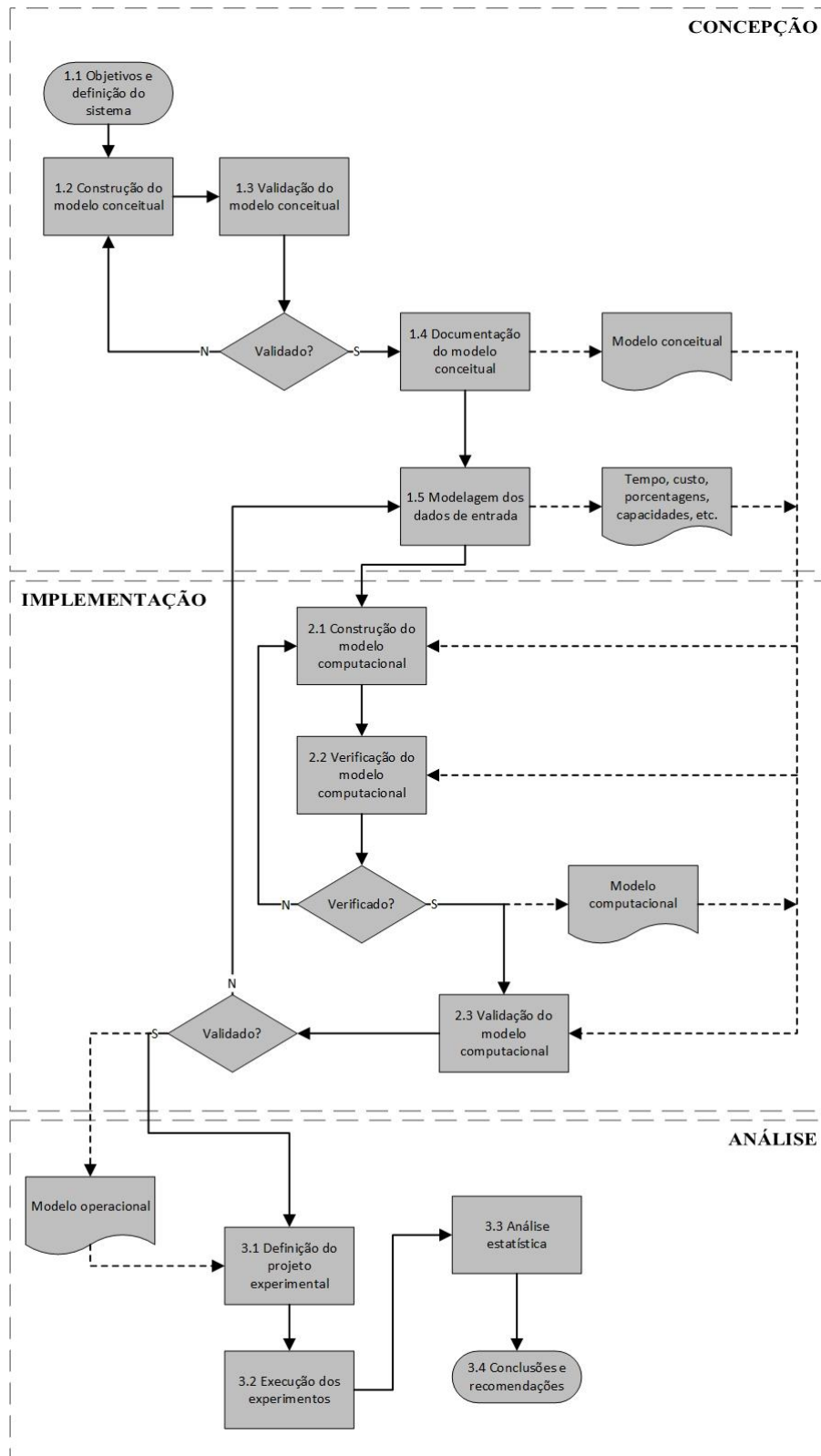


Figura 3.4- Método para condução de projetos de simulação

Fonte: Montevechi et al. (2010)

Porém, antes de aplicar o método apresentado anteriormente, algumas modificações são necessárias, de forma a adequá-lo ao cenário atual de utilização da simulação. A maneira com

que a simulação é utilizada vem sofrendo algumas alterações com o advento da Indústria 4.0 e de conceitos como o Gêmeo Digital. Neste contexto, Uriarte, Ng e Moris (2018) ressaltam que a simulação deixa de ser uma ferramenta de análises pontuais e isoladas para se conectar e integrar com diversos dados e fontes, caminhando em direção ao Gêmeo Digital para suporte à tomada de decisões. Ainda, quanto à utilização da simulação no cenário da Indústria 4.0, Rodič (2017) relata o fato de que modelos de simulação que requerem o auxílio de especialistas em simulação tendem a ser substituídos por modelos os quais podem ser operados por qualquer usuário, sem a necessidade de conhecimento prévio do modelo e do *software*. Por fim, algumas outras características demandadas aos modelos de simulação, no cenário da Indústria 4.0, englobam: (i) necessidade de conexão e integração do modelo de simulação com os sistemas de informação e gestão; (ii) adaptação do modelo em tempo quase real de acordo com as mudanças do sistema físico; (iii) conexão com ferramentas de análise e otimização; (iv) auxílio à tomada de decisão, dentre outras (URIARTE, NG e MORIS, 2018).

Portanto, tendo em vista que o método apresentado por Montevechi et al. (2010) refere-se à projetos tradicionais de simulação, os quais abordam análises pontuais de determinados sistemas, algumas alterações tornam-se necessárias para adequá-lo ao cenário atual de utilização da simulação. Neste contexto, as seguintes modificações foram realizadas em cada uma das fases:

### **I. Concepção**

Por se tratar de etapas conceituais como entendimento do problema, dos objetivos, desenvolvimento do modelo conceitual, bem como a modelagem dos dados de entrada do modelo, esta não sofreu alterações quanto suas etapas. Entretanto, é proposta uma nova nomenclatura para a fase, objetivando uma melhor representação quanto às atividades pertencentes à mesma. Dessa forma, a primeira fase do método passa a se chamar **Modelagem Conceitual**.

### **II. Implementação**

Já quanto à segunda fase, propõe-se a criação de duas etapas que irão auxiliar na integração do modelo de simulação com o sistema real, permitindo a comunicação entre os sistemas físico e digital por meio dos dados do processo. Estas duas etapas, chamadas de **Definição dos dados de atualização do modelo e das respostas desejadas** e **Estruturação da interface com o processo real**, foram inseridas no método proposto por Montevechi et al. (2010) para adequar a utilização da simulação dentro do contexto da Indústria 4.0 e do conceito de Gêmeo Digital. Kunath e Winkler (2018) ressaltam que, no que se refere à utilização da simulação como Gêmeo

Digital, os dados relevantes são enviados do sistema real para o modelo digital, permitindo o espelhamento do sistema real pelo seu correspondente digital. Após espelhado, o sistema digital é então simulado e, posteriormente, instruções computadorizadas encaminham os resultados do modelo digital para o ambiente físico novamente. Os autores definem como objetivo principal desta integração viabilizar a tomada de decisão por meio dos resultados da simulação e, neste contexto, as etapas criadas viabilizam justamente tal premissa. Ambas as etapas serão detalhadas durante a aplicação do método. A presente fase também teve alteração quanto à sua nomenclatura, passando a se chamar **Modelagem Computacional**.

### **III. Análise**

Por fim, a fase de análise, terceira e última do método proposto por Montevechi et al. (2010), também sofreu algumas modificações. Foram criadas três novas etapas, as quais substituem as etapas propostas pelos autores. Uma vez que a simulação, no papel de Gêmeo Digital, passa a refletir o sistema real e se adaptar quanto às suas mudanças, torna-se necessário um método que viabiliza a utilização constante da ferramenta. Foram criadas, portanto, três novas etapas, chamadas de **Definição dos cenários a serem testados**, **Execução periódica dos cenários** e **Análises e tomada de decisões**. Tais etapas também serão detalhadas durante a aplicação.

Do ponto de vista de condução de projetos de simulação, as etapas propostas estão de acordo com as necessidades atuais de utilização da simulação no contexto atual, conforme reforça Rodič (2017) ao relatar que a simulação como Gêmeo Digital está relacionada com modelos de simulação integrados ao sistema real e que dão suporte à tomada de decisões durante todo o ciclo de vida de um processo. Por fim, a nomenclatura da fase também foi alterada visando uma melhor representação das etapas pertencentes a ela. Dessa forma, a terceira fase do método passa a se chamar **Modelagem Operacional**. Vale ressaltar que a fase de Modelagem Operacional representa, a partir das modificações propostas, o Gêmeo Digital por meio da simulação.

Portanto, a partir das modificações realizadas, pode-se partir para a aplicação do método adaptado ao objeto de estudo apresentado na seção 3.2. A figura 3.5 ilustra as modificações realizadas no método, visando a condução de projetos de simulação no contexto da Indústria 4.0 e do Gêmeo Digital. Tal método será seguido nas seções referentes à aplicação, onde serão detalhadas cada uma das etapas pertencentes ao método proposto.

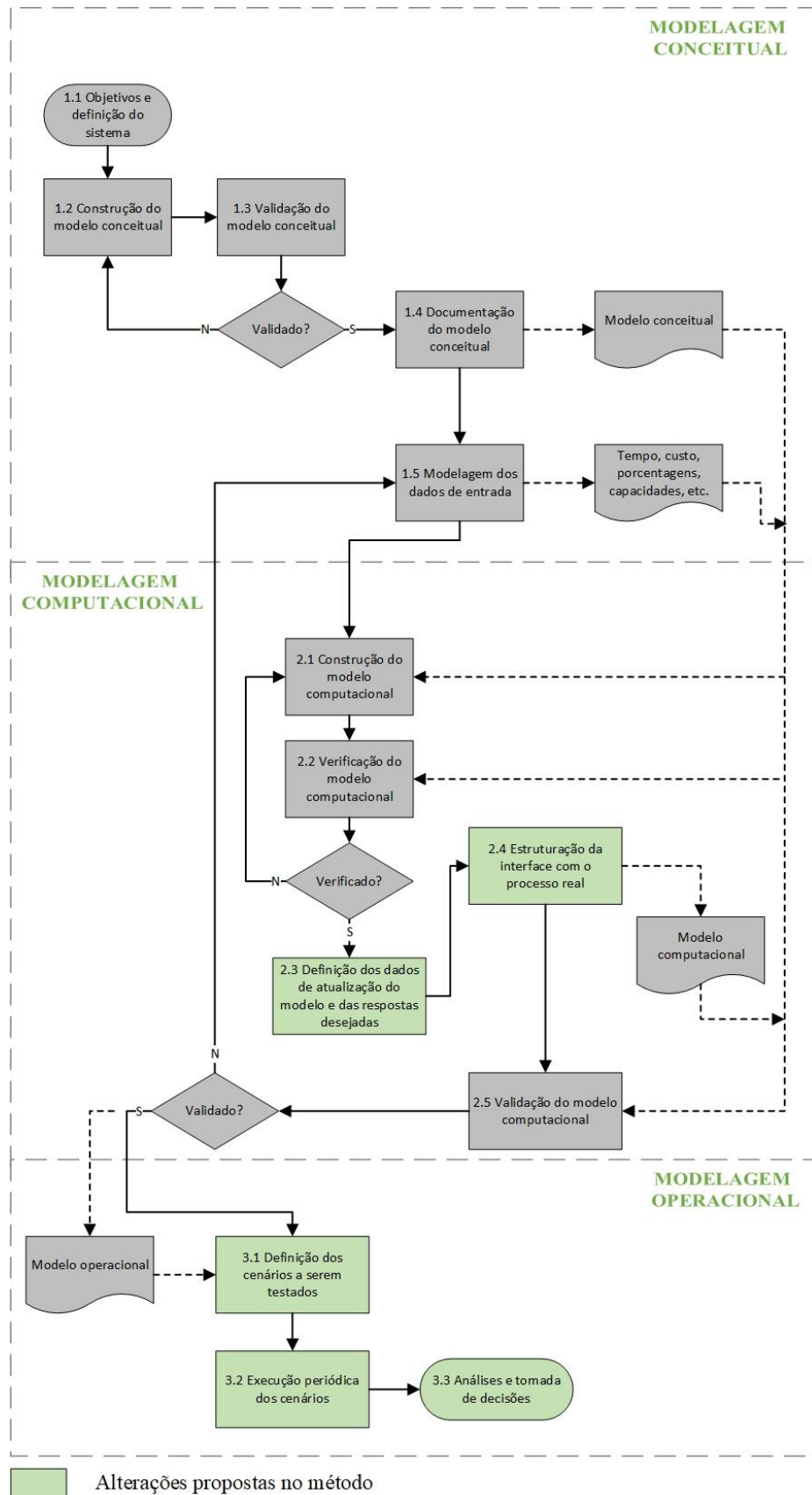


Figura 3.5- Proposta de alteração do método para condução de projetos de simulação

Fonte: Adaptado de Montevechi et al. (2010)



## 4. APLICAÇÃO

Nos tópicos seguintes, a sistemática proposta para a utilização da simulação, dentro dos princípios da Indústria 4.0 e dos conceitos de Gêmeo Digital, será aplicada em um objeto de estudo, conforme apresentado na seção 3.2. O processo de abastecimento de materiais foi acompanhado diariamente durante sete meses, permitindo assim um completo entendimento de suas características principais, bem como a realização de todas as etapas da aplicação. Seguindo o método adaptado de Montevechi et al. (2010), apresentado na seção 3.3 (figura 3.5), primeiramente será estruturada a fase de **Modelagem conceitual**, seguida da **Modelagem computacional** e, por fim, a fase de **Modelagem operacional**. Ao fim de cada uma dessas fases serão obtidos o modelo conceitual, o modelo computacional e o modelo operacional representado pelo Gêmeo Digital, respectivamente.

### 4.1. Modelagem conceitual

A fase de modelagem conceitual engloba uma sequência de etapas, conforme ilustra a figura 3.5, apresentada na seção 3.3. A seguir serão apresentados os **objetivos e definição do sistema**, seguidos pela **construção do modelo conceitual**, **validação do modelo conceitual**, **documentação do modelo conceitual** e, por fim, a **modelagem dos dados de entrada**.

#### 4.1.1. Objetivos e definição do sistema

Tendo em vista o objetivo geral deste trabalho, o qual consiste em avaliar a utilização da simulação como ferramenta diária de auxílio à tomada de decisão, com base nos princípios da Indústria 4.0 e no conceito de Gêmeo Digital, pode-se definir os objetivos específicos do projeto de simulação. Uma vez que o objeto de estudo, conforme apresentado na seção 3.2, consiste em um processo de abastecimento de materiais, nota-se que tal processo figura dentre as atividades necessárias, porém que não agregam valor ao cliente final, visto que envolve movimentações e transportes, desperdícios já citados por Ohno (1997). Tal fato justifica a escolha do objeto de estudo, uma vez que não se pode eliminar tais atividades, deve-se otimizá-las, a fim de se obter um aumento de eficiência. Dessa forma, o primeiro objetivo do modelo de simulação é fornecer a rota mais eficiente do ponto de vista da distância percorrida pelo operador responsável pelo processo.

Além disso, a operação de abastecimento é gerida a partir de indicadores diários, estes que levam em consideração a quantidade de materiais abastecidos diariamente nos postos *kanbans*. Dessa forma, quanto mais materiais abastecidos diariamente, melhor é o desempenho do

processo do ponto de vista dos gestores. Além disso, deve-se levar em consideração que nem sempre é possível abastecer todos os postos *kanbans* em apenas um dia de trabalho, visto que as linhas produtivas podem variar seu padrão de consumo de materiais, podendo demandar um alto volume de reposição, bem como sobrecarregar o processo de abastecimento. Neste caso, a escolha da rota de abastecimento impacta diretamente no abastecimento dos postos *kanbans*. Portanto, o segundo objetivo do modelo de simulação é fornecer a rota mais eficiente do ponto de vista da quantidade de materiais abastecidos diariamente.

Para permitir o alcance dos objetivos supracitados, será construído um modelo de Simulação a Eventos Discretos (SED), o qual permitirá simular todas as possíveis rotas de abastecimento em função da demanda dos postos *kanbans*. O modelo de simulação deverá ser capaz de compreender as demandas de abastecimento de cada posto *kanban*, simular as possíveis rotas e fornecer a melhor rota a ser seguida, levando em consideração o menor deslocamento aliado a uma maior quantidade de materiais abastecidos. Além disso, será construída também uma interface entre o modelo de simulação e o processo real, permitindo a integração de ambos e tornando o modelo virtual um reflexo do sistema real. O propósito da interface é fazer com que, na medida em que o processo real altere a sua demanda por materiais, o modelo seja atualizado periodicamente. Dessa forma, torna-se possível a tomada de decisão baseando-se nos resultados do modelo, interferindo novamente no processo real e fechando o ciclo de gestão. A figura 4.1 ilustra de maneira simplificada tal proposta.

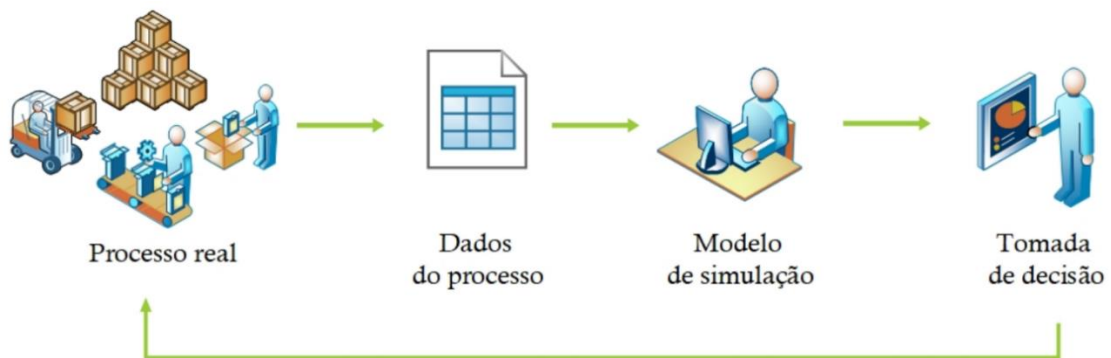


Figura 4.1- Síntese da proposta de utilização da simulação integrada ao processo real

Fonte: elaborado pelo próprio autor

#### 4.1.2. Construção do modelo conceitual

Chwif e Medina (2015) ressaltam que, a partir de uma abstração do processo real, deve-se partir para uma técnica adequada para representação de modelos de simulação. Neste contexto, Banks e Chwif (2010) já relatavam algumas vantagens de se construir um modelo conceitual, tais

como: interação e validação com os responsáveis pelo processo desde o início do projeto; maior facilidade de correção do modelo conceitual, se comparado a correções no modelo computacional; documentação do modelo conceitual; melhor estimativa de tempo para as etapas de modelagem computacional e posterior validação. Para a modelagem conceitual deste trabalho, utilizou-se a técnica de modelagem IDEF-SIM, desenvolvida por Leal (2008), a qual utiliza elementos lógicos já empregados em outras técnicas de modelagem, adaptando-os para o contexto da simulação. Ainda, a utilização do IDEF-SIM permite uma modelagem conceitual mais próxima dos requisitos da modelagem computacional, auxiliando na redução do tempo gasto durante a realização mesma (LEAL, ALMEIDA e MONTEVECHI, 2008). Os símbolos IDEF-SIM são apresentados no Anexo A.

