

Universidade Federal do Amazonas
Instituto de Computação
Programa de Pós-Graduação em Informática

Vinícius Da Silva Souza

**Digital Twin: Uma proposta de geração de ambientes virtuais baseado em
comissionamento virtual utilizando motor gráfico Unity3D**

Dissertação de Mestrado

Manaus
2021

Vinícius Da Silva Souza

**Digital Twin: Uma proposta de geração de ambientes virtuais baseado em
comissionamento virtual utilizando motor gráfico Unity3D**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Informática na Universidade Federal do Amazonas, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Informática na área de Ciência da Computação.

Orientador: Vicente Ferreira de Lucena Júnior

Manaus

2021

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

S729d Souza, Vinícius da Silva
Digital twin : uma proposta de geração de ambientes virtuais baseado em comissionamento virtual utilizando motor gráfico Unity3D / Vinícius da Silva Souza . 2021
113 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Vicente Ferreira de Lucena Júnior
Dissertação (Mestrado em Informática) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Digital twin. 2. Sistema ciberfísico. 3. Comissionamento virtual. 4. Ambiente virtual. I. Lucena Júnior, Vicente Ferreira de. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título



PODER EXECUTIVO
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
INSTITUTO DE COMPUTAÇÃO



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

"Digital Twin: Uma proposta de geração de ambientes virtuais baseado em comissionamento virtual utilizando motor gráfico Unity3D"

VINÍCIUS DA SILVA SOUZA

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos

Professores:

Prof. Vicente Ferreira de Lucena Junior - PRESIDENTE

Prof. Eduardo James Pereira Souto - MEMBRO INTERNO

Prof. Florindo Antonio de Carvalho Ayres Júnior - MEMBRO EXTERNO

Manaus, 15 de Outubro de 2021

“Dedico a meus pais, José Edson e Vanja Tereza, meus primeiros e mais dedicados professores”

Agradecimentos

Primeiramente, a minha família por todo amor e compreensão durante esse período turbulento. Aos meus pais, José Edson e Vanja Tereza. À minha esposa e filhos, Andreza, José Neto e Davi. Meus irmãos, Victor e Diego.

Ao meu orientador, professor e amigo, Vicente Lucena, pelo suporte e orientação durante a graduação e mestrado. Não somente na vida acadêmica, mas também pessoal e profissional. Aos professores do PPGI que contribuíram imensamente com a minha carreira profissional e acadêmica, através de conhecimento transferido durante as aulas, seminários e conversas.

À banca avaliadora, pela disposição e oportunidade, para que eu defenda a minha pesquisa. A Capes e PPGI pela oportunidade e suporte financeiro durante a pesquisa e mestrado.

“A ciência serve para nos dar uma ideia de quão extensa é a nossa ignorância”. (Félicité Robert de Lamennais)

Resumo

O Digital Twin é um conceito que se originou em 2010 na engenharia aeroespacial como uma simulação precisa e integrada do sistema de veículos voadores desenvolvido pela NASA. Desde então, esse conceito se espalhou para diversas áreas do conhecimento, especialmente no setor industrial e nos processos de fabricação fortemente ligados a conceitos da Indústria 4.0.

Atualmente, Digital Twin utiliza diversas técnicas e ferramentas aplicadas em modelagem de sistemas, aprendizagem de máquina, análise de dados, simulação em ambientes virtuais, sistemas ciberfísicos, entre outras. Isso tornou recorrente o debate sobre a definição do Digital Twin, em especial, sobre a falta de padronização do conceito e quais os métodos necessários para virtualização dos processos físicos.

Para propor uma forma de virtualização dos processos de manufatura, utilizamos neste trabalho comissionamento virtual como técnica para atingir esse fim. O comissionamento virtual permite a verificação completa de um sistema de fabricação, realizando uma simulação envolvendo uma planta virtual e um controlador real. E para gerar a planta virtual, utilizamos um motor gráfico de jogos como a ferramenta geradora de um ambiente virtual, possibilitando simulações e espelhamento de um controlador físico.

Em resumo, este trabalho propõe um método de virtualização baseado em comissionamento virtual de processos físicos para desenvolver um Digital Twin. Utilizando software de motor gráfico para gerar um ambiente virtual tridimensional como representação digital. De modo a gerar um conjunto de métodos e práticas para criar um Digital Twin a partir de um sistema de manufatura de legado.

Palavras-chave: Digital Twin, sistemas ciberfísicos, comissionamento virtual, ambiente virtual, motor gráfico

Abstract

Digital Twin is a concept that originated in 2010 in aerospace engineering as an accurate and integrated simulation of the flying vehicle system developed by NASA. Since then, this concept has spread to various areas of knowledge, especially in the industrial sector and manufacturing processes strongly linked to Industry 4.0 concepts.

Currently, Digital Twin uses techniques and tools applied in systems modeling, machine learning, data analysis, simulation in virtual environments, cyberphysical systems, among others. And for this reason, there is a frequent debate on the definition of Digital Twin, especially on the lack of standardization of the concept and methods needed for virtualization of physical processes.

For virtualization of manufacturing processes, we apply in this work the virtual commissioning as a technique to achieve this goal. The virtual commissioning allows to verify the manufacturing system by performing a simulation involving a virtual plant and a real controller. And to generate the virtual plant, we use a graphic game engine as the virtual environment generating tool, enabling simulations, and mirroring a physical controller.

In summary, this work proposes a virtualization method based on virtual commissioning of physical processes to develop a Digital Twin. Using graphic engine software to generate a three-dimensional virtual environment as a digital representation. To generate a set of methods and practices to create a digital twin from a legacy manufacturing system.

Keywords: Digital Twin, Cyberphysical Systems, Virtual Commissioning, virtual environment, graphic engine

Sumário

Capítulo 1 - Introdução	12
1.1 Motivação.....	13
1.2 Conceitos Introdutórios.....	14
1.2.1 Digital Model, Digital Shadow e Digital Twin	15
1.2.2 Comissionamento Virtual	16
1.2.3 Sistemas ciberfísicos.....	18
1.3 Definição do problema.....	20
1.4 Objetivo da pesquisa	21
1.4.1 Objetivo específico.....	21
1.5 Organização do trabalho.....	21
Capítulo 2 - Mapeamento sistemático sobre Digital Twin em sistemas de manufatura	23
2.1 Questão da pesquisa	23
2.2 Escopo da pesquisa.....	24
2.2.1 Termos usados na pesquisa.....	24
2.3 Critério de seleção	26
2.4 Publicações selecionadas	27
2.5 Estratégia de extração de dados	28
2.6 Resultados levantados	32
2.6.1. Método de virtualização	34
2.6.2. Propósito do Digital Twin	34
2.6.3. Protocolos de comunicação e conjunto de dados	35
2.6.4. Representação digital	36
2.6.5. Tipos de simulação.....	37
2.6.6. Vantagem em implantar um Digital Twin e análise comparativa	37
2.7 Considerações finais.....	38
Capítulo 3 - Trabalhos relacionados	40
3.1 Virtualização e simulação para sistemas de manufatura.....	40
3.2 Digital Twin Experimentável	42
3.3 Framework de Aplicação para Digital Twin	43
3.4 Abordagem de design e otimização multiobjetivo baseado em Digital Twin	45
3.5 Considerações finais.....	46
Capítulo 4 - Metodologia	48
4.1. Modelagem.....	49
4.1.1. Modelagem dos dispositivos	50
4.1.2. Modelagem do comportamento	50

4.2.	Simulação	52
4.3.	Virtualização	55
4.4.	Integração	57
4.5.	Considerações finais	59
Capítulo 5 - Experimentos e resultados		62
5.1.	Planta física e planejamento de produção	62
5.2.	Modelagem dos dispositivos lógicos	65
5.3.	Simulação	71
5.4.	Virtualização	75
5.5.	Integração	79
5.6.	Resultados	82
5.7.	Digital Twin no contexto de sistema ciberfísico	82
5.8.	Resultados das simulações em ambiente virtual.....	84
5.9.	Meta-análise comparativa de Digital Twins.....	87
5.10.	Considerações finais	91
Capítulo 6 - Conclusão e trabalhos futuros		93
6.1.	Trabalhos futuros	95
Referências		96
APÊNDICE A – Classificação das publicações de estudo primário e secundário		104
APÊNDICE B – Fluxograma de execução do sistema de manufatura experimental		107
APÊNDICE C – Diagrama Ladder para controlador do robô cartesiano		108
APÊNDICE D – Trabalhos usados na meta-análise comparativa		113

Lista de ilustrações

Figura 1.1 — Diferenças entre Digital Model, Digital Shadow e Digital Twin.....	16
Figura 1.2 — Categorias de comissionamento.....	18
Figura 1.3 — Relação entre sistemas ciberfísicos e Digital Twin.....	19
Figura 2.1 — Publicações selecionadas da Scopus.....	27
Figura 3.1 – Procedimento para comissionamento virtual	41
Figura 3.2 – Estrutura básica de Digital Twin Experimental	42
Figura 3.3 – Framework de aplicação do Digital Twin	44
Figura 3.4 – Abordagem de design individualizado rápida e iterativa digital baseada em gêmeos	46
Figura 4.1 — Metodologia proposta para Digital Twin	50
Figura 4.2 — Mapeamento de símbolo de entrada / saída entre um programa de controle e um modelo DEVS lógico.	54
Figura 4.3 — Modelo de virtualização baseado em EDT	55
Figura 4.4 — Processo de virtualização de processos de manufatura proposto	58
Figura 4.5 — EDT com integração ao controlador físico	60
Figura 4.6 — Metodologia proposta	61
Figura 5.1 — Planta baixa da célula de manufatura	65
Figura 5.2 — Modelo de DEVS: Esteira transportadora de latas	68
Figura 5.3 — Modelo de DEVS: Robô cartesiano.....	70
Figura 5.4 — Modelo de DEVS: Esteira transportadora de caixas.....	72
Figura 5.5 — Modelo de DEVS: Braço robótico.....	73
Figura 5.6 — EDT dos dispositivos virtuais	77
Figura 5.7 — Modelo dos dispositivos físicos	78
Figura 5.8 — Ambiente virtual no Unity3D.....	79
Figura 5.9 — Virtualização dos dispositivos físicos.....	80
Figura 5.10 — Algoritmos do controlador físico e variáveis compartilhadas.....	81
Figura 5.11 — Rede simulada para conexão do modelo virtual e física.....	82
Figura 5.12 – Espelhamento síncrono do Digital Twin com controlador físico.....	83
Figura 5.13 — Digital Twin do sistema de manufatura.....	87
Figura 5.14 – Possibilidade de configuração para planta de manufatura.....	88
Figura 5.15 – Planta simulada em série	89
Figura 5.16 — Variação de produção por ajuste de parâmetros.....	90
Figura 5.17 – Processo completo de manufatura executado em ambiente virtual ...	94