O modelo conceitual apresenta a sequência de atividades realizadas no processo, seus respectivos responsáveis, bem como as regras que determinam toda a lógica. Neste contexto, o modelo conceitual deste trabalho foi dividido em duas partes, facilitando assim a definição do escopo a ser trabalhado e a modelagem computacional. São elas: **(1) Recebimento e estocagem** e **(2) Abastecimento de *kanbans***. A primeira parte, chamada de **Recebimento e estocagem**, engloba desde o momento em que os materiais chegam na planta produtiva até a sua alocação no estoque geral, aguardando a solicitação para o reabastecimento das linhas. Tal etapa, apesar de não influenciar diretamente no processo de abastecimento, possui grande importância para que se entenda o processo de forma geral. Já a segunda parte, chamada de **Abastecimento de *kanbans***, retrata desde o momento em que o material foi solicitado pelas linhas produtivas até o momento em que o reabastecimento é finalizado e o material encontra-se em um dos postos *kanbans*. O reabastecimento dos postos *kanbans* é o principal elemento deste trabalho, já que toda a análise será feita com base neste processo. As figuras 4.2 e 4.3 apresentam os modelos conceituais das partes (1) e (2) do processo, respectivamente.

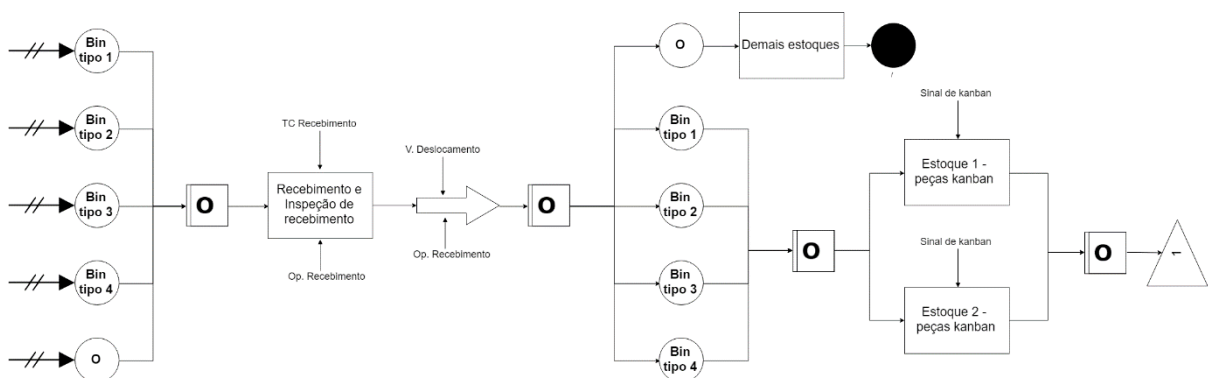


Figura 4.2- Modelo conceitual do processo (Parte 1: Recebimento e estocagem)

Fonte: elaborado pelo próprio autor

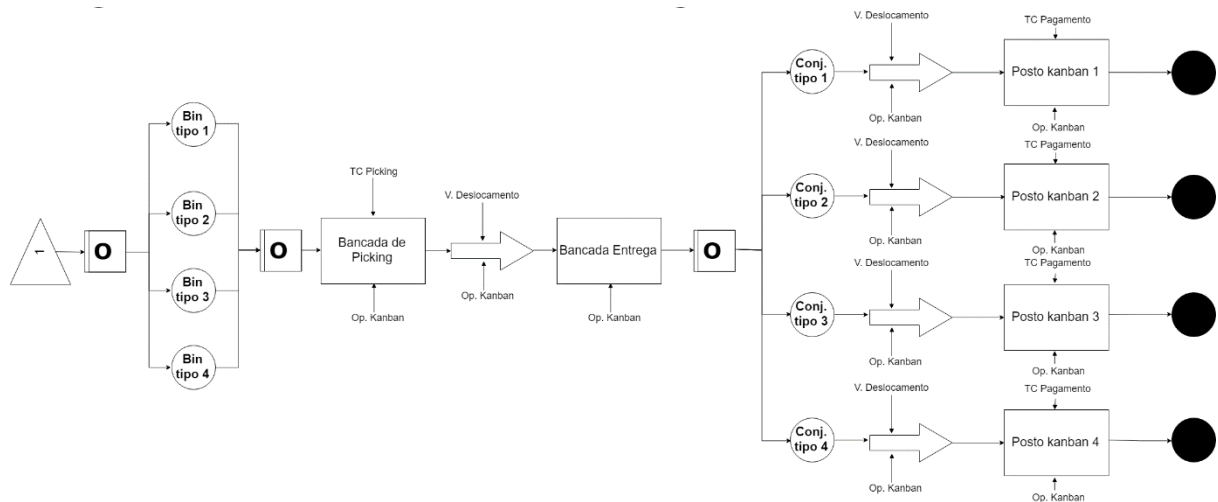


Figura 4.3- Modelo conceitual do processo (Parte 2: Abastecimento de *kanbans*)

Fonte: elaborado pelo próprio autor

Na parte (1) foram considerados cinco tipos de entidades na entrada do modelo, chamadas de **Bin tipo 1**, **Bin tipo 2**, **Bin tipo 3**, **Bin tipo 4** e **O**, as quais são submetidas ao processo de **Recebimento e Inspeção de recebimento**. Neste processo ocorre uma espécie de triagem que é realizada durante um tempo, denominado de **TC Recebimento** por um operador, aqui chamado de **Op. Recebimento**. O mesmo operador transporta tais materiais para três tipos de estoques, denominados de **Demais estoques**, **Estoque 1- peças *kanban*** e **Estoque 2- peças *kanban***. As entidades **Bin tipo 1**, **Bin tipo 2**, **Bin tipo 3** e **Bin tipo 4** são os materiais que serão utilizados para o abastecimento dos postos *kanbans* e, por essa razão, são alocadas no **Estoque 1- peças *kanban*** e/ou no **Estoque 2- peças *kanban***. A entidade **O** se refere a outros tipos de materiais que não compõem o escopo deste trabalho, sendo esta encaminhada para o destino **Demais estoques**.

Uma vez que os materiais de abastecimento estão armazenados nos locais **Estoque *Kanban* 1** e **Estoque *kanban* 2**, estes permanecem alocados até que haja solicitação de reposição nos postos *kanbans*, indicada no modelo pela regra **Sinal de *Kanban***. A partir da solicitação, tais materiais são, então, submetidos ao processo chamado de **Bancada de *Picking***, onde estes são identificados, embalados e preparados para o abastecimento. Este processo é executado por um operador, chamado de **Op. *Kanban***, durante um tempo **TC *Picking***. A seguir, os materiais, já embalados, são então transportados pelo mesmo operador até um local chamado **Bancada *Entrega***, onde tais materiais, já prontos para serem repostos, aguardam a rota de abastecimento. Nesta bancada o mesmo operador **Op. *Kanban*** separa os materiais de acordo com os postos *kanbans* aos quais eles se destinam. Durante esta separação, o conjunto de entidades **Bin tipo 1**, já embalado, se transforma na entidade **Conj. Tipo 1**, que será transportada até o posto

*kanban* 1, sendo abastecido por um tempo **TC Pagamento**. O mesmo procedimento é válido para as entidades **Bin tipo 2**, **Bin tipo 3** e **Bin tipo 4**, de forma que estas serão transformadas em **Conj. Tipo 2**, **Conj. Tipo 3** e **Conj. Tipo 4**, respectivamente, e serão transportadas aos seus respectivos postos *kanbans*, conforme o modelo conceitual apresentado. Por fim, vale ressaltar que os operadores se deslocam por meio do modelo em uma velocidade **V. Deslocamento**.

#### **4.1.3. Validação do modelo conceitual**

De acordo com Sargent (2013), a validação do modelo conceitual objetiva assegurar que as teorias e inferências acerca do modelo estão corretas e, ainda, que o mesmo apresenta, de acordo com o objetivo proposto, uma estrutura lógica e razoável do objeto a ser modelado. Ao comparar o modelo conceitual com o sistema do mundo real, testa-se, dentre outros fatores, o nível de detalhamento e o escopo abordado pelo modelo (CHWIF e MEDINA, 2015). Neste contexto, Sargent (2013) cita três técnicas de validação do modelo conceitual:

- **Face-a-face:** consiste em apresentar o modelo para especialistas do processo, de forma que estes avaliem a eficácia e representatividade do modelo frente ao processo real.
- **Passos estruturados:** onde apresenta-se formalmente o modelo para um grupo de pares, e estes irão avaliar o modelo detalhadamente e aferir acerca de sua validade frente ao processo real.
- **Acompanhamento:** tal técnica baseia-se no acompanhamento das entidades através do modelo conceitual, de forma a se avaliar sua validade quanto à sua lógica e acuracidade.

O modelo conceitual proposto neste trabalho foi submetido a duas das três técnicas de validação apresentadas anteriormente. Foi utilizada, primeiramente, a validação através da técnica de **Passos estruturados**, onde o modelo foi apresentado a dois pesquisadores, os quais dominam o processo de modelagem. Após algumas avaliações e modificações propostas pelos avaliadores, o modelo foi validado e chegou-se à versão final apresentada na seção 4.1.2. A versão final foi então submetida à técnica de **Face-a-face**, onde um especialista do processo, neste caso o gestor da operação, avaliou o modelo conceitual, baseando-se no conhecimento acerca do sistema real. O modelo foi validado pelo especialista, permitindo que o trabalho prosseguisse para as próximas fases. Vale ressaltar que a técnica de Acompanhamento não foi necessária, já que esta foi abordada indiretamente durante a validação por meio das demais técnicas utilizadas.

#### 4.1.4. Documentação do modelo conceitual

Conforme ressaltam Leal, Almeida e Montevechi (2008), a técnica IDEF-SIM, utilizada no mapeamento conceitual, contribui inclusive para a documentação do modelo, facilitando o seu entendimento. Neste contexto, a fase de documentação do modelo conceitual foi realizada após obtenção da versão final do modelo, permitindo o registro da lógica do modelo e facilitando as fases de construção, validação e verificação do modelo computacional.

#### 4.1.5. Modelagem dos dados de entrada

De acordo com Chwif e Medina (2015), ao simular sistemas reais, deve-se considerar que a maioria deles são regidos por fenômenos aleatórios, de modo que não se pode saber qual o comportamento exato destes sistemas no decorrer do tempo. Porém, ainda segundo os autores, é possível prever o comportamento probabilístico destes sistemas baseando-se no seu histórico ao longo do tempo. Daí a importância da modelagem dos dados visando a correta representação do sistema real por parte do modelo de simulação.

Porém, antes de partir para a modelagem dos dados, deve-se primeiramente definir quais os dados de entrada do modelo. Observa-se a existência de quatro parâmetros de entrada a serem abastecidos no modelo. São eles os tempos **TC Recebimento**, **TC Picking** e **TC Pagamento**, bem como a velocidade **V. Deslocamento** com que os operadores se movimentam na operação. Visto tais parâmetros e levando em conta o fato de que o foco deste trabalho não é atuar diretamente na modelagem dos dados, têm-se algumas considerações realizadas neste trabalho para facilitar seu desenvolvimento:

- I. Uma vez que a parte **(1) Recebimento e estocagem**, apresentada no modelo conceitual, existe apenas para compor a lógica e ilustrar o modelo e não faz parte nem influencia nos experimentos a serem realizados, o tempo **TC Recebimento** foi considerado como sendo o tempo determinístico já adotado pela gestão da operação para o planejamento da rotina de trabalho. Sendo assim, **TC Recebimento** será igual a 874 segundos.
- II. O tempo **TC pagamento** constitui o tempo que o operador gasta para alocar os conjuntos de materiais nos postos *kanbans*, após chegar nestes locais. Uma vez que neste procedimento não há diferenciação dos materiais, já que os estes se encontram embalados e identificados e, ainda, como este tempo é significativamente pequeno se comparado ao tempo total do processo, optou-se também pela utilização do tempo determinístico adotado pela gestão da operação. Dessa forma, **TC pagamento** será igual a 30 segundos.

III. Os demais parâmetros, **V. deslocamento** e **TC Picking**, são considerados pontos chave para o processo em análise, uma vez que estes influenciam, direta ou indiretamente, em quase todo o tempo gasto pelo processo de abastecimento de materiais. Por essa razão, estes conjuntos de dados serão o foco da modelagem nesta seção.

Após as considerações acima, pôde-se dar início ao processo de modelagem de dados. Tal processo pode ser dividido em três etapas: **Coleta de dados**, **Tratamento de dados** e **Inferência** (CHWIF e MEDINA, 2015). Dessa forma, primeiramente os dados são coletados através de um processo de amostragem, em seguida recebem uma análise através da estatística descritiva e, por fim, tais dados são atrelados a algum modelo probabilístico.

Durante a etapa de coleta de dados, deve-se atentar para o tamanho amostral a ser coletado, uma vez que tal decisão interfere diretamente nas etapas seguintes referentes à modelagem dos dados. Para que as inferências a serem feitas sobre a amostragem de uma população sejam válidas, deve-se garantir um tamanho de amostra representativo (WALPOLE et al., 2009). Ainda neste contexto, Montgomery e Runger (2012) apresentam uma fórmula para o cálculo do tamanho da amostra dada uma distribuição Normal, conforme apresentada a Equação (4.1).

$$n = \left( \frac{Z_{\alpha/2} \cdot \sigma}{E} \right)^2 \quad (4.1)$$

Onde:  $n$  = tamanho da amostra

$Z_{\alpha/2}$  = número de desvios padrão correspondente ao grau de confiança estabelecido (com referência à normal padronizada)

$\sigma$  = desvio padrão da população

$E$  = Erro absoluto para o grau de confiança estabelecido

Porém, levando-se em conta o fato de que o desvio padrão populacional é, na maioria das vezes, desconhecido, deve-se estimar o tamanho da amostra baseando-se no desvio padrão amostral. Para casos como este, Triola (2011) ressalta a utilização da distribuição **t de Student**. Tal distribuição possui as mesmas características simétricas e unimodais da distribuição Normal, porém com as extremidades mais espessas. Na medida em que o tamanho amostral aumenta, a distribuição t de *Student* tende a se aproximar cada vez mais da distribuição Normal (MONTGOMERY e RUNGER, 2012). Neste caso, Triola (2011) apresenta uma adaptação da Equação (4.1) considerando a distribuição t, conforme apresenta a Equação (4.2).

$$n = \left( \frac{t_{\alpha/2, n-1} \cdot S}{E} \right)^2 \quad (4.2)$$

Onde:  $S$  = desvio padrão da amostra

$t_{\alpha/2, n-1}$  = número de desvios padrão correspondente ao grau de confiança estabelecido e ao número de graus de liberdade  $n - 1$  (com referência à distribuição  $t$ )

Primeiramente, foram coletadas amostras pilotos de ambos os parâmetros, **V. deslocamento** e **TC Picking**, a fim de se obter os respectivos desvios amostrais. Por meio da técnica de Cronoanálise, foram coletadas amostras de tamanho 10 e, em seguida, ambas as amostras foram avaliadas de acordo com o tamanho amostral ideal, de acordo com a Equação (4.2). As equações (4.3) e (4.4) apresentam os cálculos realizados para os parâmetros **V. deslocamento** e **TC Picking**, respectivamente. Para os cálculos, foram admitidos um erro de 5% em relação à média amostral e um intervalo de confiança de 95%.

$$n = \left( \frac{2,09 \cdot 0,14}{5\% \cdot 1,10} \right)^2 = 27,21 \cong 28 \quad (4.3)$$

$$n = \left( \frac{2,09 \cdot 18,5}{5\% \cdot 181,5} \right)^2 = 18,16 \cong 19 \quad (4.4)$$

Portanto, tendo em vista os tamanhos das amostras desejados, foi efetuada uma nova coleta de dados a fim de completar as amostras iniciais. Ao final, foram coletadas 28 velocidades de deslocamento, referentes ao parâmetro **V. deslocamento** e expressas em metros por segundo, e 20 tempos de ciclo referentes ao parâmetro **TC Picking**, estes expressos em segundos. Uma vez coletados os dados, parte-se então para o tratamento destes, de forma a trabalhá-los por meio da estatística descritiva. Através do *software* Minitab®, os dados foram analisados quanto às suas medidas de posição e dispersão, conforme apresentam as tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1- Medidas de posição dos parâmetros

Parâmetro	Média	Mínimo	Máximo
TC Picking [s]	176,12	121,67	207
V. Deslocamento [m/s]	1,10	0,67	1,96

Fonte: elaborado pelo próprio autor

Tabela 4.2- Medidas de dispersão dos parâmetros

Parâmetro	Amplitude	Desv. Padrão	Variância
TC Picking [s]	85,33	26,77	716,39
V. Deslocamento [m/s]	1,29	0,26	0,07

Fonte: elaborado pelo próprio autor



Por fim, realizou-se a etapa de Inferência, de forma a inferir sobre o comportamento estatístico dos parâmetros apresentados anteriormente. Também com o auxílio do *software* Minitab®, foram realizados testes de normalidade *Anderson-Darling* e ambos os valores P se apresentaram acima de 5%, conforme ilustra a figura 4.4.

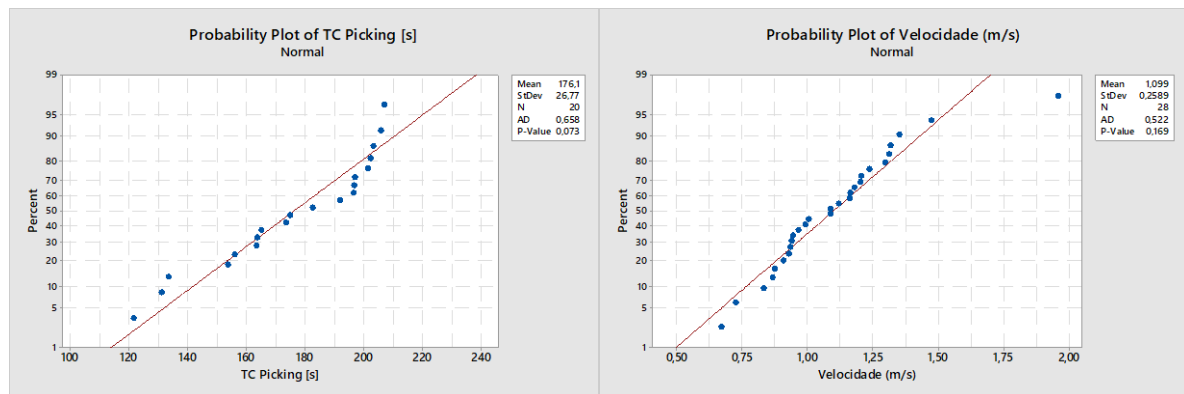


Figura 4.4- Teste de normalidade *Anderson-Darling* para os parâmetros de entrada

Fonte: elaborado pelo próprio autor

Com um nível de confiança de 95% e, de acordo com Montgomery e Runger (2012), não se pode afirmar que as distribuições não seguem uma distribuição Normal. Logo, as distribuições de ambos os parâmetros, **V. Deslocamento** e **TC Picking**, foram associadas a uma distribuição Normal, conforme ilustra a tabela 4.3.