Lista de tabelas

Tabela 1.1 — Definição de Digital Twin ao longo do tempo	13
Tabela 2.1 — Subquestões da pesquisa	24
Tabela 2.2 — Termo de busca no Scopus	25
Tabela 2.3 — Critérios de inclusão e exclusão	26
Tabela 2.4 — Classificação das publicações selecionadas por subquestão	32
Tabela 4.1 — Formalismo de DEVS	53
Tabela 5.1 — Portas de entradas e saída do controlador físico	66
Tabela 5.2 — Scripts da planta simulada para a esteira transportadora de latas ...	74
Tabela 5.3 — Scripts da planta simulada para o robô cartesiano	75
Tabela 5.4 — Scripts da planta simulada para a esteira transportadora de caixas .	76
Tabela 5.5 — Scripts da planta simulada para o braço robótico.....	76
Tabela 5.6 — Meta-análise dos Digital Twins	91

Siglas e abreviações

NASA – National Aeronautics and Space Administration

CPS – Cyber Physical System

CAD – Computer-Aided Design

SQ – Subquestão

MBSE – Modelo Baseado em Sistemas de Engenharia

SGBD – Sistema Gerenciador de Banco de Dados

EDT – Experimentable Digital Twin

DEVS – Discrete Event Systems Specifications

CLP – Controlador Lógico Programável

API – Application Programming Interface

XML – eXtensible Markup Language

E/S – Entradas e Saídas

TIA – Totally Integrated Automation

SED – Sistema de Eventos Discretos

TCP/IP – Transmission Control Protocol / Internet Protocol

MQTT – Message Queue Telemetry Transport

OPC UA – Open Platform Communications Unified Architecture

IIoT – Industrial Internet of Things

Capítulo 1 - Introdução

O primeiro conceito de Digital Twin em processos de manufatura foi concebido por Michael Grieves em 2003 (GRIEVES, 2011), na sua apresentação sobre “Gerenciamento do Ciclo de Vida do Produto” na universidade de Michigan. Ele descreve um modelo de Digital Twin para um ciclo de vida do produto constituído de três partes. A parte física no espaço real, a parte cibernética no espaço virtual e uma conexão de dados entre os dois espaços. No entanto, a proposta de Grieves carece de detalhes sobre as especificações, ferramentas e métodos que demonstrem o processo de desenvolvimento de um Digital Twin, atendo-se somente ao conceito proposto (TAO et al., 2019).

Desde então, as tecnologias de computação, comunicação e informática tiveram um avanço exponencial contribuindo para a evolução do Digital Twin. Em 2010, o conceito foi revisitado pela NASA, onde foi proposto a primeira definição amplamente aceita sobre do termo Digital Twin (NEGRI; FUMAGALLI; MACCHI, 2017). Descrita no documento “NASA Modeling, Simulation, Information Technology & Processing Roadmap” que afirma:

“Uma simulação probabilística, multifísica e multiescala integrada de um veículo ou sistema que usa os melhores modelos físicos disponíveis, atualizações de sensores, histórico de frota etc., para espelhar a vida de seu gêmeo voador. É ultrarrealista e pode considerar um ou mais sistemas de veículos importantes e interdependentes” (SHAFTO et al., 2010)

Com o avanço nas áreas de aprendizagem de máquina, comunicação sem fio, computação na nuvem e outras tecnologias que circundam sistemas ciberfísicos e Indústria 4.0, também aumentou o número de pesquisas sobre o tema. Surgindo assim diversas definições para o Digital Twin ao longo do tempo (LIU et al., 2017; NEGRI; FUMAGALLI; MACCHI, 2017), como as citadas cronologicamente na tabela 1.1:

Tabela 1.1 – Definição de Digital Twin ao longo do tempo.

Ano	Definição de Digital Twin
2013	Modelo acoplado da máquina real que opera na plataforma de nuvem e simula a condição de saúde com um conhecimento integrado dos algoritmos analíticos orientados a dados e de outros conhecimentos físicos disponíveis. (LEE et al., 2013)
2016	Substitutos virtuais de objetos do mundo real que consistem em representações virtuais e recursos de comunicação que compõem objetos inteligentes que atuam como nós inteligentes na Internet de coisas e serviços. (SCHLUSE; ROSSMANN, 2016)
2017	Uma representação virtual de um sistema de produção capaz de executar diferentes simulações, caracterizada pela sincronização entre o sistema virtual e o real. Através de dados detectados e dispositivos inteligentes conectados, modelos matemáticos e elaboração de dados em tempo real. (NEGRI; FUMAGALLI; MACCHI, 2017)
2020	O Digital Twin pode ser definido como uma representação virtual de um ativo físico ativado por meio de dados e simuladores para previsão, otimização, monitoramento, controle e tomada de decisão em tempo real. (RASHEED; SAN; KVAMSDAL, 2020)

Atualmente, o Digital Twin evoluiu para um conceito mais amplo que se refere a uma representação virtual de elementos de fabricação, como pessoas, produtos, ativos e definições de processos. Juntamente a um modelo virtual que atualiza e muda continuamente de maneira síncrona à medida que a contraparte física muda para representar mudança de estados, condições de trabalho e geometria de produtos. A representação digital fornece os elementos e a dinâmica de como um objeto físico opera e vive ao longo de seu ciclo de vida.

1.1 Motivação

Embora haja diversas abordagens para o tema Digital Twin, uma definição geral do conceito e suas principais características ainda não são de comum acordo entre pesquisadores. Considerando sua estreita ligação com questões de gerenciamento de produção, torna-se importante entender quais são os principais recursos das aplicações de Digital Twin e compará-los com o que é abordado na literatura científica. Para então, definir o que caracteriza um Digital Twin e quais as questões devem ser investigadas. Segundo Lu et al (2019), dentre as principais dificuldades em abordar o tema estão, primeiro, compreensão inadequada da

conotação de manufatura inteligente orientada ao Digital Twin, que atualmente foca em manutenção e operação de produtos; segundo, a falta de modelos de referência para o Digital Twin; e terceiro, resultados superficiais de questões de pesquisa e avanços no Digital Twin, com resultados majoritariamente mostrando exemplos de aplicações em cenários específicos.

Além disso, uma questão crítica é como construir um modelo de Digital Twin viável. Segundo Tao et al (2019), muitos trabalhos reconheceram a importância da modelagem de Digital Twin. No entanto, não há consenso sobre como construir um modelo digital de maneira genérica. Dessa forma, fica claro que uma estrutura de modelagem de Digital Twin unificada é necessária. Sendo igualmente importante desenvolver mais ferramentas de modelagem para o Digital Twin. E que, portanto, a modelagem do Digital Twin é uma direção promissora da pesquisa e aplicação para o tema.

Para reduzir as lacunas apresentadas como principais dificuldades ao abordar o tema, este trabalho visa investigar formas de viabilizar um modelo de Digital Twin através da virtualização de sistemas de manufatura. Utilizando ferramentas e métodos de modelagem e simulação apresentados na literatura de forma dispersa e as organiza em uma metodologia para desenvolver um Digital Twin que represente de forma adequada um sistema de manufatura.

1.2 Conceitos Introdutórios

Conforme novas pesquisas foram realizadas acerca do tema Digital Twin, o conceito foi se afastando da sua origem na engenharia aeroespacial de construção de réplicas digitais para aeronaves, para adentrar em tópicos relacionados à manufatura inteligente. Atualmente considerada uma das tecnologias mais promissoras para a implementação das novas estratégias nacionais de manufatura avançada. Tais como Indústria 4.0, Internet Industrial e Made in China 2025, sendo correlacionado juntamente com outras tecnologias habilitadoras da manufatura inteligente, como Internet das Coisas e sistemas ciberfísicos (NEGRI; FUMAGALLI; MACCHI, 2017).

Desse modo, é importante introduzir alguns conceitos que estão relacionados com o tema a fim de possuir um panorama acerca das tecnologias que o envolve. Primeiramente, entender o que distingue o Digital Twin de outras formas de modelagem digital como Digital Model e Digital Shadow. Depois, como utilizar de

Comissionamento Virtual para virtualizar processos de manufatura para sistemas digitais. Por fim, explorar a relação entre a pesquisa e desenvolvimento de sistemas ciberfísicos e Digital Twins.

1.2.1 Digital Model, Digital Shadow e Digital Twin

O Digital Twin, para sistemas de manufatura, trata-se de uma cópia virtual de um sistema capaz de interagir com a sua contraparte física trocando informação de forma bidirecional. Caracterizado por uma profunda integração dos espaços físico e cibernético. Com isso, ele pode garantir serviços que prestam suporte para atividades de manufatura tais como monitoramento, manutenção, gerenciamento, otimização e segurança. Um aspecto central do Digital Twin é a capacidade de fornecer informações diferentes em um formato consistente. Os Digital Twins são mais que apenas dados puros, eles incluem algoritmos, que descrevem suas contrapartes reais e decidem sobre a ação no sistema de produção com base nesses dados processados (BOSCHERT; ROSEN, 2016).