Tabela 4.3- Inferência estatística para os parâmetros

Parâmetro	Distribuição associada	Valor P
TC Picking [s]	N(176,1 ; 26,77)	0,07
V. Deslocamento [m/s]	N(1,10 ; 0,26)	0,17

Fonte: elaborado pelo próprio autor

Com a modelagem dos dados já concluída, pode-se considerar a fase de **Modelagem conceitual** finalizada. Dessa forma, de acordo com o método adaptado de Montevechi et al. (2010), apresentado na seção 3.3, deve-se partir para a fase de **Modelagem computacional**.

## 4.2. Modelagem computacional

A fase de modelagem computacional será composta pelas etapas de **Construção do modelo computacional**, **Verificação do modelo computacional**, **Definição dos dados de atualização do modelo e das respostas desejadas**, **Estruturação da interface com o processo real** e, por fim, a **Validação do modelo computacional**. Vale lembrar que nesta fase foram propostas algumas alterações do método proposto por Montevechi et al. (2010). As etapas de **Definição**

**dos dados de atualização do modelo e das respostas desejadas e Estruturação da interface com o processo real** foram inseridas no método visando facilitar a implementação da simulação como ferramenta de auxílio a tomada de decisão, incorporando os princípios da Indústria 4.0 e o conceito de Gêmeo Digital.

#### **4.2.1. Construção do modelo computacional**

Tendo em vista o modelo conceitual construído anteriormente, o próximo passo foi basear-se no mesmo para a construção do modelo computacional. De acordo com Chwif e Medina (2015), nesta etapa pode-se utilizar de três técnicas de representação computacional: linguagem de programação, linguagem de simulação e/ou *software* de simulação. Neste caso, optou-se pela utilização de um *software* de simulação, devido à modelagem mais interativa, bem como maior detalhamento gráfico do modelo. Neste último aspecto, a qualidade gráfica do modelo computacional, foi crucial para a escolha do *software*. Rodič (2017) ressalta, dentre outros fatores, a alta resolução gráfica do modelo computacional, o alto nível de detalhamento e o baixo nível de abstração como pontos essenciais para a adequação da simulação no cenário da Indústria 4.0 e no conceito de Gêmeo Digital. Visto a necessidade de se construir modelos que exploram cada vez mais os recursos gráficos e visuais, optou-se pela utilização do *software* FlexSim®. A escolha deste *software* se deu também devido à sua facilidade de programação, esta que é orientada a objetos e requer pouca ou nenhuma utilização de códigos de programação, bem como à possibilidade de construção de modelos 3D e extensão para Realidade Virtual. De início, foi importada para o *software* a representação da planta baixa do processo produtivo, em escala, de forma a representar fielmente o objeto a ser modelado. A seguir, foi criada uma biblioteca gráfica específica para este modelo, já que a biblioteca padrão do FlexSim® não traria o nível de detalhe desejado. Por se tratar de um processo em uma indústria aeronáutica, optou-se por importar algumas criações em 3D, representando aeronaves e equipamentos, já construídas e disponíveis na plataforma *3DWarehouse*®. A figura 4.5 ilustra o modelo construído, em 2D e 3D, bem como seus componentes principais.

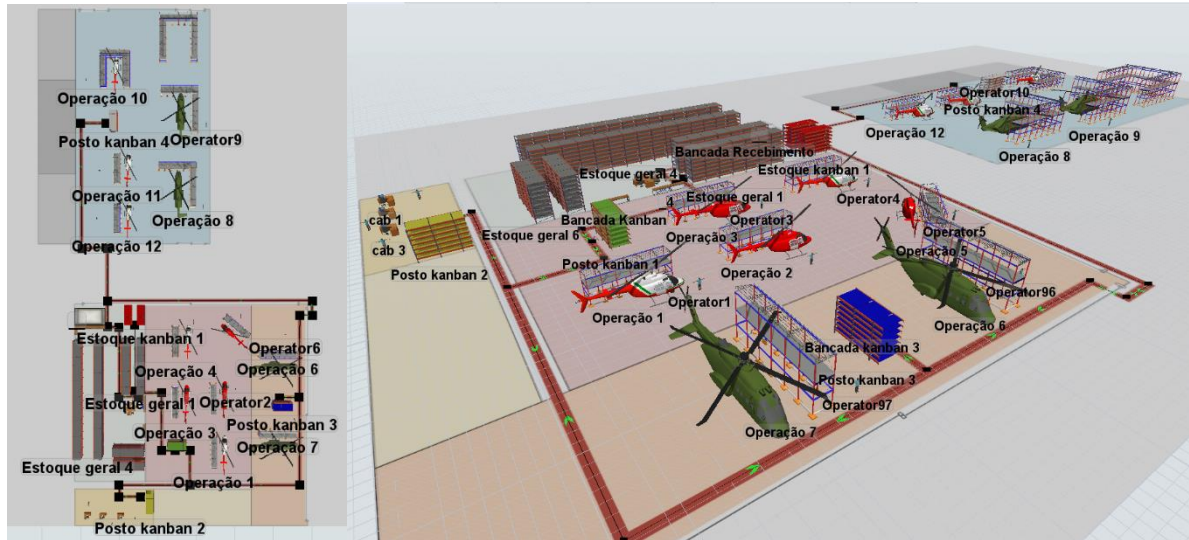


Figura 4.5- Vistas 2D e 3D do modelo computacional

Fonte: elaborado pelo próprio autor

Uma vez criada a estrutura gráfica do modelo, o próximo passo foi criar a lógica de programação do modelo computacional. Existem diferentes maneiras de se realizar a programação do *software* e, neste trabalho, foram utilizados dois métodos complementares: a **programação orientada por objetos** e o *ProcessFlow*. O método de programação orientada por objetos foi utilizado para construir as ligações e lógicas principais do modelo. Neste caso, ao selecionar um objeto no modelo, é possível criar lógicas pré-programadas, realizar conexões com outros objetos, definir tempos e regras, dentre outras funcionalidades. Já a utilização do *ProcessFlow* se deu devido à grande facilidade lógica que o método permite. Esta interface atua com uma estrutura semelhante ao conhecido fluxograma e permite sequenciar atividades, definir regras lógicas e integrar objetos, isso tudo sem a necessidade de haver ligação física entre eles, dentre outras funcionalidades. A figura 4.6 ilustra as interfaces de programação orientada a objeto (à direita) e programação via *ProcessFlow* (à esquerda).

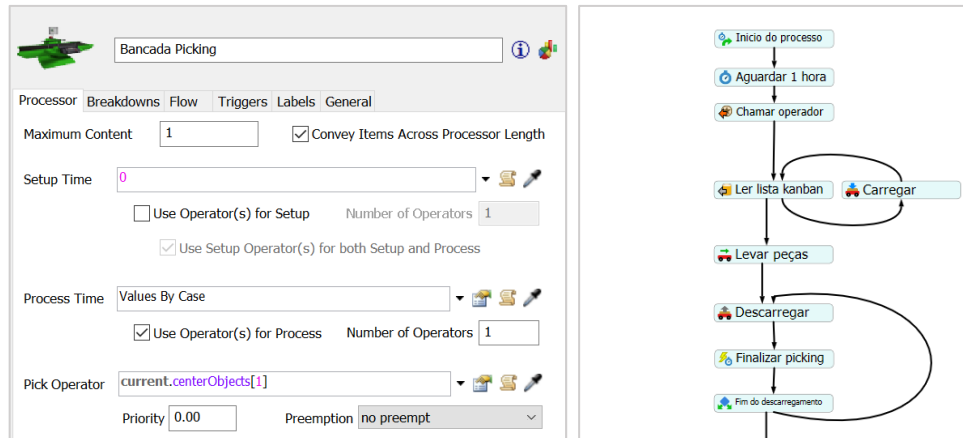


Figura 4.6- Interfaces de programação orientada a objeto e via *ProcessFlow*

Fonte: elaborado pelo próprio autor

Conforme apresentado no modelo conceitual, na seção 4.1.2, o modelo computacional engloba a parte **(1) Recebimento e estocagem** apenas para compor a lógica geral do modelo. Sendo assim, há um local de recebimento, com uma taxa de recebimento aleatória, apenas para ilustrar a armazenagem dos materiais. A partir deste ponto é que a lógica do modelo interfere no processo, ou seja, a parte **(2) Abastecimento de *kanbans*** é que realmente impacta no processo a ser estudado. Ainda, de forma a compor a lógica do modelo, foram criadas lógicas de produção em cada uma das quatro linhas de produção da planta. Esta lógica será abastecida, nas próximas etapas do trabalho, com informações do processo real. Dessa forma, espera-se que o modelo de simulação seja um reflexo do processo real, alterando sua demanda de acordo com as variações reais das linhas produtivas.

Seguindo a lógica de construção do modelo computacional, na primeira hora simulada, as linhas de produção irão utilizar os materiais dos seus respectivos postos *kanbans*, os quais serão disponibilizados nestes locais no início da execução do modelo computacional. Este consumo será então processado no modelo e será simulada a coleta destes materiais no estoque geral e o posterior reabastecimento dos postos *kanbans*. Para compor toda esta estrutura, além dos dois operadores principais, que são **Op. Recebimento** e **Op. *Kanban***, o modelo computacional contou com cerca de quinze operadores, que trabalham nos quinze postos de produção que compõem as quatro linhas produtivas. Embora o modelo tenha sido construído em escala, todas as distâncias reais foram adicionadas ao modelo de forma a representar a correta distância a ser percorrida durante o abastecimento de materiais. Por fim, o modelo computacional, após a construção gráfica e implementação das lógicas, pôde ser verificado quanto ao seu correto funcionamento frente à lógica apresentada no modelo conceitual.

A escolha do *software* FlexSim® se mostrou válida à proposta do presente estudo e se adequou bem ao modelo proposto. Contudo, as velocidades de deslocamento dos operadores não puderam ser programadas através de dados estocásticos, considerando-se as opções pré-programadas e disponibilizadas pelo *software*. Dessa forma, neste primeiro momento as velocidades de deslocamento foram então consideradas determinísticas e, caso tal fato impactasse na validação do modelo, seria então definida uma alternativa para sanar tal dificuldade.

#### 4.2.2. Verificação do modelo computacional

Para Chwif e Medina (2015), a etapa de verificação do modelo pode ser entendida como uma análise do modelo computacional de acordo com a lógica imposta pelo modelo conceitual. Com a verificação, pretende-se avaliar se o modelo computacional está sendo construído corretamente e, neste contexto, os autores apresentam seis técnicas de verificação: **Implementação modular, Valores constantes vs. Cálculos manuais, Utilização de depurador, Simulação manual, Animação gráfica e Revisão em grupo**. Neste contexto, Sargent (2013) indica que, nos casos onde o modelo computacional foi construído a partir de um *software* de simulação, como é o caso deste trabalho, a verificação deve focar na análise das funções do modelo, como a lógica de simulação, tempos e fluxos das atividades, dentre outras.

Tendo em vista as técnicas e ponderações apresentadas acima, a verificação do modelo computacional foi realizada por meio de duas técnicas de verificação:

- **Implementação modular:** de acordo com Chwif e Medina (2015), tal técnica se baseia na construção e teste do modelo em partes, fazendo com que o processo de verificação seja realizado no decorrer da modelagem computacional. Dessa forma, durante a programação do modelo computacional, o *software* utilizado permitiu que fossem realizadas simulações parciais de determinadas partes do modelo. Tal processo foi de fundamental importância devido à facilidade de se encontrar erros na lógica e nas funções durante a modelagem computacional. Durante todo o processo de construção do modelo foram encontradas algumas falhas na lógica e nas ligações dos objetos, bem como em algumas regras estabelecidas inicialmente. Os erros foram corrigidos durante o próprio processo de modelagem.
- **Animação gráfica:** para Chwif e Medina (2015), esta técnica consiste em identificar e corrigir erros através do acompanhamento visual do modelo durante a simulação. Tal

técnica de verificação foi possível devido ao grande poder gráfico oferecido pelo *software*. Por meio do acompanhamento da simulação, através da vista 3D, foram simulados alguns cenários fictícios de forma a se testar toda a lógica do modelo. Desde o momento em que os materiais chegam na área de recebimento até a realização da rota de abastecimento dos materiais nos postos *kanbans*, todas as atividades do processo foram acompanhadas e testadas. Como a verificação em etapas já havia sido feita no decorrer da construção do modelo computacional, apenas alguns detalhes gráficos foram corrigidos, finalizando assim a fase de verificação do modelo.

#### **4.2.3. Definição dos dados de atualização do modelo e das respostas desejadas**

Esta etapa foi criada com o objetivo de se integrar o modelo de simulação com o sistema real. Espera-se que o modelo seja alterado no decorrer do tempo, visto as alterações ocorridas no processo real, permitindo que a simulação seja utilizada como ferramenta diária de auxílio à tomada de decisão. Porém, antes de estabelecer a comunicação entre ambas as partes, deve-se definir basicamente duas questões principais: **quais informações o modelo computacional precisa para se adaptar ao mundo real e quais informações o processo real precisa, após executada a simulação.**

Tornar o modelo de simulação um reflexo do sistema real está relacionado com o conceito de **Sistema Ciber-físico**, um dos pilares da Indústria 4.0. De acordo com Xu, Xu e Li (2018), tal sistema possui conexão com o mundo real e altera seu comportamento frente às variações do processo real, através do acesso e processamento de dados reais de maneira automática. Ainda neste contexto, para Zhong et al. (2017), tal Sistema Ciber-físico é composto pelo **Gêmeo Digital** do sistema real. Os autores ainda ressaltam que sistemas conectados possibilitam a comunicação por meio de entradas e saídas de dados, as quais permitem interação entre o ambiente físico e uma resposta do Gêmeo Digital por meio de algoritmos e processamento computacional.

Como a demanda por materiais em cada posto *kanban* é o fator chave para mudanças no processo real, tal parâmetro foi escolhido como sendo a informação necessária para haver a atualização do modelo de simulação. Dessa forma, o modelo de simulação foi programado de forma a receber periodicamente uma relação de todos os materiais consumidos nos diferentes postos *kanbans* e, frente à esta entrada, o modelo irá se adaptar para refletir o processo real.

Já quanto à resposta necessária para o processo real, definiu-se como sendo a rota de abastecimento mais eficiente. Neste caso, leva-se em conta a distância percorrida pelo operador

responsável pelo abastecimento, bem como a quantidade de materiais abastecidos no período. A equação 4.5 ilustra tal relação.

$$\text{Rota mais eficiente} = f(\text{distância percorrida, volume abastecido no período}) \quad (4.5)$$

Tal escolha se justifica pois, para a medição de desempenho da operação, os gestores consideram o volume abastecido no período como sendo o indicador chave. Além disso, no que se refere à distância percorrida durante este abastecimento, tendo em vista os Conceitos Enxutos, deve-se reduzir tanto quanto possível o deslocamento de pessoas e a movimentação de materiais que são desnecessários ou excessivos. Por fim, vale ressaltar que a obtenção de rotas mais eficientes favorece uma melhor utilização do tempo, permitindo, inclusive, a adição de tarefas agregadoras de valor. Portanto, a resposta desejada do modelo de simulação é a melhor rota, considerando a taxa de reposição de materiais e a distância percorrida.

Para permitir a lógica de entrada de dados no modelo, utilizou-se de um recurso do *software* chamado **Listas**. Os materiais consumidos pelas linhas produtivas são informados ao banco de dados da operação por meio de coletores de dados e uma rede *wireless*, por meio da leitura de seus respectivos códigos de barra. O banco de dados na operação é representado pelo Sistema Integrado de Gestão ou, em inglês, *Enterprise Resource Planning* (ERP). Com a informação obtida no ERP, pode-se preencher esta lista no modelo e, a partir deste momento, o *software* modifica a demanda do modelo, fazendo com que este seja uma cópia do sistema real no instante da atualização. Já para a programação do modelo quanto às suas respostas, têm-se uma rota de abastecimento padrão, atribuída inicialmente, e a simulação irá utilizar algumas ferramentas do *software*, incluindo pacotes de otimização, para obter a melhor rota para a demanda específica. Uma vez encontrada a rota ideal, o *software* exporta tais dados em um arquivo com extensão “.CSV”, favorecendo a posterior utilização desta informação para tomada de decisão.

O quadro 4.1 apresenta resumidamente as entradas e saídas do modelo:

Quadro 4.1- Integração entre o processo real e o modelo de simulação

<b>Dados de atualização do modelo</b>	<b>Resposta desejada</b>
Consumo de materiais em cada posto <i>kanban</i>	Rota de abastecimento mais eficiente

Fonte: elaborado pelo próprio autor

Uma vez definida a lógica de atualização do modelo e sua resposta desejada, pode-se partir para a estruturação da interface a qual possibilitará tal integração de forma automática ou semiautomática, sem a necessidade de se abastecer o modelo, executar a simulação e exportar os resultados de forma manual.

#### 4.2.4. Estruturação da interface com o processo real

A interface que estabelece a conexão entre o processo real e o Gêmeo Digital, aqui representado pelo modelo de simulação, foi estruturada após definidas as entradas e saídas necessárias para possibilitar a integração entre o sistema real e o modelo de simulação. Tal interface pode ser construída e implementada de diferentes maneiras, dependendo das características do *software* de simulação e da capacidade de conexão dos sistemas reais. Skoogh, Perera e Johansson (2012) ressaltam que os *softwares* de simulação têm desenvolvido cada vez mais ferramentas de comunicação com fontes externas, reduzindo a necessidade de se utilizar sistemas intermediários. Porém, nota-se que tais conexões diretas ainda são difíceis, principalmente devido à necessidade de se trabalhar os dados antes de inseri-los no modelo de simulação. Tal fato contribui para que sistemas e interfaces intermediárias sejam utilizados mais amplamente (BARLAS e HEAVEY, 2016). Skoogh, Perera e Johansson (2012) revela ainda que a maioria dos pesquisadores e profissionais que trabalham com o conceito da simulação integrada ao sistema real tendem a preferir a utilização de interfaces intermediárias, devido à grande variedade de fontes de dados e a necessidade de se filtrá-los e analisá-los previamente através destas interfaces.

Para a criação da interface de integração, optou-se pela utilização de um *Dashboard* de controle e gestão, a qual foi construída a partir do *software Microsoft Excel*®. Além disso, utilizou-se da programação em uma linguagem já presente no *software*, a *Visual Basic for Applications* (VBA), para automatizar os comandos da interface. Tais escolhas se justificam devido à versatilidade do *software*, o qual compõe um pacote de *softwares* amplamente utilizado e que possui fácil conectividade com o ERP utilizado pela empresa e com o *software* de simulação Flexsim®. Além disso, o *software Microsoft Excel*® é comumente utilizado como ferramenta de apoio ao processo decisório tanto para níveis operacionais quanto táticos. Ainda neste contexto, outros trabalhos ilustram a utilização de sistemas intermediários para permitir a integração entre o modelo de simulação e o mundo real (RODIČ e KANDUČ, 2015; BARLAS e HEAVEY, 2016; RODIČ, 2017; KUNATH e WINKLER, 2018). O *Dashboard* funciona, inicialmente, como um banco de dados, importando as demandas de materiais de relatórios oriundos do sistema ERP da operação. Em seguida, permite a atualização e simulação do modelo virtual, já com os dados reais da operação, de maneira automática e eliminando a necessidade de uma pessoa que tenha domínio do *software* de simulação. Por último, o *Dashboard* permite a obtenção dos resultados oriundos da simulação, possibilitando a posterior tomada de decisão. Todo este processo é realizado de forma semiautomática, necessitando



apenas selecionar o botão correspondente à opção desejada na própria *Dashboard*. A figura 4.7 ilustra o *Dashboard* criado, bem como seus elementos principais.

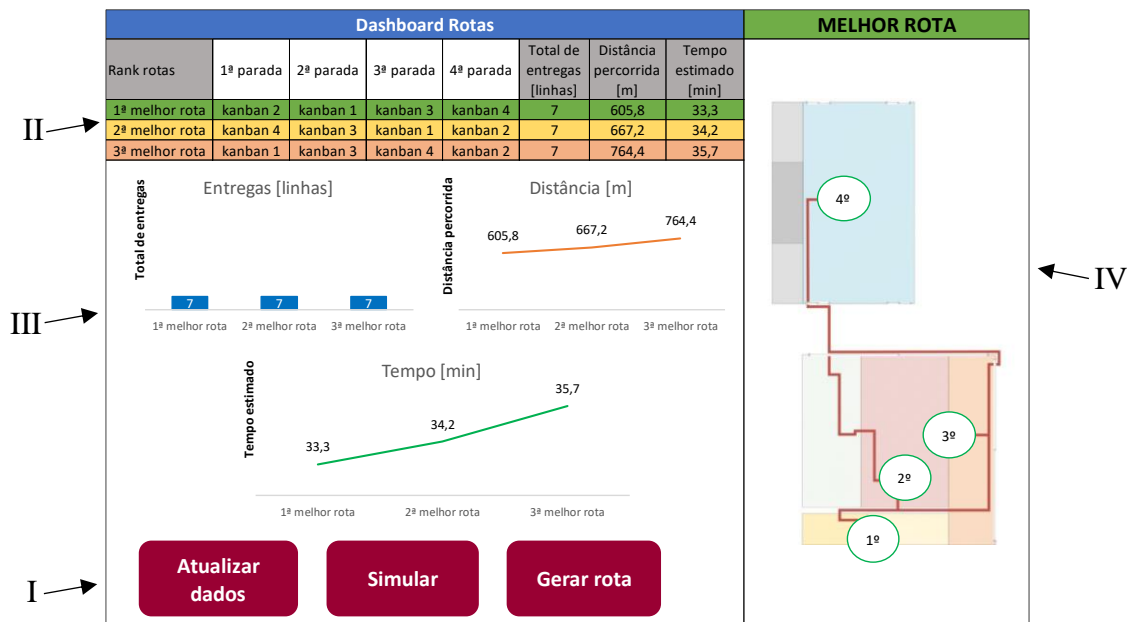


Figura 4.7- *Dashboard* de interface entre o processo real e o modelo de simulação

Fonte: elaborado pelo próprio autor

Os elementos I, II, III e IV indicados no *Dashboard* da Figura 4.7 possuem papel fundamental no funcionamento do sistema, conforme a descrição a seguir.

- I. **Botões de controle do *Dashboard*:** por meio destes botões, o usuário pode interagir com o sistema e executar as tarefas de importação e atualização dos dados, de execução do modelo de simulação, de otimização das rotas e de exportação dos resultados da simulação e da otimização;
- II. **Painel de rotas:** após a exportação dos resultados da simulação e da otimização, o *Dashboard* irá coletar os mesmos e apresentar as três melhores rotas encontradas. Dessa forma, o usuário consegue visualizar as opções de rotas e suas previsões quanto a tempo e distância a ser percorrida;
- III. **Gráficos de comparação:** o *Dashboard* ainda irá apresentar, baseando-se no painel de rotas, os gráficos de comparação entre as três melhores rotas. É possível comparar visualmente o tempo previsto, a distância prevista e também o total de entregas de cada uma das opções de rota;
- IV. **Mapa de rota:** tendo em vista de que tal ferramenta serve para auxílio à tomada de decisão, pode-se esperar que a mesma seja utilizada como painel visual na própria operação. Dessa forma, o mapa de rota indica qual a ordem de abastecimento dos postos

*kanbans* de maneira interativa e de fácil interpretação para o colaborador responsável pelo abastecimento.

Vale ressaltar que, de forma a torna-los não editáveis, os campos principais do *Dashboard* podem ser travados com senha, garantindo assim maior segurança quanto ao correto funcionamento do sistema. Ainda, caso o usuário não queira interagir nem mesmo com o *Dashboard*, há também a opção de automatizar os comandos, fazendo com que as tarefas de obtenção dos dados do ERP, atualização, simulação, otimização e exportação dos resultados sejam realizadas automaticamente em intervalos de tempo pré-determinados. Por fim, vale ressaltar que o *Dashboard* e o modelo de simulação não precisam necessariamente estar no mesmo espaço físico que a operação, uma vez que a obtenção dos dados dos relatórios do ERP pode ser realizada através da tecnologia de nuvem. Xu, Xu e Li (2018) elencam tal tecnologia como sendo um dos três pilares da Indústria 4.0, tornando a obtenção e exportação de dados mais ágil, barata e com maior escalabilidade. Neste caso, o *Dashboard* pode capturar os relatórios da operação por meio de discos virtuais gerados a partir da nuvem, sem a necessidade de se executar o modelo no mesmo espaço físico que a operação. A figura 4.8 ilustra o fluxo de dados e informações desde o processo real, passando pelo modelo de simulação e retornando à operação através de tomada de decisão.

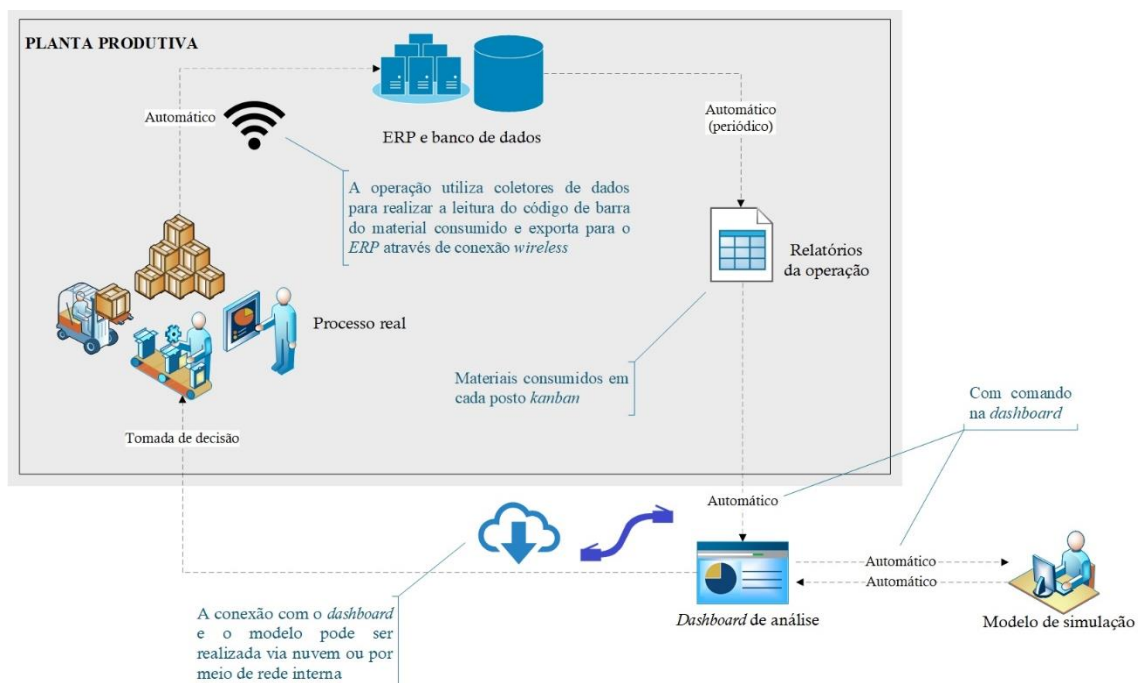


Figura 4.8- Fluxo de dados e informações entre o sistema real e o modelo de simulação

Fonte: elaborado pelo próprio autor

Neste caso, os dados relacionados aos materiais consumidos em cada posto *kanban* são coletados por meio de coletores de dados e, por meio da rede *wireless*, são exportados para o ERP da operação. Dessa forma, por meio do *Dashboard*, torna-se possível a obtenção destes dados, agora em forma de informação, dispostos em relatórios da operação. O *Dashboard* irá então trabalhar, preparar e inserir estas informações no modelo de simulação de maneira automática, carecendo apenas de um comando por parte de quem opera o *Dashboard*. Por fim, o modelo de simulação é executado e exporta seus resultados, estes que serão importados pelo *Dashboard* de forma a fornecer, de maneira visual e interativa, as melhores opções quanto à tomada de decisão. Uma vez criada a interface de comunicação entre o sistema real e o modelo de simulação, pode-se partir para a última etapa da fase de Modelagem Computacional, a chamada Validação do modelo computacional.

#### 4.2.5. Validação do modelo computacional

No que se refere às características do objeto deste estudo quanto à validação, vale ressaltar que o processo de abastecimento de materiais é realizado de forma periódica. Dessa forma, o operador responsável inicia o processo coletando os materiais no estoque e segue para o abastecimento das linhas produtivas. Após finalizar o abastecimento, o operador retorna ao estoque e inicia novamente o processo de coleta de materiais, fechando a primeira rodada de abastecimento. Este ciclo é reiniciado durante todo o período de trabalho. Para validar o modelo, foi escolhido como parâmetro de validação o tempo de abastecimento unitário ( $T_u$ ). Para obtenção do  $T_u$ , dividiu-se o tempo total de cada rodada de abastecimento pelo total de materiais abastecidos na rodada, conforme apresenta a equação 4.6.

$$T_{u_{rodada}} = \frac{\text{Tempo total da rodada}}{\text{Quantidade de materiais abastecidos na rodada}} \quad (4.6)$$

Para Sargent, Goldsman e Yaacoub (2016), a validação do modelo computacional consiste em comprovar que o modelo, dentro de seu escopo de aplicação, apresenta resultados com precisão satisfatória. Nesta etapa, também chamada de Validação Operacional, Chwif e Medina (2015) relatam que os procedimentos para validação podem ser classificados em três níveis principais:

- **Qualitativo:** é o nível mais simples e, neste caso, deve-se comparar o modelo de simulação com o sistema real quanto aos seus comportamentos principais, sem se ater aos números e indicadores de ambos;

- **Quantitativo informal:** compara-se os resultados do modelo de simulação com dados do sistema real, estes provenientes de pequenas amostras ou de observações desse sistema. Neste caso, compara-se ambos os parâmetros por sua ordem de grandeza;
- **Quantitativo formal:** utiliza-se de técnicas estatísticas com intuito de comparar o sistema real e o modelo de simulação. Tal comparação se baseia em um certo nível de confiança, permitindo validar o modelo computacional.

Além disso, Sargent e Goldsman (2016) classificam a validação operacional quanto à sua abordagem, tendo em vista as possibilidades de observação do sistema real. Para os autores, sistemas observáveis são aqueles onde é possível coletar dados acerca de seus comportamentos. Tal classificação é apresentada no quadro 4.2.

Quadro 4.2- Classificação da validação operacional quanto à observação do sistema

<b>Abordagem de decisão</b>	<b>Sistema observável</b>	<b>Sistema não observável</b>
Subjetiva	* Comparação por meio de gráficos * Comparação por meio do comportamento	* Comparação por meio do comportamento de outros modelos
Objetiva	* Comparação por meio de ferramentas estatísticas	Comparação com outros modelos por meio de ferramentas estatísticas

Fonte: adaptado de Sargent e Goldsman (2016)

O nível de validação escolhido para este trabalho é o **Quantitativo Formal**, onde ferramentas estatísticas irão auxiliar na determinação da validade operacional. Além disso, considerando que o sistema real é classificado como observável, onde é possível a coleta de dados, a abordagem utilizada é a **Abordagem Objetiva**. Neste contexto, primeiramente será definido o teste de hipótese adequado para esta análise, em seguida será definido o número de réplicas do modelo e, por fim, serão coletados dados do sistema real e executados os respectivos experimentos no modelo de simulação. Os dados reais serão comparados estatisticamente com os resultados da simulação, através do teste de hipóteses escolhido, a fim de se validar o modelo computacional.

### **I. Definição do teste de hipóteses adequado**

Tendo em vista que o modelo de simulação possui caráter estocástico, espera-se que haja variações em seus resultados. Tais variações poderão ser compreendidas por meio da execução

de  $n$  réplicas no modelo, fornecendo assim um intervalo de resultados com certo nível de confiança. A fim de se comparar os dados reais da operação com os resultados de um certo número de réplicas do modelo, optou-se pela escolha do teste de variâncias, conhecido como ANOVA. Montgomery e Runger (2012) ressaltam que, apesar de se referenciar a variância, o ANOVA pode ser utilizado para comparar médias quando houver mais de dois níveis de um único fator a ser comparado. Neste caso, o fator a ser comparado será o tempo unitário de abastecimento ( $T_u$ ), conforme apresentado anteriormente, e os níveis a serem testados serão os dados reais e as respectivas réplicas do modelo de simulação. As hipóteses de teste para o ANOVA são, de acordo com Montgomery e Runger (2012).

- $H_0$ : Todas as médias são estatisticamente iguais
- $H_1$ : Pelo menos uma das médias difere das demais

Portanto, para o teste de hipóteses a ser realizado, será coletada uma amostra de tempos unitários de abastecimento ( $T_u$ ), formando um primeiro nível com uma média e desvio padrão amostral. Posteriormente, serão reproduzidas as rodadas reais no modelo de simulação por meio de um certo número de réplicas, compondo os demais níveis com médias e desvios amostrais. Por fim, utilizando o teste ANOVA, por meio do *software* Minitab®, será testado se os níveis são estatisticamente iguais, fato este que valida o modelo.

## II. Definição do número de réplicas do modelo

Segundo Chwif e Medina (2015), neste momento deve-se definir quantas replicações são necessárias no modelo de simulação, levando-se em conta uma determinada precisão desejada. Neste contexto, uma das técnicas utilizadas para se definir o número de réplicas ideal é por meio de uma amostra piloto. Deve-se replicar o modelo de simulação  $n$  vezes e construir um intervalo de confiança do parâmetro desejado. Após construído tal intervalo, deve-se avaliar a precisão oferecida pela amostra, por meio da equação 4.7 e, caso a precisão encontrada seja maior que a precisão desejada, deve-se calcular o tamanho da amostra ideal, de acordo com a equação 4.8 (CHWIF E MEDINA, 2015).

$$h = t_{\alpha/2, n-1} \left( \frac{s}{\sqrt{n}} \right) \quad (4.7)$$

Onde:  $h$  = precisão obtida na amostra piloto

$t_{\alpha/2, n-1}$  = número de desvios padrão correspondente ao grau de confiança estabelecido e ao número de graus de liberdade  $n - 1$  (com referência à distribuição  $t$ )

$S$  = desvio padrão da amostra

$n$  = tamanho da amostra piloto

$$n^* = n \left( \frac{h}{h^*} \right)^2 \quad (4.8)$$

Onde:  $n^*$  = tamanho da amostra para a precisão pretendida

$n$  = tamanho da amostra piloto

$h$  = precisão obtida na amostra piloto

$h^*$  = precisão pretendida

Portanto, inicialmente executou-se a simulação com 10 réplicas a fim de se obter a precisão da amostra e compará-la com a precisão desejada. Para tal, escolheu-se o parâmetro Tempo de abastecimento ( $T_a$ ) como resposta do modelo, de modo a permitir a medição da precisão. O nível de confiança escolhido foi de 95%. Além disso, a precisão desejada foi definida como sendo igual a 1 minuto, o que significa que o número de réplicas deve ser suficiente para apresentar um intervalo de confiança em torno da média de até 1 minuto. A tabela 4.4 ilustra os dados provenientes da amostra piloto, a média e desvio padrão amostral, bem como a precisão fornecida pela amostra, obtida através da equação 4.7.

Tabela 4.4- Parâmetros da amostra piloto para definição do número de réplicas

<b>Parâmetros referentes à amostra piloto</b>	<b>Valores</b>
	79,57
	79,50
	75,78
	78,08
Tempo de abastecimento ( $T_a$ )	74,83
	77,29
	78,83
	74,37
	76,53
	77,04
	Média
Desvio Padrão ( $S$ )	1,84
$t_{\alpha/2, n-1}$	2,26
Precisão da amostra ( $h$ )	1,31
Precisão desejada ( $h^*$ )	1,00

Fonte: elaborado pelo próprio autor

Como a precisão encontrada supera a precisão desejada, por meio da equação 4.8, foi possível calcular o número de réplicas do modelo de simulação, conforme apresenta a equação 4.9.

$$n^* = 10 \left( \frac{1,31}{1,00} \right)^2 \cong 17 \quad (4.9)$$

Portanto, o modelo de simulação foi pré-programado para simular 17 réplicas em cada uma das rodadas, fornecendo a precisão e o nível de confiança desejado.