No entanto, essa descrição torna a definição de Digital Twin muito ampla. De formas que representações digitais como simulações de eventos discretos ou modelagem digital comumente são classificadas como Digital Twin em muitos trabalhos. Já que algumas representações digitais são modeladas manualmente e não estão conectadas a nenhum objeto físico existente, enquanto outras são totalmente integradas à troca de dados em tempo real. Para isso, Kritzinger et al (2018) propõem um processo de classificação de réplicas digitais em três subcategorias, de acordo com seu nível de integração de dados entre a contraparte física e a digital: Digital Model, Digital Shadow e Digital Twin.

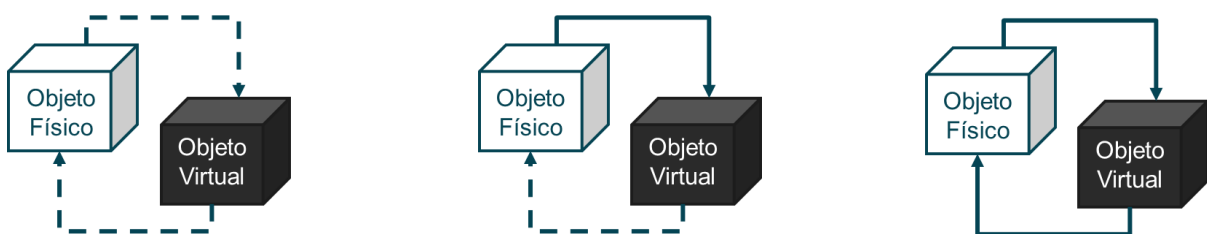
Um Digital Model é uma representação digital de um objeto físico existente ou planejado, que não usa nenhuma forma de troca automatizada de dados entre o objeto físico e o objeto digital. Os dados digitais dos sistemas físicos existentes ainda podem estar em uso para o desenvolvimento de tais modelos, mas todas as trocas de dados são feitas de maneira manual. Uma mudança no estado do objeto físico não afeta diretamente o objeto digital e vice-versa.

Com base na definição de um Digital Model, se existir um fluxo de dados unidirecional automatizado do estado de um objeto físico existente para um objeto digital, pode-se referir tal representação como Digital Shadow. Uma mudança no

estado do objeto físico leva a uma mudança de estado no objeto digital, mas não o oposto.

Se os fluxos de dados entre um objeto físico e um objeto digital forem totalmente integrados nas duas direções, pode-se referir a ele como Digital Twin. Nessa combinação, o objeto digital também pode atuar como instância de controle do objeto físico. Também pode haver outros objetos, físicos ou digitais, que induzam mudanças de estado no objeto digital. Uma mudança no estado do objeto físico leva diretamente a uma mudança no estado do objeto digital e vice-versa.

Figura 1.1 – Diferenças entre Digital Model, Digital Shadow e Digital Twin.



Adaptação de Werner Kritzinger et al. (2018)

1.2.2 Comissionamento Virtual

O comissionamento virtual é a prática de usar tecnologia de simulação “virtual” para “comissionar” - projetar, instalar ou testar - o software de controle com um modelo de máquina virtual antes de conectá-lo ao sistema real (HOFFMANN et al., 2010). As sequências de processo são simuladas gerando um modelo virtual do sistema de produção e conectando-o à tecnologia de controle correspondente. Também se refere à visualização, programação e validação de um sistema de produção em um ambiente virtual. O uso do Comissionamento Virtual para validação demonstra ser benéfico tanto para atividades gerais, como monitoramento de fluxo de material, quanto atividades específicas, como validação de código PLC (PARK; KO; CHANG, 2013).

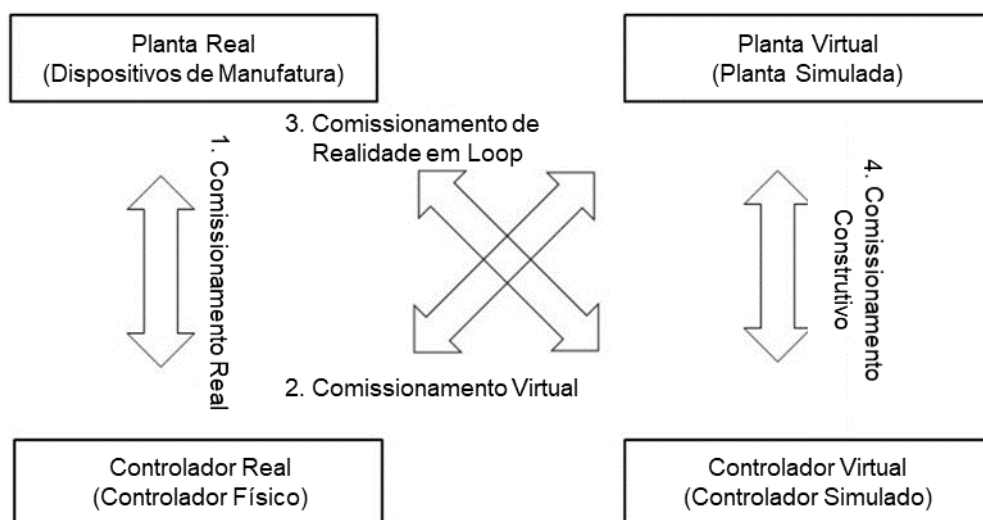
Outra vantagem de executar o Comissionamento Virtual é que ele permite uma maneira segura de testar a integração de novas tecnologias e software com o sistema de produção virtual, uma vez que não há risco de destruição física no modelo virtual (BATHELT; MEILE, 2007; DRATH; WEBER; MAUSER, 2008). O comissionamento

virtual permite a verificação completa de um sistema de fabricação, realizando uma simulação envolvendo uma planta virtual e um controlador real. Isso requer que o modelo virtual da planta seja totalmente descrito no nível de sensores e atuadores.

Segundo Lee e Park (LEE; PARK, 2014), existem quatro configurações possíveis para o comissionamento, como ilustrado da figura 1.2 : (1) comissionamento real envolvendo uma planta real e um controlador real; (2) comissionamento virtual (comissionamento de hardware em loop) envolvendo uma planta virtual e um controlador real; (3) comissionamento de realidade em loop envolvendo uma planta real e um controlador virtual; e (4) comissionamento construtivo envolvendo uma planta virtual de um controlador virtual.

O aspecto mais desafiador no desenvolvimento de um Digital Twin, no ponto de vista de Comissionamento Virtual, é o fato dele possuir todas as configurações descritas por Lee. A configuração 1 descreve a contraparte física, planta física e controlador físico. Configuração 2, determina que as atuações e dados que chegam no controlador físico devem refletir na planta virtual, como ocorre na física. Na configuração 3 as mudanças executadas no controlador virtual devem refletir na planta física. Na configuração 4, as mudanças que ocorrem no controlador virtual devem refletir na planta virtual.

Figura 1.2 – Categorias de comissionamento.

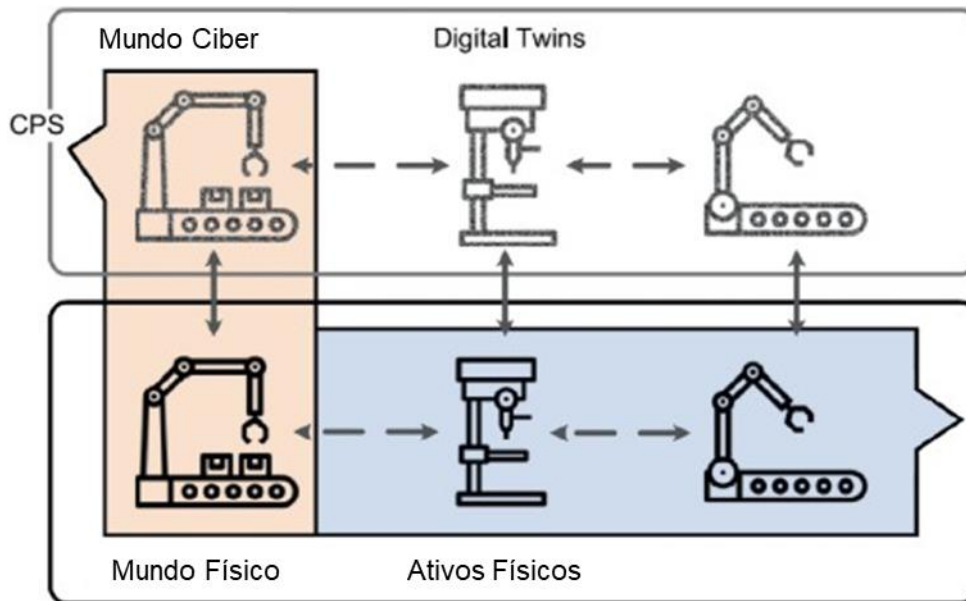


Adaptação de Lee and Park (2014)

1.2.3 Sistemas ciberfísicos

Um sistema ciberfísico é constituído de subsistemas heterogêneos que apresentam uma forte combinação e coordenação entre si. Por meio de uma integração orgânica e colaboração profunda em termos de computação, comunicação e controle. Podendo realizar a detecção em tempo real de mudança de estado, controle dinâmico dos processos e utilizar serviços de diferentes sistemas distribuídos em diferentes âmbitos geográficos (LIU et al., 2017).