### III. Coleta de dados do sistema real e da simulação

Primeiramente, foram coletados os tempos de ciclo (TC) de oito rodadas de abastecimento. As rodadas tiveram tempo total variando entre 20 minutos e 60 minutos. Dessa forma, após calculados os tempos unitários (Tu) das oito rodadas iniciais, foi possível determinar o poder de teste levando em consideração as características destes dados, bem como verificar o tamanho de amostra ideal para o nível de confiança desejado. Neste contexto, o tamanho da amostra e o poder de teste estão diretamente relacionados aos erros do tipo I e do tipo II. O erro do tipo I ocorre quando se rejeita o modelo, sendo este válido, enquanto que o erro do tipo II ocorre quando se aceita um modelo inválido (SARGENT, 2014). Ainda neste contexto, o erro do tipo I e do tipo II são expressos pelas letras gregas  $\alpha$  e  $\beta$ , respectivamente. Pode-se expressar o poder de teste e o nível de confiança através das equações 4.10 e 4.11 (MONTGOMERY e RUNGER, 2012).

$$\text{Nível de confiança} = (1 - \alpha) \quad (4.10)$$

$$\text{Poder de teste} = (1 - \beta) \quad (4.11)$$

Quanto menor for o erro do tipo I ( $\alpha$ ), maior será o nível de confiança e quanto menor for o erro do tipo II ( $\beta$ ), maior será o poder do teste. Para este trabalho, definiu-se como o nível de confiança desejado igual a 95%, logo  $\alpha = 5\%$ . De maneira análoga, foi definido o poder de teste igual a 80%, logo  $\beta = 20\%$ . Tais valores foram escolhidos pela equipe responsável pelo trabalho e se adequam ao propósito desta aplicação. Por meio do *software* Minitab®, analisou-se os dados provenientes das oito rodadas iniciais e a análise resultou em um poder de teste igual a 45%, valor inferior ao desejado. Ainda com auxílio do *software*, obteve-se o tamanho de amostra ideal para o poder de teste desejado e o resultado encontrado foi uma amostra de tamanho 15. A figura 4.9 ilustra tais resultados.

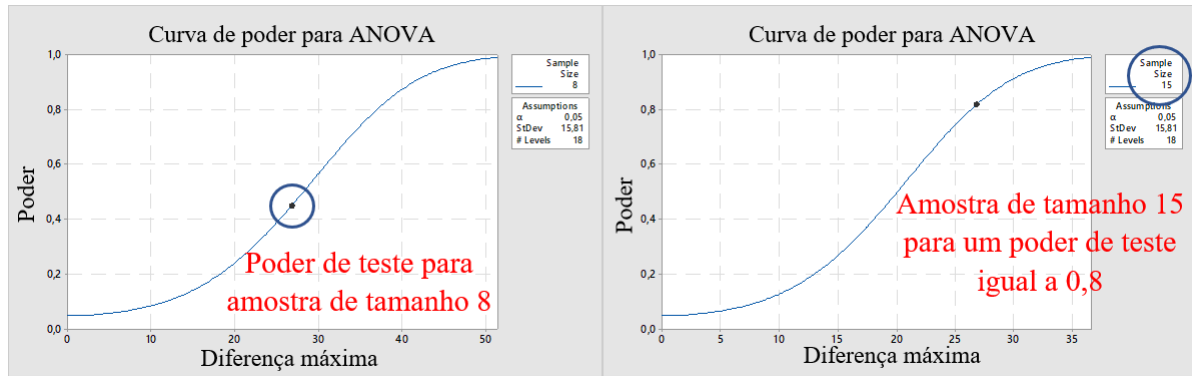


Figura 4.9- Teste para tamanho de amostra

Fonte: elaborado pelo próprio autor

Portanto, para finalizar a coleta de dados do processo, foram tomados os Tempos unitários de abastecimento ( $T_u$ ) de mais sete rodadas, totalizando a amostra de tamanho 15. Em seguida, foram representadas as mesmas 15 rodadas de abastecimento através do modelo de simulação, este que simulou 17 réplicas para cada uma das rodadas. Os dados do sistema real e do modelo de simulação são representados no Apêndice A.

#### IV. Teste de hipóteses e validação

Uma vez coletados os dados e definido o teste de hipóteses adequado, realizou-se o teste ANOVA para validar o modelo. Tal procedimento foi realizado através do *software* Minitab® e a figura 4.10 apresenta o gráfico de comparação entre os dados reais e do modelo de simulação, enquanto a figura 4.11 apresenta o resultado do teste ANOVA. De acordo com o valor P, igual 0,584 e acima de 5%, pode-se afirmar, com um nível de confiança de 95% que não foi possível comprovar alguma diferença significativa entre os dados reais e os dados da simulação (MONTGOMERY e RUNGER, 2012).

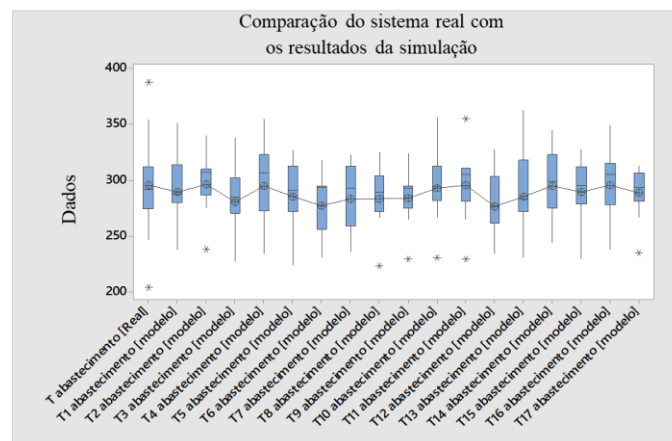


Figura 4.10- Gráfico de comparação entre os dados reais e as réplicas da simulação

Fonte: elaborado pelo próprio autor



Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	17	11144	655,5	0,89	0,584
Error	252	185148	734,7		
Total	269	196292			

Valor P maior que 5%

Model Summary				
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	
27,1056	5,68%	0,00%	0,00%	

Means					
Factor	N	Mean	StDev	95% CI	
T abastecimento [Real]	15	295,9	43,2	( 282,1;	309,7)
T1 abastecimento [modelo]	15	289,71	25,82	(275,93;	303,49)
T2 abastecimento [modelo]	15	296,18	23,03	(282,39;	309,96)
T3 abastecimento [modelo]	15	280,51	27,05	(266,73;	294,29)
T4 abastecimento [modelo]	15	295,13	30,73	(281,35;	308,91)
T5 abastecimento [modelo]	15	285,75	25,27	(271,96;	299,53)
T6 abastecimento [modelo]	15	277,27	23,94	(263,49;	291,05)
T7 abastecimento [modelo]	15	283,57	26,18	(269,78;	297,35)
T8 abastecimento [modelo]	15	283,37	23,54	(269,59;	297,15)
T9 abastecimento [modelo]	15	283,90	21,01	(270,12;	297,69)
T10 abastecimento [modelo]	15	292,72	27,58	(278,94;	306,51)
T11 abastecimento [modelo]	15	295,87	28,56	(282,09;	309,65)
T12 abastecimento [modelo]	15	276,88	24,09	(263,10;	290,66)
T13 abastecimento [modelo]	15	285,67	32,09	(271,89;	299,45)
T14 abastecimento [modelo]	15	295,40	25,63	(281,61;	309,18)
T15 abastecimento [modelo]	15	289,88	23,03	(276,10;	303,66)
T16 abastecimento [modelo]	15	295,54	28,31	(281,76;	309,32)
T17 abastecimento [modelo]	15	288,92	20,44	(275,14;	302,70)

Pooled StDev = 27,1056

Figura 4.11- Resultado do teste ANOVA

Fonte: elaborado pelo próprio autor

Porém, antes de validar o modelo, deve-se considerar algumas suposições do teste ANOVA. Montgomery e Runger (2012) afirmam que, ao testar a igualdade de médias de diferentes níveis, a análise de variâncias assume que as observações são normalmente e independentemente distribuídas. Ainda segundo os autores, tais suposições devem ser checadas por meio dos resíduos dos dados a serem analisados, estes que são representados pela diferença entre a cada observação e a média das observações do respectivo nível. O Apêndice B apresenta a tabela com os resíduos dos dados de validação do modelo, os quais também foram obtidos por meio do *software* Minitab®. Os resíduos foram considerados independentes, uma vez que, em cada um dos 17 níveis, têm-se 15 diferentes rodadas as quais foram executadas em momentos diferentes do projeto. Para confirmar tal premissa, os resíduos foram plotados em uma série temporal, de forma a permitir visualmente a identificação de padrões, caso existam, conforme ilustra a figura 4.12. Conclui-se que os dados não apresentam nenhum comportamento padrão no decorrer das coletas, destacando sua independência.

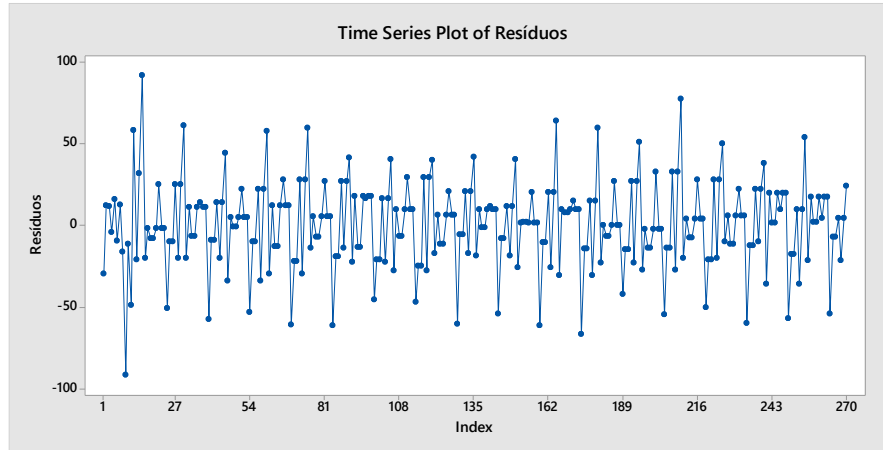


Figura 4.12- Série temporal para os resíduos após teste ANOVA

Fonte: elaborado pelo próprio autor

Além disso, tais resíduos foram testados quanto à sua normalidade através do teste de *Anderson-Darling* e, por meio dos valores P apresentados na tabela 4.5, nota-se que a maioria dos valores P se apresentaram acima de 5%. Portanto, com um nível de confiança de 95%, não se pode afirmar que as distribuições não seguem uma distribuição normal. Quanto aos três parâmetros residuais que não apresentaram valor P acima de 5%, tal fato não deve prejudicar o resultado do teste, uma vez que se têm tamanhos amostrais iguais para todos os níveis (SUPORTE MINITAB, 2018).

Tabela 4.5- Teste de normalidade para os resíduos

Parâmetro [resíduo]	Valor P (Teste <i>Anderson Darling</i> )
T abastecimento [Real]	0,50
T1 abastecimento [modelo]	0,05
T2 abastecimento [modelo]	0,05
T3 abastecimento [modelo]	0,22
T4 abastecimento [modelo]	0,38
T5 abastecimento [modelo]	0,26
T6 abastecimento [modelo]	0,01
T7 abastecimento [modelo]	0,24
T8 abastecimento [modelo]	0,20
T9 abastecimento [modelo]	0,03
T10 abastecimento [modelo]	0,06
T11 abastecimento [modelo]	0,01
T12 abastecimento [modelo]	0,21

T13 abastecimento [modelo]	0,05
T14 abastecimento [modelo]	0,31
T15 abastecimento [modelo]	0,06
T16 abastecimento [modelo]	0,15
T17 abastecimento [modelo]	0,05

Fonte: elaborado pelo próprio autor

Portanto, visto que o teste ANOVA executado atende às premissas pré-estabelecidas, pode-se concluir que o modelo de simulação representa o processo real, objeto deste estudo. Ainda, por meio da abordagem de validação objetiva, conforme apresentado anteriormente, conclui-se que o modelo de simulação está validado estatisticamente. Pode-se, portanto, prosseguir para a última fase do método proposto, a **Modelagem operacional**.

### 4.3. Modelagem operacional

A última fase do método adaptado de Montevechi et al. (2010), de acordo com a figura 3.5 apresentada na seção 3.3, é composta pelas etapas de **definição dos cenários a serem testados**, **execução periódica dos cenários** e, por fim, **análises e tomada de decisões**.

#### 4.3.1. Definição dos cenários a serem testados

Uma vez que na fase de modelagem operacional o modelo de simulação já se encontra validado e pronto para ser utilizado, deve-se definir os cenários a serem testados de forma a se explorar as vantagens oriundas da simulação. Barlas e Heavey (2016) ressaltam que o desenvolvimento e evolução de sistemas reais requerem avaliações e análises de diferentes dados e variáveis, impossíveis ou inviáveis para a mente humana, favorecendo a utilização da simulação. Neste contexto, a simulação de cenários é capaz de analisar diferentes variáveis sob a perspectiva de respostas pré-definidas, objetivando melhores decisões acerca do sistema real.

Os cenários a serem testados no processo de abastecimento de materiais, objeto deste estudo, foram definidos levando-se em conta as respostas desejadas do modelo. Uma vez definida a “rota de abastecimento mais eficiente” como resposta principal da simulação, os cenários foram definidos de forma a se testar as possíveis rotas e obter a rota ideal do ponto de vista da distância percorrida e do total abastecido. Para tal, o *software* de simulação possui uma interface de **experimentação e otimização**, onde é possível definir cenários, variáveis de teste, variáveis de resposta, bem como estruturar experimentos de forma a se otimizar tais respostas por meio da variação dos cenários preestabelecidos. As variáveis de teste, neste caso, foram definidas como sendo a ordens de abastecimento de cada um dos postos *kanbans*. O modelo de simulação irá

permutar tais variáveis de forma a se estabelecer um cenário para cada sequência de abastecimento e todos estes cenários são testados quanto às variáveis de respostas definidas anteriormente (distância percorrida e volume abastecido no período). Como parâmetro de otimização para o *software*, a distância percorrida deve ser minimizada enquanto que a quantidade abastecida no período deve ser maximizado. A figura 4.13 ilustra tal lógica de cenários testados no modelo de simulação.

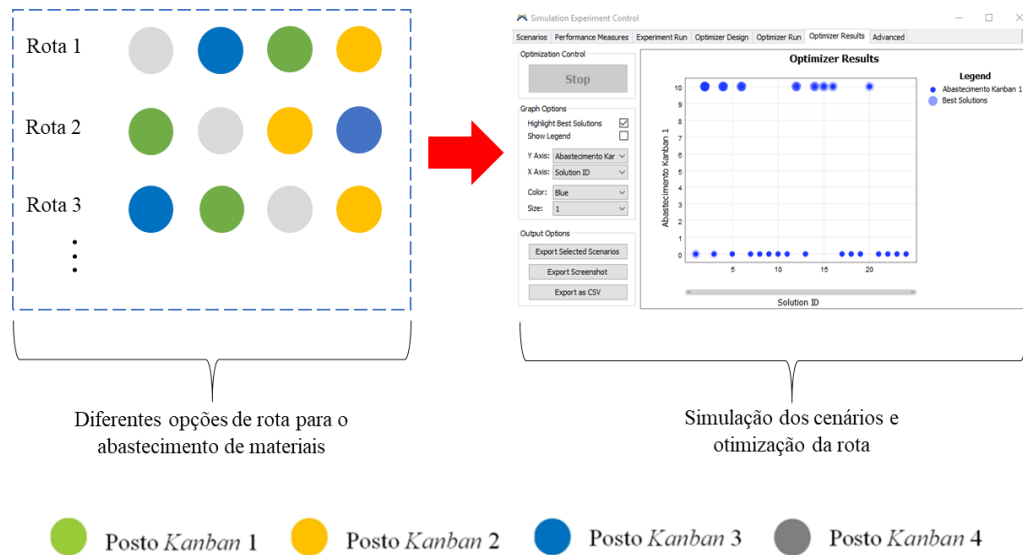


Figura 4.13- Lógica de otimização de cenários através do *software* de simulação

Fonte: elaborado pelo próprio autor

O *software*, após testar os cenários, classifica cada uma das possíveis rotas em um *ranking* onde a melhor rota é aquela que apresenta o melhor resultado combinando as variáveis de resposta. Dessa forma, os resultados são gravados em um banco de dados com extensão “.CSV”, permitindo a posterior importação destes pelo *Dashboard* de controle e gestão. Vale ressaltar a possibilidade de se definir outros cenários a serem testados, de acordo com as necessidades de tomada de decisão. Questões relacionadas à análise de carga de trabalho, redistribuição de tarefas, mudança de layout, dentre outros problemas comuns em operações desta natureza podem ser testados e otimizados a partir de técnicas de experimentação aliadas às funcionalidades do *software*.

### 4.3.2. Execução periódica dos cenários

No contexto da utilização da simulação dentro do conceito de Gêmeo Digital, a execução periódica do modelo passa a ser um dos pilares da integração entre os sistemas virtual e real. Tao et al. (2018) salientam que o Gêmeo Digital deve ser integrado e sincronizado com o

sistema físico, de forma a representa-lo de maneira fiel e realista através da comunicação entre os meios físicos e virtuais. Dessa forma, o modelo de simulação deve ser executado em períodos de tempo pré-determinados de maneira a representar o processo real em suas características principais. Torna-se possível, portanto, a construção de um sistema virtual que reflete o sistema real por meio de seus dados, possibilitando que o modelo de simulação se adapte e modifique frente às variações do sistema físico, objetivando prever e otimizar decisões para o sistema real (RODIČ, 2017).

No que se refere ao intervalo de tempo entre execuções do modelo, deve-se optar por um tempo o qual não prejudicará a tomada de decisão por parte da operação. Neste contexto, Uhlemann, Lehmann e Steinhilper (2017) ressaltam para o fato de que, dentro do conceito de Gêmeo Digital, o modelo virtual deve ser criado e/ou atualizado com um atraso minimizado após a coleta de dados. Já para Kunath e Winkler (2018), de forma a suportar a tomada de decisões, os resultados do Gêmeo Digital precisam ser tão rápidos quanto possível de forma a não prejudicar tal decisão e, conseqüentemente, o processo real. Dessa forma, é necessário levar em conta as características do processo em análise para a definição do tempo entre atualizações do modelo. O processo de abastecimento de materiais é executado durante toda a jornada diária de trabalho e, ao finalizar uma rota de abastecimento, o processo recomeça. Dessa forma, a cada término de rota, o colaborador responsável irá tomar uma nova decisão acerca da próxima rota de abastecimento e é neste momento em que o modelo de simulação será atualizado e executado, auxiliando na tomada de decisão.

### **4.3.3. Análises e tomada de decisões**

Conforme descrito anteriormente, as análises e tomada de decisões serão realizadas ao término de cada rodada de abastecimento de materiais. Dessa forma, têm-se um sistema virtual sincronizado com o processo real e o qual é atualizado e fornece resultados no momento da tomada de decisão. A figura 4.14 apresenta um fluxograma que resume as atividades dentro de cada rodada de abastecimento de materiais, sob a ótica do colaborador responsável pelo processo. A figura ilustra ainda o posicionamento da simulação como Gêmeo Digital dentro do processo, visando a análise e tomada de decisão.

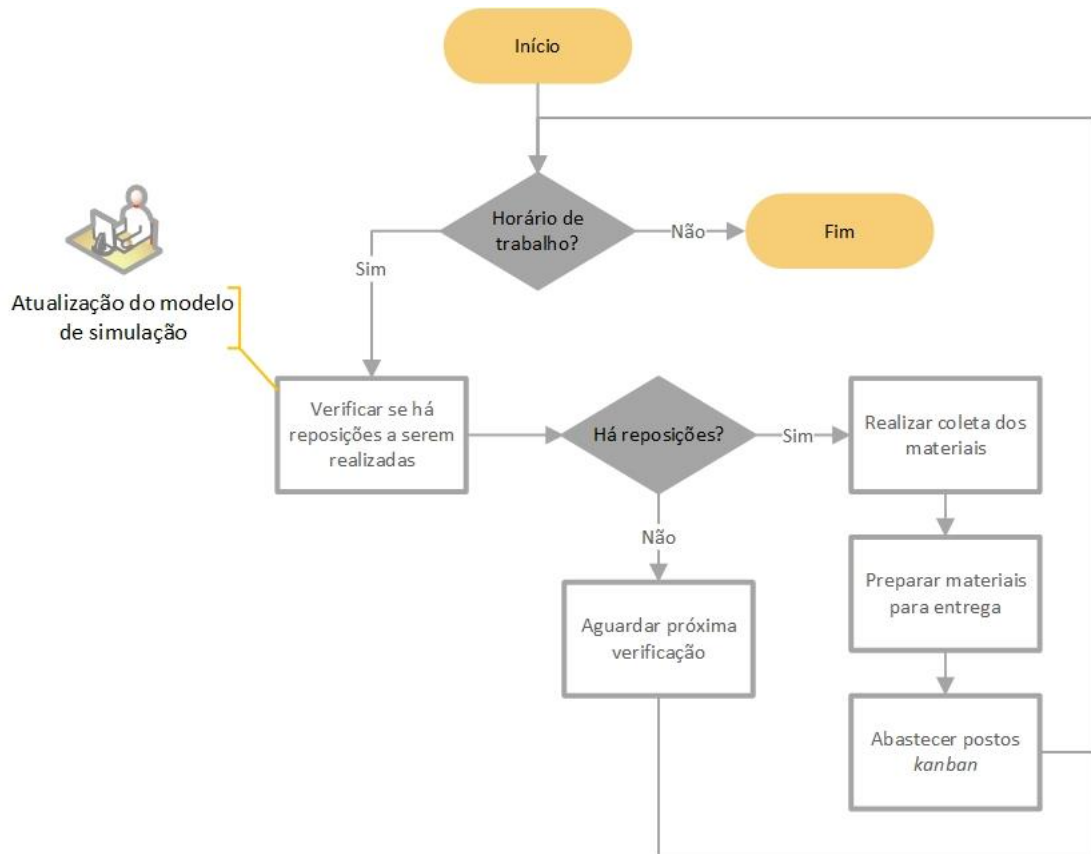


Figura 4.14- Fluxograma referente ao processo de abastecimento de materiais

Fonte: elaborado pelo próprio autor

#### 4.4. Considerações finais

Para fins de comparação entre a eficiência do processo antes e depois de se implementar o Gêmeo Digital para otimizar as rotas de abastecimento, bem como analisar os possíveis ganhos advindos da utilização da ferramenta, pôde-se realizar algumas análises. Foram coletados dados simulados de doze rodadas de abastecimento de materiais, visando comparar as possíveis rotas que o operador poderia seguir para realizar o abastecimento. Vale destacar que tais rotas possuem características semelhantes e o modelo de simulação foi abastecido por dados reais de um dia de operação. A partir de tal comparação, objetiva-se destacar e o ganho obtido após a utilização da SED como Gêmeo Digital na operação de abastecimento dos postos *kanbans*. A figura 4.15 ilustra a comparação entre a rota otimizada e as demais rotas possíveis, em termos da distância média percorrida.

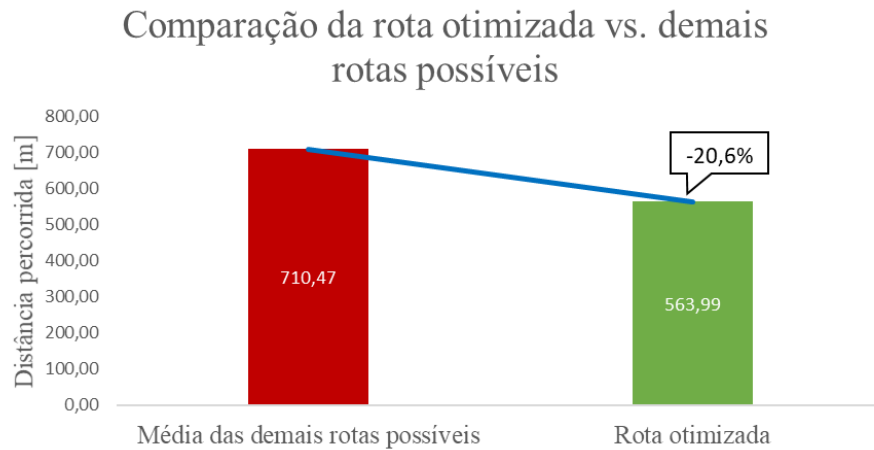


Figura 4.15- Comparação da rota otimizada vs. demais rotas possíveis

Fonte: elaborado pelo próprio autor

Os dados utilizados para tal comparação são apresentados no Apêndice C. Nota-se que há um potencial de redução de cerca de 20% na distância média percorrida pelo operador durante o abastecimento de materiais. Na comparação realizada, a rota otimizada forneceu uma média de 563,99 metros frente à uma média de 710,47 metros nas demais rotas possíveis. Além da redução dos desperdícios relacionados à movimentação de pessoas e transporte de materiais, destaca-se a possibilidade de utilizar o tempo economizado para outras atividades agregadoras de valor, fato este que vai ao encontro dos Conceitos Enxutos. Ainda neste contexto, nota-se que tal redução implicaria em um ganho potencial de cerca de 489,5 horas de trabalho em um ano.

Sem o auxílio do Gêmeo Digital para a tomada de decisões quanto à rota a se seguir, tal como descrito neste trabalho, o desempenho do processo de abastecimento de materiais depende do grau de experiência do operador responsável pelo processo. Tal fato ocorre, pois, a decisão de qual rota de abastecimento seguir dependerá do consumo de materiais em cada uma das linhas produtivas e, neste caso, um operador mais experiente conhece melhor os padrões de consumo, favorecendo escolhas de rota mais eficientes. Além disso, mesmo o operador sendo experiente, não se pode afirmar que a rota de abastecimento escolhida por ele é, de fato, a rota ótima, no que se refere à distância percorrida e ao volume de materiais abastecido. Neste caso, o Gêmeo Digital construído por meio da SED é capaz de fornecer a rota ótima baseando-se nos consumos dos postos *kanbans* e também em ferramentas de otimização inseridas no próprio modelo de simulação, sendo capazes de obter a escolha ótima visando maximizar o volume abastecido e minimizar a distância percorrida.

De forma a viabilizar a utilização do Gêmeo Digital de maneira sustentável, ou seja, visando sua utilização para a tomada de decisões no dia a dia, nota-se a necessidade de fornecer ao operador responsável pelo abastecimento a possibilidade de operar tal sistema. Por meio de uma interface amigável fornecida pelo *Dashboard* de controle e gestão, o operador é capaz de obter a indicação de rota ótima sem a necessidade de conhecimento prévio do modelo de simulação. Dessa forma, o operador passa a compreender e participar do processo de tomada de decisão, agora favorecido pelo Gêmeo Digital. Além disso, o mapa de rota fornecido pelo *Dashboard* atua como uma ferramenta visual, sendo possível sua projeção em telas localizadas no chão de fábrica, visando, sobretudo, uma melhor identificação das rotas por parte de todos envolvidos na operação. Vale ressaltar que o modelo de simulação foi construído visando uma fácil adaptação quanto à inserção de novos postos *kanbans*, bem como à realocação dos postos já presentes, fato que favorece sua utilização de forma atemporal.

É importante destacar que modelos de simulação tradicionais não são capazes de apoiar a tomada de decisões tal como o presente trabalho propõe. Neste caso, algumas vantagens da utilização da simulação como Gêmeo Digital, ao se comparar com modelos tradicionais, são: a possibilidade de coleta automática de dados reais por meio da integração entre os sistemas físicos e virtuais; utilização da simulação como ferramenta diária para tomada de decisões; interface amigável e que exige pouco ou nenhum conhecimento por parte de quem opera o modelo; escopo abrangente e facilmente adaptável, dentre outros.

Por fim, vale ressaltar que a implementação do Gêmeo Digital proposto por este trabalho foi viabilizada sem a necessidade de nenhum investimento, seja em equipamentos e até mesmo em *softwares*, uma vez que a empresa já possui licenças do *software* FlexSim®, bem como todos os equipamentos e infraestrutura necessária para a implementação do Gêmeo Digital, tal como descrito neste trabalho. Entretanto, é importante considerar que tal proposta se limita ao processo de abastecimento e, ao se considerar a utilização do Gêmeo Digital para outras atividades ligadas a este processo, deve-se avaliar a infraestrutura necessária para garantir a coleta de dados, bem como sua integração com o Gêmeo Digital. Neste caso, garantir a confiabilidade dos dados advindos do sistema físico é crucial e, antes de se adquirir equipamentos como sensores, coletores, dentre outros dispositivos de coleta de dados, é importante se atentar para a segurança e confiabilidade fornecida por tais equipamentos. Dados errados podem impactar o funcionamento e as respostas fornecidas pelo Gêmeo Digital, podendo torna-lo inválido ou menos preciso.



## 4.5. Discussão teórica

Após a concepção, implementação e avaliação quanto à utilização da simulação como Gêmeo Digital, pode-se rever e alinhar a presente aplicação ao que é apresentado sobre o tema na literatura. O objetivo é avaliar se, de fato, a aplicação proposta representa um Gêmeo Digital e, ainda, compreender quais características e implicações foram necessárias para tal. A discussão teórica após a aplicação se torna necessária, visto que a utilização da simulação como Gêmeo Digital é pouco explorada na literatura, no que se refere a aplicações práticas e, além disso, por se tratar de um escopo ainda pouco explorado, diversas considerações exclusivas do Gêmeo Digital e também da simulação podem ser discutidas, ao se considerar a aplicação de ambos os conceitos em conjunto. Por fim, cabe ressaltar que tal discussão só foi possível após a compreensão quanto às necessidades e limitações da utilização da Simulação como Gêmeo Digital.

O conceito de Gêmeo Digital, embora tenha sido definido há quase dez anos, por Shafto et al. (2010), vem ganhando destaque nos últimos anos e passa a ser um dos termos-chave no contexto da Indústria 4.0. Sua presença se justifica devido ao fato de que o Gêmeo Digital vem sendo associado ao componente virtual dos chamados Sistemas Ciber-físicos, um dos pilares da Indústria 4.0. Entretanto, apesar de inúmeras aplicações e referências na literatura, nota-se ainda uma certa confusão no que se refere ao conceito do Gêmeo Digital e suas características, sendo comum sua utilização como sinônimo de outros conceitos (KRITZINGER et al., 2018). Resumidamente, Shafto et al. (2010) definem o Gêmeo Digital como uma cópia virtual de um sistema real, a qual se baseia nos dados desse sistema de forma a espelha-lo e, ainda, fornecer resultados que permitem otimizá-lo. Ainda neste contexto, Rodič (2017) resalta que, dentro do contexto da Indústria 4.0, o Gêmeo Digital pode ser representado pela simulação, uma vez que a mesma é capaz de assumir este papel por meio de suas características e funcionalidades principais. Com base nas considerações realizadas, entende-se que a aplicação apresentada constitui uma proposta de implementação do Gêmeo Digital por meio da utilização da simulação integrada ao sistema real.

Vale ressaltar que a utilização da simulação como Gêmeo Digital expande suas possibilidades de aplicação, permite sanar dificuldades e desafios vivenciados por aplicações tradicionais da ferramenta, bem como evidencia a compatibilidade da simulação com os preceitos da Indústria 4.0. Com base na pesquisa desenvolvida, bem como na literatura apresentada no presente trabalho, pode-se comparar as características principais da simulação, no que se refere às suas aplicações tradicionais e como Gêmeo Digital, conforme apresenta o quadro 4.3.

Quadro 4.3- Simulação em aplicações tradicionais vs. Gêmeo Digital

<b>Características</b>	<b>Aplicações tradicionais da simulação</b>	<b>Simulação como Gêmeo Digital</b>
<b>Coleta de dados</b>	Manual	Automática*
<b>Escopo</b>	Limitado*	Abrangente
<b>Objetivo principal</b>	Análises pontuais	Auxílio constante à tomada de decisões*
<b>Percepção de tempo</b>	Análises com dados históricos	Análises em tempo real ou quase real*
<b>Complexidade</b>	Necessidade de especialistas	Interface amigável*
<b>Integração com os processos reais</b>	Não	Sim*
<b>Ferramentas integradas</b>	Otimização*	Otimização, Realidade Virtual e Inteligência Artificial
<b>Atualização do modelo</b>	Manual	Automática e periódica*

\* Características aplicáveis ao Gêmeo Digital proposto neste trabalho

Fonte: elaborado pelo próprio autor

Quanto à percepção do tempo, conforme apresentado no quadro 4.3, autores como Tao et al. (2018), Kunath e Winkler (2018) e Negri et al. (2017) citam o fato de que a coleta de dados do sistema físico, visando abastecer o Gêmeo Digital, deve ocorrer em tempo real. Todavia, pode-se discutir a necessidade de haver a atualização do Gêmeo Digital também em tempo real. Neste caso, Barlas e Heavey (2016) definem a utilização da simulação em tempo real como um sistema onde, caso haja mudanças bruscas no sistema real, pode-se simular o modelo quase que instantaneamente para tomada de decisões. Porém, deve-se atentar para o fato de que o momento de tomada de decisão está diretamente relacionado às características de cada processo, variando o intervalo de tempo entre tais decisões. Dessa forma, espera-se que o modelo de simulação seja atualizado e utilizado na medida em que o processo real se altera e que haja a necessidade de uma nova tomada de decisões. Tal consideração vai ao encontro de Kunath e Winkler (2018), os quais ressaltam que o tempo de resposta do Gêmeo Digital irá variar de acordo com cada caso onde deve-se tomar decisões.

Quanto ao processo de abastecimento, objeto deste estudo, os dados do processo são coletados em tempo real pelo sistema ERP da operação. Tal fato reforça o conceito de sistemas integrados por meio de seus dados e informações. Porém, como o processo de tomada de decisão ocorre em determinados momentos específicos do dia de trabalho, não houve a necessidade de se construir um modelo de simulação com atualização também em tempo real. Neste caso, o atraso

na atualização do modelo não prejudica a tomada de decisão, já que esta ocorre em intervalos de tempo discretos, não havendo necessidade de se atualizar o Gêmeo Digital continuamente, conforme defendem alguns autores. Por fim, têm-se uma proposta de Gêmeo Digital que trabalha em tempo quase real, sendo atualizado todas as vezes em que o processo carece de tomada de decisões.

Outro ponto a ser tratado refere-se à necessidade de haver tomada de decisões autônomas por parte do Gêmeo Digital, com conseqüente mudança no sistema real sem a intervenção humana. De fato, alguns autores como Rosen et al. (2015) e Kritzinger et al. (2018) defendem a ideia de que mudanças no sistema físico devem refletir instantaneamente no sistema virtual e vice-versa, entretanto, sistemas totalmente autônomos e automatizados não são realidade na maioria dos processos atuais, fato que inviabilizaria a implementação de Gêmeos Digitais. Contrapondo tal ideia, o presente trabalho ilustra um caso aplicado de Gêmeo Digital em um processo não automatizado, onde os resultados do Gêmeo Digital estão no formato de recomendações para o ambiente real. Tal ponto de vista é compartilhado pelos criadores do termo Gêmeo Digital, Shafo et al. (2010), os quais relatam que o mesmo avalia e recomenda mudanças para o sistema físico a fim de se otimizá-lo. Além disso, também vai ao encontro de Negri et al. (2017), os quais defendem que o Gêmeo Digital fornece uma gama de informações e resultados, nos quais o usuário ou o sistema autônomo pode se basear para tomada de decisões.

Portanto, com base nas considerações apresentadas acima, embora a presente proposta de um Gêmeo Digital a partir da SED não possua atualização em tempo real e apesar de sua resposta ao sistema físico ocorrer por meio de sugestões quanto à rota a se seguir, ou seja, uma resposta não autônoma, pode-se afirmar que tal aplicação da SED constitui um Gêmeo Digital. Diferentemente de projetos tradicionais de SED, têm-se um modelo de simulação abastecido de forma automatizada e capaz de espelhar e influenciar no ambiente real de forma periódica, fatos estes que ampliam o poder de atuação da ferramenta e permitem sua utilização em um contexto cada vez mais exigente, no que se refere ao tempo de tomada de decisões. Ainda, de acordo com os diversos posicionamentos presentes na literatura acerca do tema, têm-se um Gêmeo Digital não autônomo e o qual baseia-se em atualizações periódicas para fornecer o auxílio à tomada de decisões. Vale ressaltar que tal consideração é válida devido ao fato de que o processo objeto deste estudo possui características não automatizadas e tomadas de decisões em intervalos discretos de tempo, não carecendo de atualizações contínuas e em tempo real.

## 5. CONCLUSÕES

As conclusões da presente pesquisa são apresentadas a seguir em três subseções. Primeiramente, são abordados os resultados obtidos neste trabalho, destacando sua efetividade quanto aos objetivos propostos inicialmente. Em seguida, são destacadas as limitações deste trabalho, abordando aspectos práticos e teóricos. Por fim, são apresentadas possibilidades para trabalhos futuros.

### 5.1. Síntese dos resultados

A utilização da simulação como Gêmeo Digital em um processo real com baixo grau de automatização se mostrou possível a partir da presente pesquisa. Embora muitos autores relatem o alto investimento em tecnologias e estruturas visando adequar processos e sistemas aos preceitos da Indústria 4.0, nota-se que tais investimentos podem ser reduzidos a partir da utilização de ferramentas versáteis como a simulação. Vale ressaltar que o Gêmeo Digital compõe apenas um dos pilares da Indústria 4.0, o chamado Sistema Ciber-Físico. Entretanto, o Sistema Ciber-físico se apresenta como fator chave para a concepção dos demais pilares, uma vez que demanda o desenvolvimento destes. Como contribuição para a literatura, tem-se a aplicação da SED como Gêmeo Digital em um processo real. Conforme visto no decorrer da presente pesquisa, há certa defasagem na literatura quanto a casos de implementação de Gêmeos Digitais em objetos de estudo reais. Ainda, nota-se que a possibilidade de se utilizar a simulação como Gêmeo Digital é igualmente pouco explorada em trabalhos científicos e carece de exemplos práticos a fim de se analisar os benefícios oriundos de tal utilização, bem como suas dificuldades e desafios, fatos estes que tornam válida a presente pesquisa.