A essência do sistema ciberfísico é adicionar novos recursos aos sistemas físicos usando computação e comunicação, que interagem intensamente com os processos físicos (WANG; TÖRNGREN; ONORI, 2015). Comparado aos Digital Twins, o sistema ciberfísico enfatiza fortemente o uso dos recursos de computação e comunicação do mundo cibernético, que podem melhorar a precisão e a eficiência do mundo físico. Explorando metodologias e arquiteturas que incorporem tecnologia dessas áreas, como a arquitetura de três camadas (LA; KIM, 2010), de cinco camadas (ZHU; RIEGER; BASAR, 2011) ou orientada a serviços (DILLON et al., 2011). Como nos Digital Twins, a retroalimentação é um aspecto importante nos sistemas ciberfísicos para mapeamento mútuo, interação em tempo real e colaboração eficiente entre os mundos cibernético e físico. No entanto, o sistema computacional pode afetar mais de um objeto físico, podendo incluir vários componentes físicos. Portanto, o relacionamento de mapeamento entre os mundos cibernético e físico não é um para um, mas uma correspondência de um para muitos.

Figura 1.3 – Relação entre sistemas ciberfísicos e Digital Twin.

Adaptação de Bagheri & Lee (2015)

A forma de comunicação frequentemente aplicada em sistemas ciberfísicos é descentralizada e heterogênea (LI; XU; ZHAO, 2015). Assim, as informações digitalizadas podem ser usadas para ajustar os padrões de produção, com o uso de uma cópia virtual do mundo físico e dados dos sensores para atender diferentes objetivos (BORTOLINI et al., 2017). Para um Digital Twin em ambientes industriais, é necessária disponibilidade de dados em tempo real e alta confiabilidade nas conexões, aprimorando o processo e valor agregado com monitoramento, análise e otimização adicionais. Neste aspecto, uma comunicação descentralizada e distribuída permite que objetos individualmente identificáveis troquem informação dentro de um conjunto de interações independentes. Outro aspecto importante sobre sistemas ciberfísicos, como ilustrado na figura 1.3, é a sua relação com o Digital Twin. Um Digital Twin é limitado ao modelo digital, portanto o Digital Twin não pode existir sem espelhar os processos e objetos do espaço físico. Em outras palavras, um Digital Twin representa um pré-requisito para o desenvolvimento de um sistema ciberfísico (UHLEMANN; LEHMANN; STEINHILPER, 2017).

1.3 Definição do problema

Segundo Lu et al (2019), existem muitas questões que necessitam de discussão e padronização para o desenvolvimento de Digital Twins. Dentre os tópicos, estão a padronização de métodos e ferramentas para o Digital Twin e a definição das funcionalidades do Digital Twin que os diferenciam de outras tecnologias.

Em padronização de métodos e ferramentas para Digital Twin, alguns autores apresentam em seus trabalhos ((CIMINO; NEGRI; FUMAGALLI, 2019); (DAMJANOVIC; BEHRENDT, 2019); (LU et al., 2019a)) análises e comparações entre Digital Twins e as diversas tecnologias usadas para comunicação, manipulação de dados, representação virtual e simulação para definir aspectos comuns entre os Digital Twins analisados. No entanto, são poucos os trabalhos analisados que se propõem a levantar padrões e métodos com a finalidade de facilitar a longevidade de uma solução de Digital Twin.

Em relação a definição das funcionalidades do Digital Twin, apesar de a definição de Digital Twin convergir para uma contraparte digital que representa e atua na contraparte física, e vice-versa. Uma característica divergente dos Digital Twins analisados são quais serviços eles disponibilizam. Lu et al (2019) apontam que grande parte dos Digital Twins existentes são desenvolvidos para fins de monitoramento e previsão de resultados, usados como aplicativos de apoio à tomada de decisão para humanos. Dessa forma, funcionalidades importantes como controle do sistema físico por meio do modelo digital e espelhamentos das mudanças na contraparte física e digital não são exploradas em parte dos trabalhos.

O método de desenvolvimento de Digital Twin neste trabalho é uma proposta para o problema de padronização de métodos para desenvolvimento de um Digital Twin e quais finalidades o Digital Twin deve atender. Apresentando um modelo de desenvolvimento de Digital Twin que não delimite o uso de tecnologias, enfatizando em métodos e ferramentas para virtualização do processo de manufatura e quais funcionalidades devem apresentar para ser categorizado com um Digital Twin.

1.4 Objetivo da pesquisa

O objetivo principal desta pesquisa é desenvolver um método a partir de conceitos explorados em comissionamento virtual e sistemas ciberfísicos para gerar um Digital Twin. Para gerar uma representação digital de um sistema de manufatura.

1.4.1 Objetivo específico

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Desenvolver uma metodologia para virtualizar processo de manufatura a partir da planta física.
- Desenvolver um Digital Twin capaz de simular diferentes cenários para validação do modelo.
- Gerar um modelo digital tridimensional replicável para sistemas de manufatura através de motor gráfico.
- Desenvolver um Digital Twin capaz de integrar-se a um controlador virtual.

1.5 Organização do trabalho

Os próximos capítulos estão organizados da seguinte forma. O capítulo 2 apresenta a metodologia utilizada para realizar o mapeamento sistemático a respeito do tema Digital Twin. O foco desse capítulo é determinar quais práticas, técnicas e ferramentas são frequentemente abordadas nesses trabalhos e avaliar os resultados que esses trabalhos apresentam.

No capítulo 3 são apresentados os trabalhos relacionados a pesquisa das metodologias usadas para compor a proposta deste trabalho. O objetivo é selecionar quais trabalhos melhor incorporam os resultados positivos avaliados no capítulo 2 e extrair os métodos que serão usados para compor o método proposto.

No capítulo 4 será descrita a proposta deste trabalho para o método de virtualização para gerar um Digital Twin. Descrevendo de forma detalhada todas as etapas do processo para atingir esse objetivo, referenciando quais trabalhos compõe essa proposta.

No capítulo 5 descrevemos a proposta de desenvolvimento de um Digital Twin aplicando o método proposto e os resultados obtidos. Por meio de um ambiente virtual tridimensional gerado por um motor gráfico, onde seja possível gerar simulações e que ao conectar com controlador físico realize o espelhamento das operações. A partir desse desenvolvimento e os compara com resultados relatados em outras literaturas. Para determinar quais resultados foram satisfatórios e quais precisam de melhoria comparados a outros trabalhos.

No capítulo 6 é feita as considerações finais do trabalho relatando os principais aspectos da metodologia proposta. Apresentando trabalhos futuros, onde as dificuldades apresentadas neste trabalho possam ser exploradas.

Capítulo 2 - Mapeamento sistemático sobre Digital Twin em sistemas de manufatura

Segundo Kitchenham e Chartes (2007), uma revisão sistemática da literatura é uma “maneira de identificar, avaliar e interpretar todas as perguntas relevantes sobre uma questão de pesquisa específica, um assunto de uma área específica ou um fenômeno de interesse”. Uma revisão sistemática da literatura possui uma metodologia rigorosa e bem definida, que permite obter resultados com menos viés e informação ampla sobre métodos experimentais analisados.

O mapeamento sistemático é uma forma menos rigorosa de revisão sistemática, trata-se de uma ampla revisão de estudos primários em um tópico específico da pesquisa que busca identificar quais evidências ou lacunas estão presentes no tópico. Sendo assim, o objetivo do mapeamento sistemático contido neste trabalho é obter um panorama sobre as evidências e lacunas sobre os processos e métodos de virtualização para o desenvolvimento de Digital Twins para sistemas de manufatura. Este capítulo apresentará a metodologia usada para realizar o mapeamento sistemático, uma discussão dos resultados encontrados e um resumo das técnicas e ferramentas propostas nos estudos primários para virtualizar processos de manufatura.

2.1 Questão da pesquisa

Esse mapeamento sistemático teve como objetivo responder à seguinte questão da pesquisa: **“Que metodologias, técnicas e ferramentas são aplicadas para desenvolvimento de uma representação virtual (Digital Twin) em sistemas de manufatura?”**. Além dessa pergunta de pesquisa, as subquestões seguintes tem como objetivo dar suporte e detalhar tópicos relevantes sobre a questão da pesquisa abordada.

Tabela 2.1 – Subquestões da pesquisa.

#	Subquestão
SQ1	Quais os principais métodos e técnicas para virtualização abordados no trabalho?
SQ2	Qual a finalidade que o Digital Twin proposto no trabalho atende?
SQ3	Como é feita a conexão de dados entre a contraparte física e a virtual?
SQ4	Qual modelo é usado para representação digital?
SQ5	No Digital Twin proposto possui simulação? Qual tipo?
SQ6	Os resultados e observações obtidos representam alguma vantagem comparada a um sistema sem Digital Twin? Se sim, quais?
SQ7	Existe algum estudo comparativo com outros Digital Twins no trabalho?

2.2 Escopo da pesquisa

O mapeamento sistemático usou como base de dados a meta-biblioteca digital Scopus, nela estão indexadas publicações das principais editoras da área de engenharia e ciência da computação, como IEEE, ACM, Elsevier e Springer. Seus mecanismos de busca permitem selecionar documentos a partir de um conjunto de filtros para inclusão e exclusão de diversos critérios como tipo de publicação, tópicos de pesquisa, ano da publicação, palavras-chave etc. Outro ponto importante a considerar, é o fato das publicações mais relevantes sobre o tema usado no mapeamento são todas escritas em língua inglesa, visto que é o idioma majoritariamente usado em publicações de conferências e periódicos.

2.2.1 Termos usados na pesquisa

Para definir os termos da pesquisa, utilizamos o procedimento descrito por Kitchenham e Charters (2007), que sugere determinar parâmetros de população, intervenção, comparação, resultados e contexto a fim de definir um escopo com o qual deseja-se trabalhar. Para esta pesquisa, temos:

- População: sistemas de manufatura e produção industrial em série.
- Intervenção: metodologia, tecnologias, ferramentas e processos de desenvolvimento de um Digital Twin.
- Comparação: não se aplica, pois estão sendo analisados as características das técnicas e metodologia, e não um resultado a partir de práticas distintas.
- Resultados: avaliação das vantagens e desvantagens da implantação aplicada no contexto dos trabalhos analisados.
- Contexto: meta-análise a partir dos resultados obtidos nos trabalhos analisados.