Para a realização deste trabalho foi proposta a aplicação da simulação como Gêmeo Digital em um processo real de uma indústria do ramo aeronáutico. O processo em questão refere-se à uma operação de abastecimento de materiais em postos *kanbans* dispostos nas linhas produtivas da empresa e, neste caso, há grande intervenção humana e pouca automatização, esta última presente apenas nos registros sistêmicos dos materiais por meio de coletores de dados. Com o objetivo de otimizar as rotas de abastecimento, visando a menor distância percorrida e maior volume de materiais abastecidos diariamente, utilizou-se do Gêmeo Digital para apoio à decisão quanto à melhor rota de abastecimento a ser seguida pelos operadores responsáveis.

Frente à uma baixa expectativa de retorno no caso de grandes investimentos visando adequar o processo aos preceitos da Indústria 4.0, a implementação de um Gêmeo Digital por meio da simulação se mostrou uma alternativa eficiente e financeiramente viável. Para a viabilização de

tal aplicação foi necessária a adaptação de um método para condução de projetos de simulação visando sua aplicação como Gêmeo Digital. O método escolhido como base para a adaptação foi o proposto por Montevechi et al. (2010) e, a partir deste, foram criadas novas etapas relacionadas à integração do modelo de simulação com os dados do processo, bem como à sua utilização constante como ferramenta de auxílio à tomada de decisões.

Quanto à aplicação do método proposto, utilizou-se do *software* Flexsim® para a construção do modelo de simulação. Tal escolha se deu devido à sua facilidade de utilização, capacidade gráfica oferecida, bem como suas possibilidades de conexão com sistemas externos. Ambas características vão ao encontro dos preceitos da Indústria 4.0, onde a capacidade de integração entre os sistemas, visando o compartilhamento de dados e informações, e a exploração gráfica para criação de cópias virtuais são requisitos imprescindíveis no contexto da indústria moderna. Além disso, foi utilizada uma interface intermediária visando permitir a comunicação entre o modelo de simulação e os dados do processo, sendo tais dados advindos do sistema ERP da empresa. A interface intermediária foi construída a partir do *software* Excel® e, por meio de controles automatizados, tal interface é capaz de buscar os dados do processo real, trabalhá-los e inseri-los no modelo de simulação. Vale ressaltar que a presença de um sistema intermediário foi fundamental para garantir a confiabilidade dos dados e das análises realizadas.

Como resultado da presente pesquisa, obteve-se um Gêmeo Digital que, por meio da SED e de uma interface intermediária, extrai os dados advindos do sistema ERP quanto ao consumo de materiais em cada posto *kanban*, simula e otimiza as possíveis rotas de abastecimento e fornece ao operador responsável pela operação as opções de rota mais eficientes. Com gráficos de comparação de rotas, bem como estimativas de distância, tempo e volume abastecido, nota-se que o Gêmeo Digital tornou o processo, objeto deste estudo, um sistema inteligente e conectado com os demais sistemas da operação, fato este que está de acordo com os preceitos da Indústria 4.0. Além disso, na busca por maior eficiência, nota-se também que tal aplicação vai ao encontro dos princípios da filosofia enxuta, uma vez que foi possível reduzir movimentações e transportes desnecessários na ordem de 20%, estes considerados desperdícios a serem reduzidos ou eliminados de acordo com os Conceitos Enxutos.

Finalmente, tendo em vista que o processo objeto deste estudo carecia de tomadas de decisão com relação à rota de abastecimento a ser seguida e que tais decisões são tomadas em intervalos discretos de tempo, não houve a necessidade de se estabelecer um Gêmeo Digital em Tempo Real. Como consequência, a simulação neste caso também não necessitou ser atualizada em tempo real, mas somente nos momentos de tomada de decisão. Defende-se, portanto, que a simulação em tempo quase real e o consequente Gêmeo Digital em tempo quase real pode ser

uma abordagem válida e eficiente, desde que o intervalo de tempo entre suas atualizações não prejudique a tomada de decisão. Além disso, por se tratar de um processo quase que totalmente manual, as respostas do Gêmeo Digital são em forma de recomendações quanto à rota a ser seguida. Tal fato não descaracteriza o Gêmeo Digital e ilustra a possibilidade de sua implementação em processos com pouca ou nenhuma automatização.

## **5.2. Limitações da pesquisa**

Algumas limitações da pesquisa devem ser mencionadas. Para a construção do modelo de simulação do Gêmeo Digital proposto, utilizou-se de um *software* comercial, o qual já acompanha pacotes de otimização. Entretanto, ferramentas avançadas como Inteligência Artificial e Aprendizagem de Máquina não são comumente utilizadas com tais *softwares*, devido principalmente à falta de uma estrutura própria para tal. Dessa forma, não foi possível explorar a utilização de tais ferramentas, as quais podem auxiliar na concepção de um Gêmeo Digital com alto grau de inteligência e com melhor desempenho no quesito tempo de processamento e resposta.

Além disso, de acordo com os preceitos da Indústria 4.0, deve-se buscar por processos cada vez mais conectados e integrados, tendo em vista a concepção de Gêmeos Digitais que englobam toda a rede e todo o ciclo de vida dos processos. Entretanto, a presente pesquisa, devido à limitação temporal, focou somente na concepção de um Gêmeo Digital de um processo específico, havendo, portanto, a necessidade de se expandir tal conceito para toda a cadeia produtiva e logística da empresa objeto deste estudo.

## **5.3. Recomendações para trabalhos futuros**

As recomendações para trabalhos futuros estão relacionadas às limitações supracitadas. De forma a avaliar a concepção de Gêmeos Digitais altamente inteligentes, propõe-se a utilização da simulação em conjunto com ferramentas de Inteligência Artificial e Aprendizagem de Máquina. Dessa forma, os Gêmeos Digitais estarão aptos a aprender com suas próprias experiências, resultando em decisões mais eficientes e com um tempo de resposta mais curto. Vale ressaltar que, neste caso, pode haver a necessidade de se trabalhar com a simulação em *softwares* não específicos para tal aplicação, fato este que deve ser analisado quanto aos impactos na utilização da simulação como Gêmeo Digital.

Além disso, cabem futuras análises quanto à utilização de diversos Gêmeos Digitais de diferentes processos dentro de uma mesma cadeia produtiva. Ao se considerar a presença de

mais de um Gêmeo Digital, deve-se analisar a influência de um para o outro, no que se refere à tomada de decisões e, neste caso, sugere-se pesquisas acerca de tal cenário. Por fim, outro ponto que demanda pesquisas neste contexto diz respeito à validação dos Gêmeos Digitais frente às mudanças nos processos reais. Uma vez que os Gêmeos Digitais espelham os processos reais, espera-se que, frente a mudanças atípicas e não previstas, tais sistemas possam deixar de ser válidos. Dessa forma, propõe-se pesquisas acerca de técnicas de validação dos Gêmeos Digitais sob tais circunstâncias.

## APÊNDICE A – Dados para validação do modelo

Rodada	T abastecimento	T1 abastecimento	T2 abastecimento	T3 abastecimento	T4 abastecimento	T5 abastecimento	T6 abastecimento	T7 abastecimento	T8 abastecimento
	[Real]	[modelo]	[modelo]	[modelo]	[modelo]	[modelo]	[modelo]	[modelo]	[modelo]
1	266,22	269,67	275,85	246,60	265,48	271,94	254,86	255,75	266,23
2	307,83	287,70	307,08	285,16	306,98	290,79	294,87	293,10	289,41
3	307,29	281,53	289,31	279,66	282,32	278,68	263,60	276,81	271,83
4	291,57	281,53	289,31	279,66	282,32	278,68	263,60	276,81	271,83
5	311,83	287,70	307,08	285,16	306,98	290,79	294,87	293,10	289,41
6	286,20	314,47	310,30	302,78	322,90	312,55	293,67	312,82	304,23
7	308,33	287,70	307,08	285,16	306,98	290,79	294,87	293,10	289,41
8	279,50	287,70	307,08	285,16	306,98	290,79	294,87	293,10	289,41
9	204,35	238,70	238,51	227,35	234,24	224,48	231,87	236,49	223,11
10	284,50	279,75	287,17	270,29	272,87	266,35	256,02	258,81	277,83
11	246,88	279,75	287,17	270,29	272,87	266,35	256,02	258,81	277,83
12	354,20	314,47	310,30	302,78	322,90	312,55	293,67	312,82	304,23
13	274,78	269,67	275,85	246,60	265,48	271,94	254,86	255,75	266,23
14	327,40	314,47	310,30	302,78	322,90	312,55	293,67	312,82	304,23
15	387,75	350,86	340,28	338,24	354,80	326,94	317,71	323,39	325,33

Rodada	T9 abastecimento	T10 abastecimento	T11 abastecimento	T12 abastecimento	T13 abastecimento	T14 abastecimento	T15 abastecimento	T16 abastecimento	T17 abastecimento	T18 abastecimento
	[modelo]	[modelo]	[modelo]	[modelo]	[modelo]	[modelo]	[modelo]	[modelo]	[modelo]	[modelo]
1	264,98	266,91	264,97	254,04	258,27	275,18	279,95	259,39	267,29	267,29
2	293,31	294,32	305,28	277,03	283,41	299,34	295,79	315,29	306,43	306,43
3	282,32	294,70	303,59	270,04	271,55	287,69	278,59	297,20	291,01	291,01
4	282,32	294,70	303,59	270,04	271,55	287,69	278,59	297,20	291,01	291,01
5	293,31	294,32	305,28	277,03	283,41	299,34	295,79	315,29	306,43	306,43
6	295,24	312,89	310,80	303,56	318,17	323,00	312,02	305,12	293,44	293,44
7	293,31	294,32	305,28	277,03	283,41	299,34	295,79	315,29	306,43	306,43
8	293,31	294,32	305,28	277,03	283,41	299,34	295,79	315,29	306,43	306,43
9	229,60	231,11	229,28	234,55	230,87	244,85	229,75	238,63	234,75	234,75
10	275,57	282,09	281,46	261,87	271,84	274,43	277,24	277,73	281,70	281,70
11	275,57	282,09	281,46	261,87	271,84	274,43	277,24	277,73	281,70	281,70
12	295,24	312,89	310,80	303,56	318,17	323,00	312,02	305,12	293,44	293,44
13	264,98	266,91	264,97	254,04	258,27	275,18	279,95	259,39	267,29	267,29
14	295,24	312,89	310,80	303,56	318,17	323,00	312,02	305,12	293,44	293,44
15	324,28	356,41	355,20	327,95	362,72	345,18	327,67	349,32	312,99	312,99



## APÊNDICE B – Resíduos dos dados de validação

Rodada	T1 abastecimento [Real]	T1 abastecimento [modelo]	T2 abastecimento [modelo]	T3 abastecimento [modelo]	T4 abastecimento [modelo]	T5 abastecimento [modelo]	T6 abastecimento [modelo]	T7 abastecimento [modelo]	T8 abastecimento [modelo]
1	-29,69	-20,04	-20,32	-33,91	-29,65	-13,81	-22,41	-27,81	-17,14
2	11,92	-2,01	10,90	4,65	11,84	5,05	17,60	9,53	6,04
3	11,38	-8,18	-6,86	-0,85	-12,81	-7,06	-13,67	-6,75	-11,54
4	-4,34	-8,18	-6,86	-0,85	-12,81	-7,06	-13,67	-6,75	-11,54
5	15,92	-2,01	10,90	4,65	11,84	5,05	17,60	9,53	6,04
6	-9,71	24,76	14,12	22,27	27,77	26,81	16,40	29,26	20,86
7	12,42	-2,01	10,90	4,65	11,84	5,05	17,60	9,53	6,04
8	-16,41	-2,01	10,90	4,65	11,84	5,05	17,60	9,53	6,04
9	-91,56	-51,01	-57,67	-53,16	-60,89	-61,27	-45,40	-47,07	-60,26
10	-11,41	-9,97	-9,01	-10,22	-22,26	-19,40	-21,25	-24,75	-5,54
11	-49,03	-9,97	-9,01	-10,22	-22,26	-19,40	-21,25	-24,75	-5,54
12	58,29	24,76	14,12	22,27	27,77	26,81	16,40	29,26	20,86
13	-21,13	-20,04	-20,32	-33,91	-29,65	-13,81	-22,41	-27,81	-17,14
14	31,49	24,76	14,12	22,27	27,77	26,81	16,40	29,26	20,86
15	91,84	61,15	44,10	57,73	59,67	41,20	40,45	39,82	41,96

Rodada	T9 abastecimento [modelo]	T10 abastecimento [modelo]	T11 abastecimento [modelo]	T12 abastecimento [modelo]	T13 abastecimento [modelo]	T14 abastecimento [modelo]	T15 abastecimento [modelo]	T16 abastecimento [modelo]	T17 abastecimento [modelo]	T18 abastecimento [modelo]
1	-18,92	-25,81	-30,90	-22,84	-27,40	-20,22	-9,93	-36,14	-21,63	-21,63
2	9,40	1,60	9,41	0,15	-2,26	3,94	5,91	19,75	17,51	17,51
3	-1,59	1,97	7,72	-6,84	-14,12	-7,71	-11,29	1,66	2,09	2,09
4	-1,59	1,97	7,72	-6,84	-14,12	-7,71	-11,29	1,66	2,09	2,09
5	9,40	1,60	9,41	0,15	-2,26	3,94	5,91	19,75	17,51	17,51
6	11,33	20,16	14,93	26,68	32,50	27,60	22,14	9,58	4,52	4,52
7	9,40	1,60	9,41	0,15	-2,26	3,94	5,91	19,75	17,51	17,51
8	9,40	1,60	9,41	0,15	-2,26	3,94	5,91	19,75	17,51	17,51
9	-54,30	-61,61	-66,58	-42,33	-54,80	-50,55	-60,13	-56,91	-54,17	-54,17
10	-8,33	-10,64	-14,41	-15,01	-13,83	-20,96	-12,64	-17,81	-7,22	-7,22
11	-8,33	-10,64	-14,41	-15,01	-13,83	-20,96	-12,64	-17,81	-7,22	-7,22
12	11,33	20,16	14,93	26,68	32,50	27,60	22,14	9,58	4,52	4,52
13	-18,92	-25,81	-30,90	-22,84	-27,40	-20,22	-9,93	-36,14	-21,63	-21,63
14	11,33	20,16	14,93	26,68	32,50	27,60	22,14	9,58	4,52	4,52
15	40,38	63,69	59,33	51,07	77,05	49,78	37,79	53,78	24,07	24,07

## APÊNDICE C – Dados para comparação das rotas

Rodada	Rota 13 [m]	Rota 14 [m]	Rota 15 [m]	Rota 16 [m]	Rota 17 [m]	Rota 18 [m]	Rota 19 [m]	Rota 20 [m]	Rota 21 [m]	Rota 22 [m]	Rota 23 [m]	Rota 24 [m]
1	563,69	605,81	613,91	613,91	613,91	618,55	656,03	660,67	667,20	675,30	680,07	707,65
2	566,96	609,08	617,18	617,18	617,18	621,82	659,30	663,94	670,47	678,57	683,34	710,92
3	563,83	605,95	614,05	614,05	614,05	618,69	656,17	660,81	667,34	675,44	680,21	707,79
4	563,68	605,80	613,90	613,90	613,90	618,54	656,02	660,66	667,19	675,29	680,06	707,64
5	563,83	605,95	614,05	614,05	614,05	618,69	656,17	660,81	667,34	675,44	680,21	707,79
6	563,69	605,81	613,91	613,91	613,91	618,55	656,03	660,67	667,20	675,30	680,07	707,65
7	563,68	605,80	613,90	613,90	613,90	618,54	656,02	660,66	667,18	675,28	680,06	707,64
8	566,96	609,08	617,18	617,18	617,18	621,82	659,30	663,94	670,47	678,57	683,34	710,92
9	563,68	605,80	613,90	613,90	613,90	618,54	656,02	660,66	667,18	675,28	680,06	707,64
10	560,55	602,67	610,77	610,77	610,77	615,41	652,89	657,53	664,06	672,16	676,93	704,51
11	563,69	605,81	613,91	613,91	613,91	618,55	656,03	660,67	667,20	675,30	680,07	707,65
12	563,68	605,80	613,90	613,90	613,90	618,54	656,02	660,66	667,19	675,29	680,06	707,64

Rodada	Rota 13 [m]	Rota 14 [m]	Rota 15 [m]	Rota 16 [m]	Rota 17 [m]	Rota 18 [m]	Rota 19 [m]	Rota 20 [m]	Rota 21 [m]	Rota 22 [m]	Rota 23 [m]	Rota 24 [m]
1	707,65	715,75	722,28	730,29	757,87	764,40	764,40	777,27	814,62	819,39	819,39	827,49
2	710,92	719,02	725,55	733,56	761,14	767,67	767,67	780,54	817,89	822,66	822,66	830,76
3	707,79	715,89	722,42	730,43	758,01	764,54	764,54	777,41	814,76	819,53	819,53	827,63
4	707,64	715,74	722,27	730,28	757,86	764,39	764,39	777,26	814,61	819,38	819,38	827,48
5	707,79	715,89	722,42	730,43	758,01	764,54	764,54	777,41	814,76	819,53	819,53	827,63
6	707,65	715,75	722,28	730,29	757,87	764,40	764,40	777,27	814,62	819,39	819,39	827,49
7	707,64	715,74	722,26	730,28	757,86	764,38	764,38	777,26	814,60	819,38	819,38	827,48
8	710,92	719,02	725,55	733,56	761,14	767,67	767,67	780,54	817,89	822,66	822,66	830,76
9	707,64	715,74	722,26	730,28	757,86	764,38	764,38	777,26	814,60	819,38	819,38	827,48
10	704,51	712,61	719,14	727,15	754,73	761,26	761,26	774,13	811,48	816,25	816,25	824,35
11	707,65	715,75	722,28	730,29	757,87	764,40	764,40	777,27	814,62	819,39	819,39	827,49
12	707,64	715,74	722,27	730,28	757,86	764,39	764,39	777,26	814,61	819,38	819,38	827,48

## APÊNDICE D – Submissões e publicações realizadas

### Publicações

SANTOS, C. H.; QUEIROZ, J. A.; LEAL, F.; OLIVEIRA, M. L.; JULIOR, J. H. C. G. Proposta de um método para condução de projetos de simulação no contexto da Indústria 4.0: uma aplicação da simulação como sistema *cyber*-físico em uma indústria do setor aeronáutico. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO). **Anais...** Limeira, SP: 2019.

SANTOS, C. H.; QUEIROZ, J. A.; LEAL, F.; OLIVEIRA, M. L.; JULIOR, J. H. C. G.; ACOSTA, E. F. Utilização da simulação dentro do contexto da Indústria 4.0: proposta de um sistema *cyber*-físico visando a redução de desperdícios em um processo de abastecimento de materiais de uma indústria aeronáutica. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP). **Anais...** Santos, SP: 2019.

## REFERÊNCIAS

- AKHAVIAN, R.; BEHZADAN, A. H. An integrated data collection and analysis framework for remote monitoring and planning of construction operations. **Advanced Engineering Informatics**, v. 26, p. 749–761, 2012.
- APRIL, J.; BETTER, M.; GLOVER, F.; KELLY, J. **New advances and applications for marrying simulation and optimization**. In: Winter Simulation Conference. **Proceedings...** Washington, D.C.: 2004.
- BALCI, O. A life cycle for modeling and simulation. **Simulation**, v. 88, n. 7, p. 870–883, 2012.
- BANKS, J. **Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications and Practice**. 1. ed. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 1998.
- BANKS, J.; CARSON II, J. S.; NELSON, B. L.; NICOL, D. M. **Discrete Event System Simulation**. 5. ed. New Jersey: Pearson, 2010.
- BANKS, J.; CHWIF, L. Warnings about simulation. **Journal of Simulation**, v. 1, p. 1–13, 2010.
- BARIL, C.; GASCON, V.; MILLER, J.; CÔTÉ, N. Use of a discrete-event simulation in a Kaizen event: a case study in healthcare. **European Journal of Operational Research**, v. 249, p. 327–339, 2016.
- BARLAS, P.; HEAVEY, C. Automation of input data to discrete event simulation for manufacturing: A review. **International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing**, v. 07, n. 01, p. 1–27, 2016.
- BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 241–264, 2002.
- BOSCHERT, S.; ROSEN, R. Digital Twin—The Simulation Aspect. In: HEHENBERGER, P.; BRADLEY, D. (eds) **Mechatronic Futures**. Cham: Springer, 2016. Cap.5, p. 59–74.
- BOTÍN, J. A.; CAMPBELL, A. N.; GUZMÁN, R. A discrete-event simulation tool for real-time management of pre-production development fleets in a block-caving project. **International Journal of Mining, Reclamation and Environment**, v. 29, n. 5, p. 347–356, 2015.
- BUER, S.; STRANDHAGEN, J. O.; CHAN, F. 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.
- CASSETTARI, L.; BENDATO, I.; MOSCA, M.; MOSCA, R. Energy Resources Intelligent Management using on line real-time simulation: A decision support tool for sustainable manufacturing. **Applied Energy**, v. 190, p. 841–851, 2017.
- CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos**. 4. ed. São Paulo: Elsevier, 2015.

DAMIANI, L.; DEMARTINI, M.; GIRIBONE, P.; MAGGIANI, M.; REVETRIA, R. **Simulation and Digital Twin Based Design of a Production Line: A Case Study**. In: International MultiConference of Engineers and Computer Scientists. **Proceedings...** Hong Kong: 2018.

FISHMAN, G. S. **Discrete-Event Simulation: modeling, programming and analysis**. 1. ed. New York: Springer, 2001.

FRAZZON, E.; TORTORELLA, G. L.; HOLTZ, T.; DÁVALOS, R.; COELHO, L. Simulation-based analysis of a supplier-manufacturer relationship in lean supply chains. **International Journal of Lean Six Sigma**, v. 8, n. 3, p. 262–274, 2017.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Editora Atlas, 2002.

GOGI, A.; TAKO, A. A.; ROBINSON, S. An experimental investigation into the role of simulation models in generating insights. **European Journal of Operational Research**, v. 249, p. 931–944, 2016.

GOLDSMAN, D.; NANCE, R. E.; WILSON, J. R. **A brief history of simulation revisited**. In: Winter Simulation Conference. **Proceedings...** Baltimore, MD: 2010.

GREASLEY, A.; OWEN, C. Modelling people's behaviour using discrete-event simulation: a review. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 38, n. 5, p. 1228–1244, 2018.

GUIMARÃES, A. M. C.; LEAL, J. E.; MENDES, P. Discrete-event simulation software selection for manufacturing based on the maturity model. **Computers in Industry**, v. 103, p. 14–27, 2018.

HEGER, J.; GRUNDSTEIN, S.; FREITAG, M. Online-scheduling using past and real-time data. An assessment by discrete event simulation using exponential smoothing. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 19, p. 158–163, 2017.

HINES, P.; TAYLOR, D. **Going lean**. 1. ed. Cardiff: Lean Enterprise Research Centre, 2000.

JAHANGIRIAN, M.; ELDABI, T.; NASEER, A.; STERGIOULAS, L. K.; YOUNG, T. Simulation in manufacturing and business: A review. **European Journal of Operational Research**, v. 203, n. 1, p. 1–13, 2010.

JAIN, S.; LECHEVALIER, D. **Standards Based Generation of a Virtual Factory Model**. In: Winter Simulation Conference. **Proceedings...** Washington, D.C.: 2016.

KRITZINGER, W.; KARNER, M.; TRAAR, G.; HENJES, J.; SIHN, W. Digital Twin Twin in manufacturing: A categorical review and classification. **IFAC-PapersOnLine**, v. 51, n. 11, p. 1016–1022, 2018.

KUNATH, M.; WINKLER, H. Integrating the Digital Twin of the manufacturing system into a decision support system for improving the order management process. **Procedia CIRP**, v. 72, p. 225–231, 2018.

LAW, A. M. **How to build valid and credible simulation models**. In: Winter Simulation Conference. **Proceedings...** Austin, TX: 2009.

LAW, A. M. **Simulation Modeling and Analysis**. 5. ed. Boston: McGraw-Hill Science, 2014.

LEAL, F. **Análise do efeito interativo de falhas em processos de manufatura através de projeto de experimentos simulados**. 2008. 237 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.

LEAL, F.; ALMEIDA, D. A.; MONTEVECHI, J. A. B. **Uma Proposta de Técnica de Modelagem Conceitual para a Simulação através de Elementos do IDEF**. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO). **Anais...** João pessoa, PB: 2008.

LEE, H. Real - time manufacturing modeling and simulation framework using augmented reality and stochastic network analysis. **Virtual Reality**, v. 23, n. 1, p. 85–99, 2019.

LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. **Manufacturing Letters**, v. 3, p. 18–23, 2015.

LIU, Y.; XU, X. Industry 4.0 and Cloud Manufacturing: A Comparative Analysis. **Journal of manufacturing Science and Engineering**, v. 139, p. 1–8, 2017.

LU, Y. Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. **Journal of Industrial Information Integration**, v. 6, p. 1–10, 2017.

MACAL, C.; NORTH, M. Introductory tutorial: **Agent-based modeling and simulation**. In: Winter Simulation Conference. **Proceedings...** Lemont, IL: 2014.

MAHMOOD, W. H. W.; YUSUP, M. Z.; SALLEH, M. R. MUHAMAD, M. R.; RAHMAN, M. N. A. Simulation Modelling for Lean Production: case study. **Journal of Advanced Manufacturing technology**, v. 12, n. 2, p. 223–232, 2018.

MANAVALAN, E.; JAYAKRISHNA, K. A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements. **Computers & Industrial Engineering**, v. 127, p. 925–953, 2019.

MIGUEL, P. A. C.; FLEURY, A.; MELLO, C. H. P.; NAKANO, D. N.; LIMA, E. P.; TURRIONI, J. B.; HO, L. L.; MORABITO, R.; COSTA, S. E. G.; MARTINS, R. A.; SOUSA, R.; PUREZA, V. **Metodologia de pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de operações**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

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

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

MONTEVECHI, J. A. B.; PEREIRA, T. F.; SILVA, C. E. S.; Miranda, R. C.; SCHEIDEGGER, A. P. G. **Identification of the main methods used in simulation projects**. In: Winter Simulation Conference. **Proceedings...** Huntington Beach, CA: 2015.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 5. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2012.

MUELLER, E.; CHEN, X.; RIEDEL, R. Challenges and Requirements for the Application of Industry 4.0: a Special Insight with the Usage of Cyber-Physical System. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, v. 30, p. 1050–1057, 2017.

NANCE, R. E.; SARGENT, R. G. Perspectives on the Evolution of Simulation. **Operations Research**, v. 50, p. 161–172, 2002.

NEGAHBAN, A.; SMITH, J. S. Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 33, p. 241–261, 2014.

NEGRI, E.; FUMAGALLI, L.; MACCHI, M. A review of the roles of Digital Twin in CPS-based production systems. **Procedia Manufacturing**, v. 11, p. 939–948, 2017.

OHNO, T. **O Sistema Toyota de Produção**. 1. ed. Porto Alegre: Bookman, 1997.

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

OPACIC, L.; SOWLATI, T. Applications of Discrete-Event Simulation in the Forest Products Sector : a Review. **Forest Products Journal**, v. 67, p. 219–229, 2016.

OSCARSSON, J.; MORIS, M. U. **Documentation of discrete event simulation models for manufacturing system life cycle simulation**. In: Winter Simulation Conference. **Proceedings...** San Diego, CA: 2002.

OU, G.; DYKE, S. J.; PRAKASH, A. Real time hybrid simulation with online model updating: An analysis of accuracy. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 84, p. 223–240, 2017.

PEREIRA, A. C.; ROMERO, F. A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept. **Procedia Manufacturing**, v. 13, p. 1206–1214, 2017.

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

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do Trabalho Científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Universidade Feevale, 2013.

QI, Q.; TAO, F. Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison. **IEEE Access**, v. 6, p. 3585–3593, 2018.

RESÉNDIZ, J. G.; SOTO, K. C. A.; VARGAS, A. R.; RIVERA, H. H.; GUTIÉRREZ, T. C. Integrating Simulation-Based Optimization for Lean Logistics: A Case Study. **Applied Sciences**, v. 8, p. 1–18, 2018.

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

ROBINSON, S.; WORTHINGTON, C.; BURGESS, N.; RADNOR, Z. J. Facilitated modelling with discrete-event simulation: Reality or myth? **European Journal of Operational Research**, v. 234, p. 231–240, 2014.

RODIČ, B. Industry 4.0 and the New Simulation Modelling Paradigm. **Organizacija**, v. 50, p. 193–207, 2017.

RODIČ, B.; KANDUČ, T. Optimisation of a complex manufacturing process using discrete event simulation and a novel heuristic algorithm. **International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences**, v. 9, p. 320–329, 2015.

ROSEN, R.; WICHERT, G. V.; LO, G.; BETTENHAUSEN, K. D. ScienceDirect. **IFAC-PapersOnLine**, v. 48, n. 3, p. 567–572, 2015.

RÜTTIMANN, B. G.; STÖCKLI, M. T. Lean and Industry 4.0 — Twins, Partners, or Contenders? A Due Clarification Regarding the Supposed Clash of Two Production Systems. **Journal of Service Science and Management**, v. 9, p. 485–500, 2016.

SAEZ, M.; MATURANA, F. P.; BARTON, K.; TILBURY, D. M. Real-Time Manufacturing Machine and System Performance Monitoring Using Internet of Things. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, v. 15, n. 4, p. 1735–1748, 2018.

SAFAR, L. et al. Concept of SME Business Model for Industry 4.0 Environment. **TEM Journal**, v. 7, p. 626–637, 2018.

SANDERS, A.; ELANGESWARAN, C.; WULFSBERG, J. Industry 4.0 Implies Lean Manufacturing: Research Activities in Industry 4.0 Function as Enablers for Lean Manufacturing. **Journal of Industrial Engineering and Management**, v. 9, n. 3, p. 811–833, 2016.

SANTOS, E. F.; BENNEWORTH, P. MAKERSPACE FOR SKILLS DEVELOPMENT IN THE INDUSTRY 4.0 ERA. **Brazilian Journal of Operations & Production Management**, v. 16, p. 303–315, 2019.

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

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

SARGENT, R. G.; GOLDSMAN, D. M.; YAACOUB, T. **A tutorial on the operational validation of simulation models**. In: Winter Simulation Conference. **Proceedings...** Washington, D.C.: 2016.

SCHLUSE, M.; ROSSMANN, J. **From Simulation to Experimentable Digital Twins**. In: IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE). **Proceedings...** Scotland: 2016.

SHAFTO, M.; CONROY, M.; DOYLE, R.; GLAESSGEN, E.; KLEMP, C.; JACQUELINE, L.; WANG, L. DRAFT Modeling, Simulation, Information Technology & Processing Roadmap. **Technology Area 11 - National Aeronautics and Space Administration (NASA)**, p. 1–27, 2010.



SHARMA, P. Discrete-Event Simulation. **International Journal of Scientific & Technology Research**, v. 4, n. 4, p. 136–140, 2015.

SHIN, H.; CHO, K.-W.; OH, C. H. SVM-Based Dynamic Reconfiguration CPS for Manufacturing System in Industry 4.0. **Wireless Communications and Mobile Computing**, p. 1–13, 2018.

SIEBERS, P. O.; MACAL, C. M.; GARNETT, J.; BUXTON, D.; PIDD, M. Discrete-event simulation is dead, long live agent-based simulation. **Journal of Simulation**, v. 4, p. 204–210, 2010.

SKOOGH, A.; PERERA, T.; JOHANSSON, B. Simulation Modelling Practice and Theory Input data management in simulation – Industrial practices and future trends. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 29, p. 181–192, 2012.

SONG, L.; ELDIN, N. N. Adaptive real-time tracking and simulation of heavy construction operations for look-ahead scheduling. **Automation in Construction**, v. 27, p. 32–39, 2012.

SONY, M. Industry 4.0 and lean management: a proposed integration model and research propositions. **Production & Manufacturing Research**, v. 6, n. 1, p. 416–432, 2018.

STARK, R.; KIND, S.; NEUMEYER, S. Innovations in digital modelling for next generation manufacturing system design. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 66, p. 169–172, 2017.

SUPORTE MINITAB. Minitab: Versão 18. [s. l.]: **Minitab®**, 2018. Disponível em: <<https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modelingstatistics/anova/supporting-topics/anova-models/does-the-response-need-to-be-normal>>. Acesso em: 01 Jul. 2019.

TAKO, A. A.; ROBINSON, S. M. Model development in discrete-event simulation and system dynamic: an empirical study of expert modellers. **European Journal of Operational Research**, v. 207, p. 784–794, 2010.

TAO, F.; CHENG, J.; QI, Q.; ZHANG, M.; ZHANG, H.; FANGYUAN, S. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 94, p. 3563–3576, 2018.

THIERS, G.; SPROCK, T.; MCGINNIS, L. **Automated Production System Simulations Using Commercial Off-the-shelf Simulation Tools**. In: Winter Simulation Conference. **Proceedings...** Washington, D.C.: 2016.










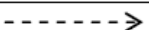
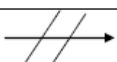


TORTORELLA, G. L.; FETTERMANN, D. Implementation of Industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies. **International Journal of Production Research**, v. 1, p. 1–13, 2017.

TRAPPEY, A. J. C.; TRAPPEY, C. V.; HAREESH, U.; CHUANG, A. C.; SUN, J. J. A review of essential standards and patent landscapes for the Internet of Things: A key enabler for Industry 4.0. **Advanced Engineering Informatics**, v. 33, p. 208–229, 2017.

TRIEBIG, C.; KLÜGL, F. Elements of a documentation framework for agent-based simulation models. **Cibernetics and Systems: an International Journal**, v. 40, p. 441–474, 2009.

- TRIOLA, M. F. **Introdução a Estatística**. 10. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2011.
- TURNER, C. J.; HUTABARAT, W.; OYEKAN, J. Discrete Event Simulation and Virtual Reality Use in Industry: New Opportunities and Future Trends. **IEEE Transactions on Human-Machine Systems**, v. 46, n. 6, p. 882–894, 2016.
- UHLEMANN, T. H.; LEHMANN, C.; STEINHILPER, R. The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0. **Procedia CIRP**, v. 61, p. 335–340, 2017.
- URIARTE, A. G.; NG, A. H.; MORIS, M. U. Supporting the lean journey with simulation and optimization in the context of Industry 4.0. **Procedia Manufacturing**, v. 25, p. 586–593, 2018.
- VACHÁLEK, J.; BARTALSKÝ, L.; ROVNÝ, O.; ŠIŠMIŠOVÁ, D.; MORHÁČ, M.; LOKŠÍK, M. **The Digital Twin of an Industrial Production Line Within the Industry 4.0 Concept**. In: 21st International Conference on Process Control (PC). **Proceedings...** Štrba, Slovakia: 2017.
- VAHDATIKHAKI, F.; HAMMAD, A. Automation in Construction Framework for near real-time simulation of earthmoving projects using location tracking technologies. **Automation in Construction**, v. 42, p. 50–67, 2014.
- VAHDATIKHAKI, F.; HAMMAD, A. Risk-based look-ahead workspace generation for earthwork equipment using near real-time simulation. **Automation in Construction**, v. 58, p. 207–220, 2015.
- WALPOLE, R. E.; MYERS, R. H.; MYERS, S. M.; YE, K. **Probabilidade & Estatística para engenharia e ciências**. 8. ed. São Paulo: Pearson, 2009.
- WAN, J.; CAI, H.; ZHOU, K. **Industrie 4.0: Enabling Technologies**. In: 2015 International Conference on Intelligent Computing and Internet of Things. **Proceedings...** Harbin, China: 2015.
- WANG, S.; WAN, J.; ZHANG, D.; LI, D.; ZHANG, C. Towards smart factory for industry 4.0: a self-organized multi-agent system with big data base d fee dback and coordination. **Computer Networks**, v. 101, p. 158–168, 2016.
- XU, L. DA; XU, E. L.; LI, L. Industry 4.0: state of the art and future trends. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 8, p. 1–22, 2018.
- YIN, Y.; STECKE, K. E.; LI, D. The evolution of production systems from Industry 2.0 through Industry 4.0. **International Journal of Production Research**, v. 56, p. 848–861, 2018.
- ZARRIN, M.; AZADEH, A. Simulation optimization of lean production strategy by considering resilience engineering in a production system with maintenance policies. **Simulation**, v. 93, n. 1, p. 49–68, 2017.
- ZHENG, XI.; JULIEN, C.; CHEN, H.; PODOROZHNY, R.; CASSEZ, FRANCK. Real-Time Simulation Support for Runtime Verification of Cyber-Physical Systems. **ACM Transactions on Embedded Computing Systems**, v. 16, n. 4, p. 106.1-106.24, 2017.
- ZHONG, R. Y.; XU, X.; KLOTZ, E.; NEWMAN, S. T. Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. **Engineering**, v. 3, p. 616–630, 2017.

## ANEXO A – Tabela de símbolos IDEF-SIM

Elementos	Simbologia	Técnica de origem	
Entidade		IDEF3 (modo descrição das transições)	
Funções		IDEF0	
Fluxo da entidade		IDEF0 e IDEF3	
Recursos		IDEF0	
Controles		IDEF0	
Regras para fluxos paralelos e/ou alternativos	 &	Regra E	IDEF3
	 X	Regra OU	
	 O	Regra E/OU	
Movimentação		Fluxograma	
Informação explicativa		IDEF0 e IDEF3	
Fluxo de entrada no sistema modelado			
Ponto final do sistema			
Conexão com outra figura			

Fonte: Leal (2008)