Os termos de buscas são delimitados a partir da seguinte congruência. “Digital Twin” é o termo que obrigatoriamente deve ser fazer presente em todas as publicações por se tratar do tema principal do mapeamento sistemático, não sendo confundido com aplicações de simulação e virtualização que possuem alguma similaridade com este conceito. Os termos “industry”, “manufacturing” e “production” são termos presentes na pesquisa, pois, o mapeamento sistemático tem como população do trabalho os sistemas de manufatura e sistemas industriais. Outros termos importantes a serem buscados nas publicações são referentes as ferramentas, técnicas de simulação e virtualização, arquiteturas e metodologias aplicados para o desenvolvimento do Digital Twin. Por isso os termos “virtual commissioning”, “virtual”, “virtualization”, “digitalization”, “architecture”, “technique”, “methodology, e “tool” estão presentes. Por fim, os termos são delimitados na área de engenharias e computação que são as áreas de interesse da pesquisa. Desta forma a tabela abaixo descreve o arranjo dos termos para busca dos trabalhos no Scopus para o mapeamento sistemático.

Tabela 2.2 – Termo de busca no Scopus.

TITLE-ABS-KEY (((“digital twin” AND industry) OR (“digital twin” AND manufacturing) OR (“digital twin” AND production)) AND ((“digital twin” AND virtual) OR (“digital twin” AND “virtual commissioning”) OR (“digital twin” AND virtualization) OR (“digital twin” AND digitalization) OR (“digital twin” AND architecture) OR (“digital twin” AND technique) OR (“digital twin” AND methodology) OR (“digital twin” AND tool))) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, “ENGI”) OR LIMIT-TO (SUBJAREA , “COMP”))

2.3 Critério de seleção

Os critérios de seleção de estudos têm como objetivo identificar os estudos primários que fornecem evidências diretas sobre a questão da pesquisa. Os critérios de inclusão e exclusão baseiam-se em aspectos chaves para auxiliar no processo de seleção de publicações. Tais como, excluir publicações que não possui Digital Twin como tema central do trabalho, ou não é aplicado para sistemas de manufatura e industriais. Priorizando os trabalhos que foquem no processo de modelagem, desenvolvimento e testes de Digital Twins.

Primeiramente foram aplicados os critérios de inclusão e exclusão durante a leitura o título e abstract das publicações. Das publicações aprovadas, os critérios foram novamente aplicados durante a leitura de todo o trabalho. Na tabela abaixo, são descritos os critérios de inclusão e exclusão no processo de seleção das publicações.

Tabela 2.3 – Critérios de inclusão e exclusão.

#	Critério de inclusão
IN1	Digital Twin é o tema principal do trabalho.
IN2	O modelo de Digital Twin proposto no estudo primário segue a classificação de Kritzinger.
#	Critério de exclusão
EX1	O Digital Twin proposto é para aplicações fora do setor industrial e de manufatura.
EX2	Publicação que não apresenta um protótipo ou conclusão do modelo proposto.
EX3	Publicação onde o modelo proposto não apresenta de forma clara as ferramentas, técnicas, metodologias e arquiteturas adotadas.
EX4	Publicação que não esteja escrita em língua inglesa.
EX5	Publicação duplicada.

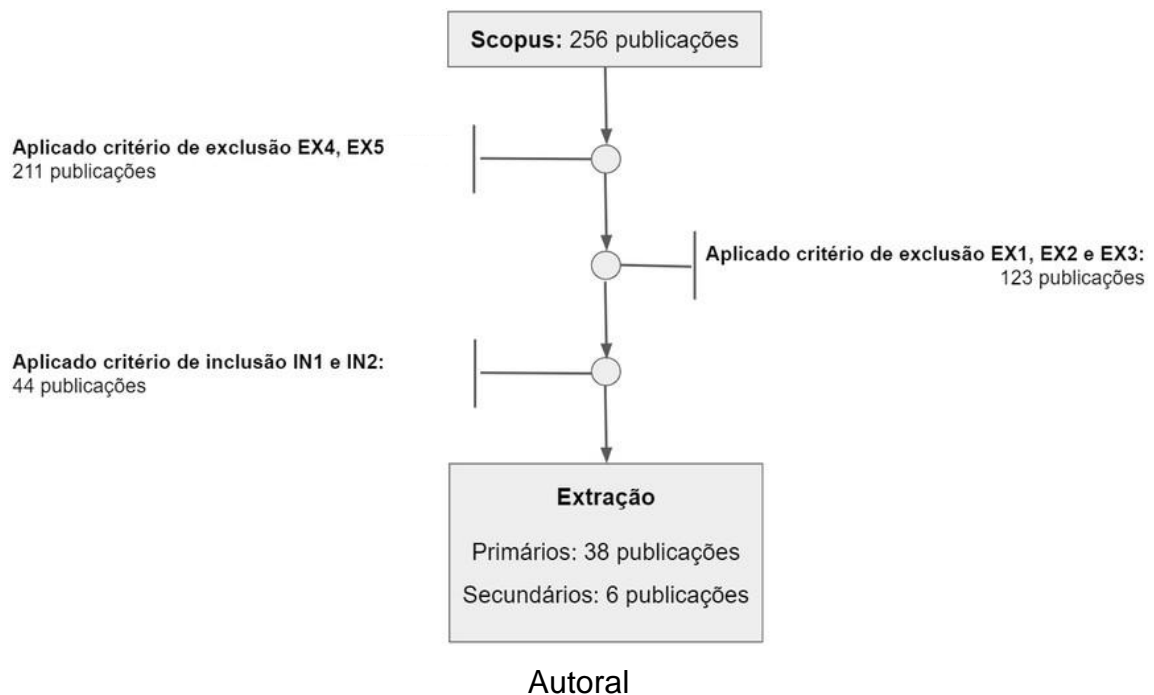
No entanto, algumas considerações são necessárias quanto aos critérios descritos. No critério IN2 foi adotado a definição de Kritzinger et al (2018), pois a partir dela permitimos diferenciar representações que são categorizadas como

simulações e virtualização do Digital Twin. Os critérios EX1, EX2 e EX3 são necessários para analisar e avaliar o processo de desenvolvimento e desempenho do Digital Twin dado o contexto do trabalho. Demais critérios de exclusão, são devido às limitações práticas desta pesquisa.

2.4 Publicações selecionadas

Conforme exibido na figura 2.1 foram selecionados um total de 256 publicações entre publicações em periódicos e apresentadas em eventos científicos. No primeiro filtro, foram excluídos os trabalhos que não foram possíveis de extrair informação por conta de ser publicada em idioma diferente de inglês, de não estar contemplados dentro da base da Capes de revistas disponíveis ou de possuir conteúdo duplicado. No segundo filtro, foram selecionadas as publicações que continham os requisitos básicos para análise desta pesquisa. No último filtro, foram selecionados os trabalhos que possuíam Digital Twin como foco e usando o conceito aplicado por Kritzinger.

Figura 2.1 – Publicações selecionadas da Scopus.



2.5 Estratégia de extração de dados

Após a realização do processo de seleção, o processo de extração de dados se deu por meio da leitura completa de cada uma das 44 publicações selecionadas no último filtro. Usando a estratégia de fornecer um conjunto de respostas possíveis. Segundo Fernandes et al (2011), isso garante que os mesmos critérios de extração de dados sejam utilizados para cada subquestão, facilitando sua classificação.

A SQ1 procura investigar quais métodos são usados para virtualizar processos de manufatura, foram separados nos seguintes grupos:

- A. Sistemas de eventos discretos:** quando a técnica é baseada em métodos usados em sistemas de eventos discretos tais como diagrama de estados, rede de Petri etc.
- B. Engenharia de Sistemas baseada em Modelos (MBSE):** quando a técnica é baseada modelagem por funções matemáticas, teoria de controle ou métodos semelhantes.
- C. Modelagem por informação:** quando a técnica é baseada em modelos empíricos que usam dados de sensores e atuadores como referência para descrever os modelos de comportamento.

A SQ2 investiga qual propósito pretende-se alcançar ao aplicar o Digital Twin, categorizando pelas finalidades delimitadas por Cimino, Negri e Fumagalli (2019):

- A. Apoio ao gerenciamento do sistema de produção ou ciclo de vida do produto:** quando o propósito do Digital Twin é desempenhar um papel de supervisão ou gerenciamento, focando no ciclo de vida do produto durante a manufatura ou no processo de manufatura em si.
- B. Monitorar e melhorar o processo de produção:** quando o propósito do Digital Twin é controlar e monitorar os ativos que fazem parte do processo de manufatura. Exemplo: máquinas, robôs, pessoas etc.
- C. Flexibilidade:** quando a flexibilização da organização e montagem dos ativos são aspectos presentes no Digital Twin.
- D. Manutenção e segurança:** quando o Digital Twin cobre aspectos de

segurança, manutenção e treinamento no sistema de manufatura.

- E. Modelagem de produtos:** quando o foco do Digital Twin é a capacidade de modelar ou modificar o produto a partir de simulações e configuração da contraparte digital.

A SQ3 procura investigar quais os protocolos e formato de dados são usados para comunicação entre a contraparte física e a digital. Os protocolos de comunicação são categorizados em:

- A. OPC/OPC UA:** quando a comunicação é baseada na série de normas e especificações para telecomunicações industriais definidos pela OPC Foundation.
- B. TCP IP:** quando a comunicação é feita por um conjunto de protocolos de comunicação entre computadores em rede baseada no modelo de camadas OSI, incluindo protocolo de UDP.
- C. MQTT:** quando a comunicação é baseada no protocolo no modelo publish-subscribe da IBM.
- D. Outros:** quando a comunicação é baseada em outros protocolos que não atendem o modelo TCP/IP, como Fieldbus, USB, RS-232, e outros protocolos de comunicação industrial.

O formato de como os dados são organizados, armazenados e transferidos são outras informações pertinentes para esta subquestão:

- A. XML:** quando os dados estão armazenados em arquivos independentes utilizando linguagens de marcação.
- B. Banco de dados relacional e não-relacional:** quando os dados são armazenados em banco de dados relacionais, por exemplo SQL, PostgreSQL e SQLite3 etc., e não relacionais, como NoSQL e Mongo, organizados por um Sistema Gerenciador de Banco de Dados.
- C. Outros:** quando os dados são armazenados em arquivos de texto, arquivos não- estruturados ou formatos exclusivos de softwares patenteados.

A SQ4 procura responder qual tipo de representação digital os autores utilizam

com mais frequência, estão divididas em:

- A. Modelo 3D:** quando o Digital Twin proposto é representado por modelo geométrico tridimensional podendo conter ou não simulações, dinâmicas de movimento, completamente ou parcialmente virtual, gerado por um software de CAD ou motor gráfico de jogos.
- B. Realidade virtual / realidade aumentada:** quando o Digital Twin proposto é representado por um conjunto de imagens, texto e dados tridimensionais que podem ser visualizados por meio de aparelhos (óculos de realidade virtual e celulares) que permitam se inserir em um ambiente virtual (realidade virtual) ou parcialmente virtual (realidade aumentada).
- C. Aquisição de dados e dashboard:** quando o Digital Twin proposto é representado por uma interface gráfica que foca em demonstrar as mudanças que ocorrem na planta física através de análises gráficas e exposição de dados coletados. Normalmente disponível online via servidor web ou aplicação móvel.

A SQ5 busca definir quais os tipos de simulação são feitos nos Digital Twin, divididas nas seguintes categorias:

- A. Física dos processos:** quando a simulação se concentra em demonstrações das dinâmicas de movimento e interação entre os equipamentos, maquinários e produtos. Permitindo experimentar diferentes configurações para a organização da produção.
- B. Previsão de resultados:** quando a simulação se propõe a prever resultados em diferentes configurações e análise de diferentes cenários.
- C. Modelagem de produto:** quando o Digital Twin pode gerar novos produtos a partir de simulações.

A SQ6 investiga quais vantagens o Digital Twin emprega em um sistema de manufatura. Foram divididas nas seguintes categorias:

- A. Aumento na qualidade do produto ou produção:** quando as vantagens representam ganhos na qualidade do produto ou do processo. Implicando

em produção mais eficiente e ágil.

- B. Detecção de falhas de produção:** quando o Digital Twin é projetado para detectar falhas ou prever falhas que possam vir a comprometer o funcionamento adequado do sistema de manufatura. Sejam essas falhas detectadas em processos que ocorrem na produção, falha mecânica ou elétrica dos equipamentos de produção, ou irregularidades que indicam possíveis falhas, ou desgastes do processo convencional.
- C. Ganho em tempo de montagem de sistemas de produção:** quando a vantagem está nas configurações iniciais de montagem de um sistema de manufatura. Utilizando o aspecto mais comum do comissionamento virtual, a preparação para processo de produção.
- D. Segurança e treinamento:** quando as vantagens implicam no ganho de segurança dos operadores e integridade física dos colaboradores. Outro fator que contribui para aumento de segurança e vantagens, em geral, é usar as réplicas digitais para treinamento.

A SQ7 verifica se há algum estudo comparativo do Digital Twin aplicados a diferentes cenários ou com outros Digital Twins:

- A. Análise comparativa de diferentes cenários:** quando é avaliado no Digital Twin a capacidade de simulação e adaptação para diferentes cenários e testes;
- B. Análise comparativa com diferentes Digital Twins:** quando o desempenho do Digital Twin proposto é comparado com outros trabalhos na literatura.

2.6 Resultados levantados

A seguir são apresentados os resultados levantados nas subquestões durante mapeamento sistemático, os trabalhos analisados estão referenciados no apêndice A, e a tabela a seguir resume os principais aspectos avaliados nos trabalhos.

Tabela 2.4 – Classificação das publicações selecionadas por subquestão.

#	SQ1	SQ2	SQ3	SQ4	SQ5	SQ6	SQ7
1	C	B, D	B A	B	A	B	B
2	B	E	D -	A	B, C	A, B	B
3	C	B	-	A	A, B	A	-
4	B	A	D -	B	-	A, B	-
5	B	B	B C	C	-	B	-
6	C	A	B B	A	A	E	-
7	B	A, B, C, D	-	A	A, B	A, B, C	-
8	B	B, C	-	A	B, C	A, B	B
9	B	A, B	B A	A	A, B	B	-
10	B	A, B, C	B B	C	B	A, B	B
11	C	A	B B	A	A	E	-
12	C	B	B -	A, C	-	A, C	-
13	B	B	B B	A	B	A, B	-
14	C	A, B, C, D	A B	A	A, B	A, B, C	B
15	B	B, D	- -	B	A, B	B, D, E	B
16	C	A, B, C	B B	A	B	A, B	B
17	B	B, D	B -	B	A, B	B, C	B
18	B	B	B -	C	-	B	B
19	B	A, E	B B	C	B	B	B
20	B	A, B	- -	A	A, B	A, B	B
21	C	A, B, C	A, B A, B	A	B	C	B
22	C	A	B B	C	-	A	-
23	B	A	- C	A	A, B	A	-
24	C	A	B A	A	A	A	-

#	SQ1	SQ2	SQ3	SQ4	SQ5	SQ6	SQ7
25	C	A	B -	C	-	A	-
26	C	B	B B	C	-	B	-
27	A	A, B, C	B B	A	A, B	A, B, C	B
28	-	-	-	-	-	-	A
29	-	-	-	-	-	-	A
30	B	B	A B	C	B	A, B	A
31	A	A	- A	C	A	-	-
32	C	B	C A, B	C	B	A, B	-
33	-	-	-	-	-	-	A
34	-	-	-	-	-	-	A
35	C	B	B B	C	B	A	A
36	-	-	-	-	-	-	A
37	B	E	D -	A	B, C	A, B	B
38	C	A	B B	A	A	E	-
39	C	A	B B	A	A	E	-
40	C	B, D	B A	B	A	B	B
41	C	A, B, C	A, B A, B	A	B	C	B
42	B	A, B	-	-	A, B	A, B, C	-
43	C	B	- B	C	-	B	-
44	B	B	A B	-	-	A, B	A

Resultado (nº de ocorrência / total de publicações)

SQ1	SQ2	SQ3	SQ4	SQ5	SQ6	SQ7
	A: 44%	A: 8% 17%			A: 56%	
A: 6%	B: 61%	B: 50% 36%	A: 44%	A: 36%	B: 56%	A: 19%
B: 44%	C: 19%	C: 3% 6%	B: 11%	B: 53%	C: 17%	B: 36%
C: 36%	D: 14%	D: 6%	C: 33%	C: 6%	D: 3%	N.R: 44%
N.R: 14%	E: 6%	N.R: 33%	N.R: 14%	N.R: 36%	E: 6%	
	N.R: 14%	25%			N.R: 17%	

2.6.1. Método de virtualização

Nos estudos primários, duas categorias de método de virtualização são frequentemente abordadas: MBSE e modelagem de informação. A MBSE demonstra ser uma ferramenta versátil de modelagem, pois descreve o comportamento de muitos fenômenos que ocorrem nos processos de manufatura, por meio de formalismo matemático e conhecimentos robustos de engenharia ((OYEKAN et al., 2019); (DELBRÜGGER; ROSSMANN, 2019); (SHORT; TWIDDLE, 2019); (SCHLUSE et al., 2018)). Muitos desses trabalhos se atem a descrever os atributos específicos do processo de produção, como a dinâmica de robôs (OYEKAN et al., 2019), controle de máquinas CNC (RAUCH; PIETRZYK, 2019), dinâmica de fluídos (HAN et al., 2019). O que os tornam excelentes modelos para simulação de processos e previsão de resultados, mas raramente essa abordagem consegue abstrair informações qualitativas e gerenciais do processo.

Em contrapartida a virtualização baseada em modelagem de informação concentra-se em destacar informações para um observador humano. Essa abordagem é popular, pois a modelagem é feita por um conjunto de regras descritas em uma lógica de programação. Concebida através de abstração de conhecimento que é feita de forma arbitrária para prever possíveis cenários e resultados ((BARNI et al., 2018); (ZHENG; YANG; CHENG, 2018); (URBINA et al., 2018)). Quando possui um processo formal de modelagem, frequentemente utilizam modelos de eventos discretos (LU; XU, 2018) ou modelos de engenharia de software para descrever o comportamento do modelo, como diagramas de contexto (ZHANG et al., 2019), ou diagrama de classes (UM; WEYER; QUINT, 2017). Dessa forma, o modelo de Digital Twin emprega informações de mais fácil interpretação humana, porém, a ausência de formalismo dificulta a simulações dos aspectos físicos do Digital Twin.

2.6.2. Propósito do Digital Twin

Monitoramento do processo de produção é a finalidade mais frequentemente atribuída ao Digital Twin ((ZHUANG; LIU; XIONG, 2018b); (DELBRÜGGER; ROSSMANN, 2019); (SOUZA et al., 2019)). Como o Digital Twin

reflete todas as características e funcionamento do processo de manufatura, ele se torna uma forma prática de observar possíveis problemas no processo. Alguns trabalhos, vão além do monitoramento e implementam ferramentas de suporte para gerenciamento e controle que atuam na planta. Outro objetivo alcançado com os Digital Twins diz respeito à capacidade de reconfiguração e flexibilidade. No entanto, uma das dificuldades para flexibilização é o fato de muitos dos Digital Twin serem ad-hoc, o que os tornam menos flexíveis ((ZHANG et al., 2017); (TAO et al., 2018)). Manutenção, segurança e modelagem de produto são os temas menos frequentes nas publicações, parte disso se deve ao Digital Twin desses trabalhos utilizarem de realidade virtual ou aumentada para atender esta finalidade ((PREUVENEERS; JOOSEN; ILIE-ZUDOR, 2018); (MORENO et al., 2017)).

2.6.3. Protocolos de comunicação e conjunto de dados

Um dos aspectos mais importantes analisados nos trabalhos é a forma de comunicação e de processamento de dados. O protocolo de comunicação mais comum é TCP/IP, por conta da versatilidade em transferência de dados entre diferentes dispositivos e o acesso às plataformas Web ((LANDOLFI et al., 2018); (ZHENG et al., 2018)). Dessa forma, o Digital Twin e seus serviços possuem alta disponibilidade e acesso facilitado. No entanto, poucos são os Digital Twin que possuem modelos geométricos 3D e os que possuem tem funcionalidades limitadas ((UM; WEYER; QUINT, 2017); (MORENO et al., 2017)). Uma exceção são os Digital Twin que utilizam processamento de borda para geração do modelo digital (HAUF et al., 2017). Outros protocolos comuns nessas aplicações, são baseados na arquitetura publish-subscribe, sendo os mais comuns OPC e MQTT. Esse protocolo demonstra versatilidade para comunicação sem fio e atende aos requisitos de tempo real em alguns cenários para comunicação industrial, assim como Ethernet Industrial ((ZHENG; YANG; CHENG, 2018); (URBINA et al., 2018)). Outra forma analisada de comunicação são as que utilizam protocolos industriais de legado para comunicação com computador físico próximo para processar os dados e gerar o Digital Twin (SHORT; TWIDDLE, 2019).

A organização e o armazenamento de dados é outro fator importante para compreender a forma de comunicação do Digital Twin com a contraparte física

nos trabalhos analisados. O modelo mais popular de armazenamento e organização de dados é o de banco de dados relacionais e não-relacionais ((TAO et al., 2018); (EISENTRÄGER et al., 2018); (TAO; ZHANG, 2017); (ZHUANG; LIU; XIONG, 2018a); (CAI et al., 2017)). O banco de dados gerenciado por SGBD é a forma mais confiável e segura de armazenamento e de segurança de dados exploradas nos trabalhos, por isso são usados com mais frequência. A formatação em XML é eficiente para armazenar dados que modificam com frequência ((LU et al., 2019b); (MORENO et al., 2017); (UM; WEYER; QUINT, 2017)). Por esse motivo são mais frequentemente usando nas publicações para representar dados de estados do processo (SOUZA et al., 2019) e de atributos geoespaciais (HAVARD et al., 2019), pois a troca de dados é realizada mais rapidamente.

2.6.4. Representação digital

A forma de representação virtual mais usada nos estudos primários são os modelos geométricos tridimensionais. Esse tipo de virtualização é eficiente para supervisão e gerenciamento, porque, se trata de réplicas virtuais dos objetos e máquinas. Possibilitando visualizar toda cadeia de produção, sendo assim possível acompanhar todo ciclo de vida do produto ((ZHANG et al., 2017); (TAO; ZHANG, 2017); (ZHENG; YANG; CHENG, 2018)). Das publicações analisadas, 44% dos modelos 3D são criados a partir de software de CAD. Dessa forma, muitos dos modelos virtualizados e simuladores utilizam de forma direta ou indireta CAD como SolidWorks, 3D MAX, AutoCAD, CATIA etc. (ZHUANG; LIU; XIONG, 2018a).

Outro aspecto importante sobre a representação digital são os motores gráficos que simulam fenômenos físicos e trazem dinâmica para os sistemas modelados nos CAD. Os motores gráficos são frequentemente usados para gerar ambientes virtuais para realidade virtual ou realidade aumentada ((OYEKAN et al., 2019); (BLAGA; TAMAS, 2018)). No entanto, a integração de CAD com motores gráficos, como Unity e Blender, tornam o espelhamento dos Digital Twin mais próximo do real ((BARBOSA et al., 2018); (KUTS et al., 2019)).

Aquisição de dados e dashboard é uma abordagem usada com frequência nos trabalhos. Esse tipo de representação não se concentra nos aspectos físicos do sistema de manufatura, e sim na visualização da informação coletada (DAMJANOVIC-BEHRENDT; BEHRENDT, 2019). Esse conceito é intrínseco de sistemas ciberfísicos,

um método eficaz para representar sistemas de produção complexas e com uma quantidade massiva de dados.

2.6.5. Tipos de simulação

A tabela 2.4 ilustra que 36% dos Digital Twin dos trabalhos analisados não possuem uma forma de simulação. Isso se deve ao fator de flexibilidade citado no propósito do Digital Twin. Para que o Digital Twin possa ser capaz de atender diferentes cenários, a simulação é necessária para atingir tal objetivo (ZHANG et al., 2017). Por esse motivo, simuladores onde prever o comportamento dos sistemas de manufaturas são os mais frequentes. A maior parte dos trabalhos publicados utiliza os Digital Twins com simulador e incorporam uma combinação de simular a dinâmica dos processos e previsão de resultados ((SCHLUSE et al., 2018); (ZHUANG; LIU; XIONG, 2018a)). Um aspecto pouco recorrente, mas importante, a simulação para modelagem de produtos. Esse tipo de simulação ocorre em produções onde o produto possui um nível de personalização onde o mesmo processo gera mais de um tipo de produto ((ADERIANI et al., 2019); (MARTIN et al., 2019)).

2.6.6. Vantagem em implantar um Digital Twin e análise comparativa

Representações digitais e simulações tipicamente se concentram em analisar o comportamento do sistema de manufatura sob diferentes perspectivas. No entanto, nos estudos levantados mais de 44% dos trabalhos não apresentam um estudo comparativo de desempenho dos Digital Twins propostos. Somente nos estudos secundários há publicações possuem análises comparativas de diferentes Digital Twin que trazem comparações qualitativas (NEGRI; FUMAGALLI; MACCHI, 2017; LU et al., 2019a; DAMJANOVIC-BEHRENDT; BEHRENDT, 2019). Portanto, o que são avaliados são técnicas de modelagem (TAO et al., 2019), abordagens de virtualização (CHENG et al., 2020), gerenciamento e processamento de dados (DAMJANOVIC-BEHRENDT; BEHRENDT, 2019) e tecnologias aplicadas no desenvolvimento do Digital Twin (NEGRI; FUMAGALLI; MACCHI, 2017).

Já os estudos primários avaliam resultados quantitativos dos sistemas de produção em diferentes configurações ou avaliam outros aspectos relacionados à produção como tempo de montagem (ZHANG et al., 2017), qualidade do produto ou

avanço durante os treinamentos (HAVARD et al., 2019). Dos estudos primários, as vantagens adquiridas com desenvolvimento de um Digital Twin para uma planta de manufatura estão relacionadas a um ganho de qualidade no ciclo de vida do produto (HAVARD et al., 2019) ou facilidade na detecção de erros que acontecem durante a produção (STAASMEYER; LIU; DAMBON, 2018). Contudo, alguns trabalhos destacam o uso do Digital Twin para aprimorar treinamentos em ambientes de realidade virtual ou aumentada (BLAGA; TAMAS, 2018).

2.7 Considerações finais

Para responder à questão da pesquisa **“Que metodologias, técnicas e ferramentas são aplicadas para desenvolvimento de uma representação virtual (Digital Twin) em sistemas de manufatura?”** delimitamos os resultados dos trabalhos analisados através das subquestões levantadas, a fim de avaliar quais práticas tendem a produzir resultados mais eficazes para o desenvolvimento de um Digital Twin.

Na SQ1, avaliamos que a MBSE é uma metodologia que demonstra resultados satisfatórios para modelagem de sistemas de engenharia, baseados em mecânica, eletrônica e computação. Formalizando as dinâmicas e interações entre esses sistemas. No entanto, a modelagem de informação é uma característica importante para gerenciar os ativos de um sistema de manufatura. Logo, essas duas abordagens são complementares para atingir um objetivo em comum, que seria representar a contraparte física de forma completa.

Tanto a MBSE quanto a modelagem de informação garantem a disponibilidade de simulação para o Digital Twin. Visto que ambas descrevem os fenômenos físicos e troca de informações que ocorrem nos sistemas de produção. Sendo esse um aspecto essencial para o Digital Twin explorado na SQ5. Simular as dinâmicas de movimento entre os ativos da produção e explorar possíveis resultados garantem atender finalidades importantes atribuídas para o Digital Twin vistas na SQ2: apoio ao gerenciamento, monitoramento do processo e flexibilidade.

Para desenvolver um Digital Twin que incorpore essas características são adotadas duas ferramentas para o processo. Primeiro, usa de ferramentas abordadas na SQ4, como um motor gráfico que gere as interações e movimentos

de objetos e máquinas projetadas em CAD. Dessa forma, pode-se gerar um ambiente virtual que possua a capacidade de programar simulações, interação com usuário e conexão com outros sistemas. Segundo, utiliza de características exploradas na SQ3, como a troca de informação entre Digital Twin e planta física sob protocolo TCP/IP, já que o Digital Twin será gerado por processamento de borda. Com o armazenamento e comunicação sendo feitos via banco de dados relacional para dados históricos e XML para dados sobre as interações gráficas do Digital Twin.

Por fim, explorando os aspectos abordados na SQ6 e SQ7, quanto ao desempenho do Digital Twin em diferentes configurações. Nota-se que o ganho de qualidade no ciclo de vida e detecção de erros durante o ciclo de vida do produto são parâmetros quantitativos que podem ser submetidos a análise. Em comparação com Digital Twin em outros trabalhos, é possível somente uma meta-análise das características qualitativas dos modelos.

No próximo capítulo é analisado quais trabalhos melhores destacam as características exploradas na questão da pesquisa apresentada neste capítulo. Além dos trabalhos referenciarem a metodologia proposta para este trabalho, também serão levantados os critérios que a metodologia proposta se diferencia dos demais trabalhos apresentados.

Capítulo 3 - Trabalhos relacionados

O primeiro trabalho relacionado, escrito por Lee e Park (2014), apresenta uma metodologia para virtualização de processos de manufatura por meio de comissionamento virtual, descrevendo um processo em quatro etapas em como atingir sincronia entre uma planta virtual e um controlador físico.

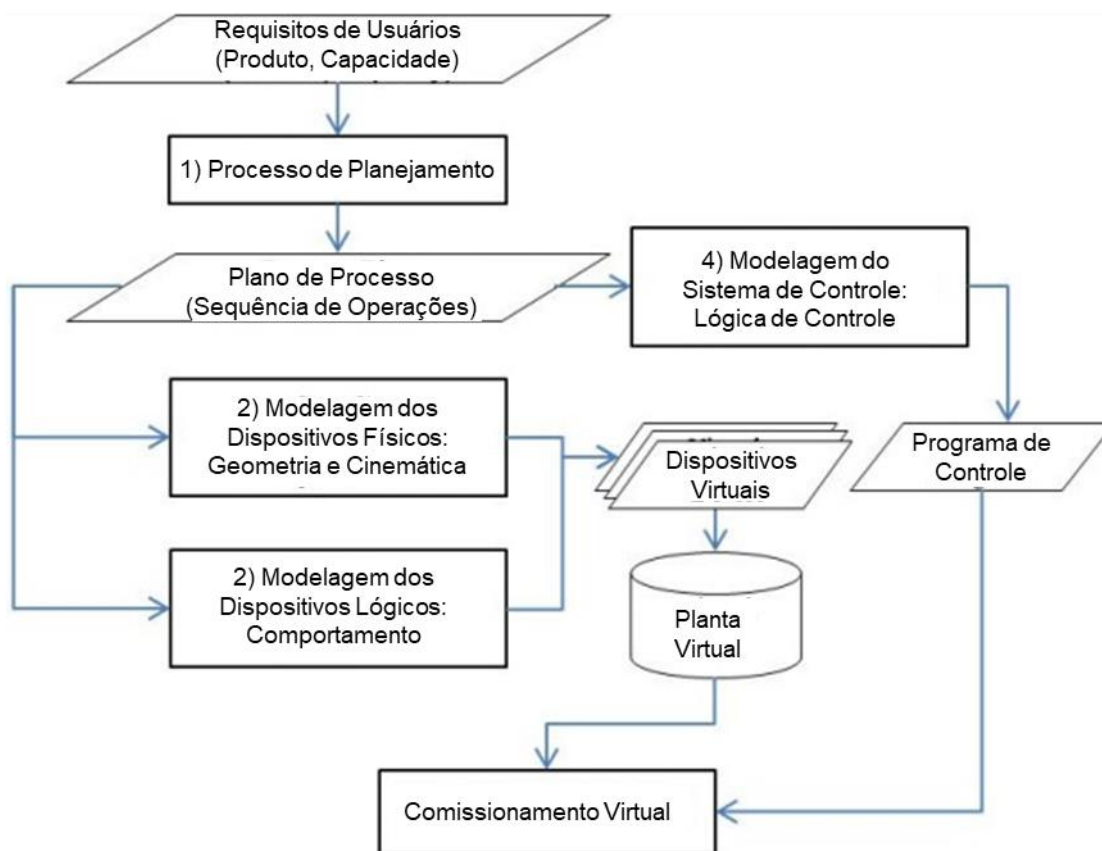
O segundo trabalho relacionado, escrito por Schluse et al (2018), apresenta uma forma de geração de simulação por meio dos Digital Twins Experimentáveis. No qual faz uso de modelos que processam sinais reais e virtuais para descrever o comportamento de uma simulação para contraparte virtual.

O terceiro trabalho relacionado, escrito por Zheng, Yang e Cheng (2018), sintetiza um framework comumente usados em aplicações de sistemas ciberfísicos, uma estrutura organizacional de três camadas que divide o Digital Twin em camada física, camada de processamento de dados e camada virtual. Onde são definidas as características de cada camada e como cada uma contribui para gerar as funções do Digital Twin.

Por fim, o quarto trabalho relacionado, escrito por Zhang et al (2017), apresenta de forma sistemática como incorporar um Digital Twin um processo de manufatura. Propondo um processo de implantação de uma planta virtual em ambiente industrial e descrevendo quais aspectos são relevantes para um cenário de produção.

3.1 Virtualização e simulação para sistemas de manufatura

Lee e Park (2014) propuseram um procedimento para comissionamento virtual, como mostra a figura 3.1. O procedimento proposto consiste em 4 etapas principais; (1) Planejamento de processos, (2) Modelagem de dispositivos físicos, (3) Modelagem de dispositivos lógicos e (4) Modelagem dos dispositivos de controle. Na primeira etapa, um plano de processo de manufatura, uma sequência de operações, onde são identificados processos e dispositivos de fabricação. Depois que um plano de processo é preparado, as outras três etapas podem ser abordadas.

Figura 3.1 – Procedimento para comissionamento virtual.

Adaptação de Lee e Park (2014)

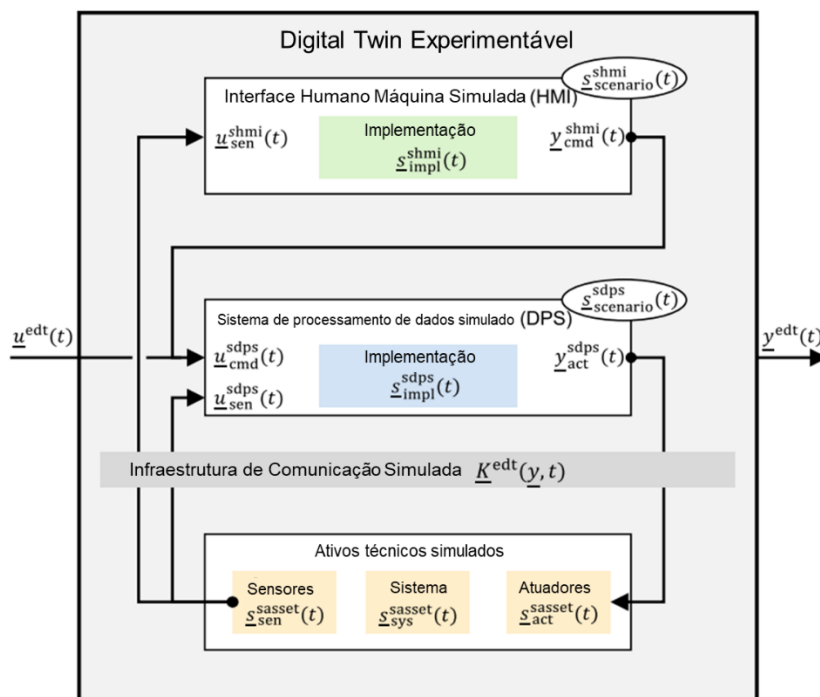
Enquanto as etapas 1 e 4 fazem parte do procedimento de projeto convencional, as etapas 2 e 3 devem oferecer suporte ao comissionamento virtual. As etapas 2 e 3 modelam o aspecto físico de um dispositivo virtual e seus relacionamentos lógicos com outros dispositivos. Como os dispositivos virtuais precisam se comunicar com um controlador real, o dispositivo virtual deve se comportar da mesma maneira que o dispositivo real. Dessa forma, o dispositivo virtual precisa manter o software inerente aos aspectos físicos do dispositivo, como a cinemática e a forma geométrica. A metodologia de Lee e Park para comissionamento virtual facilita o processo de virtualização, pois se concentra em dois aspectos para gerar os dispositivos virtuais: Na dinâmica dos objetos físicos (modelagem de dispositivos físicos) e no comportamento lógico do processo (modelagem dos dispositivos de controle).

3.2 Digital Twin Experimentável

O Digital Twin Experimental, ou EDT, (SCHLUSE et al., 2018) combina as ideias de Digital Twin com MBSE e técnicas de simulação. Com objetivo de fornecer um novo método de elaboração de processos de engenharia de sistemas baseado em simulação. Para atender uma variedade de finalidades diferentes como, desenvolvimento, otimização, verificação, interfaces de usuário e treinamento.

A tecnologia de modelagem tridimensional permite integrar vários domínios de simulação. A Indústria 4.0 fornece novos conceitos para conectar diferentes partes de sistemas complexos, usando MBSE para explorar sistematicamente os requisitos, a estrutura e o comportamento desses sistemas. EDTs integram e conectam diferentes componentes de um modelo, independentemente dos algoritmos de simulação usados. Pois, seu recurso de comunicação da simulação considera que as entradas e saídas do controlador estão conectadas a simulação. Dessa forma, os EDTs permitem um desenvolvimento integrado ao sistema físico.

Figura 3.2 – Estrutura básica de Digital Twin Experimental.



Adaptação de Michael Schluse et al. (2018)

Uma visão sistemática sobre EDTs é dada na figura 3.2. Um EDT combina um sistema de processamento de dados simulado com uma planta física simulada e uma interface humano máquina simulada. A planta física simulada compreende o sistema representado por seu vetor de estado interno e seus sensores e atuadores simulados. Cada vetor de estado consiste no estado atual do componente correspondente, seus parâmetros e algoritmos. A planta física simulada deve imitar adequadamente a planta real correspondente.

3.3 Framework de Aplicação para Digital Twin

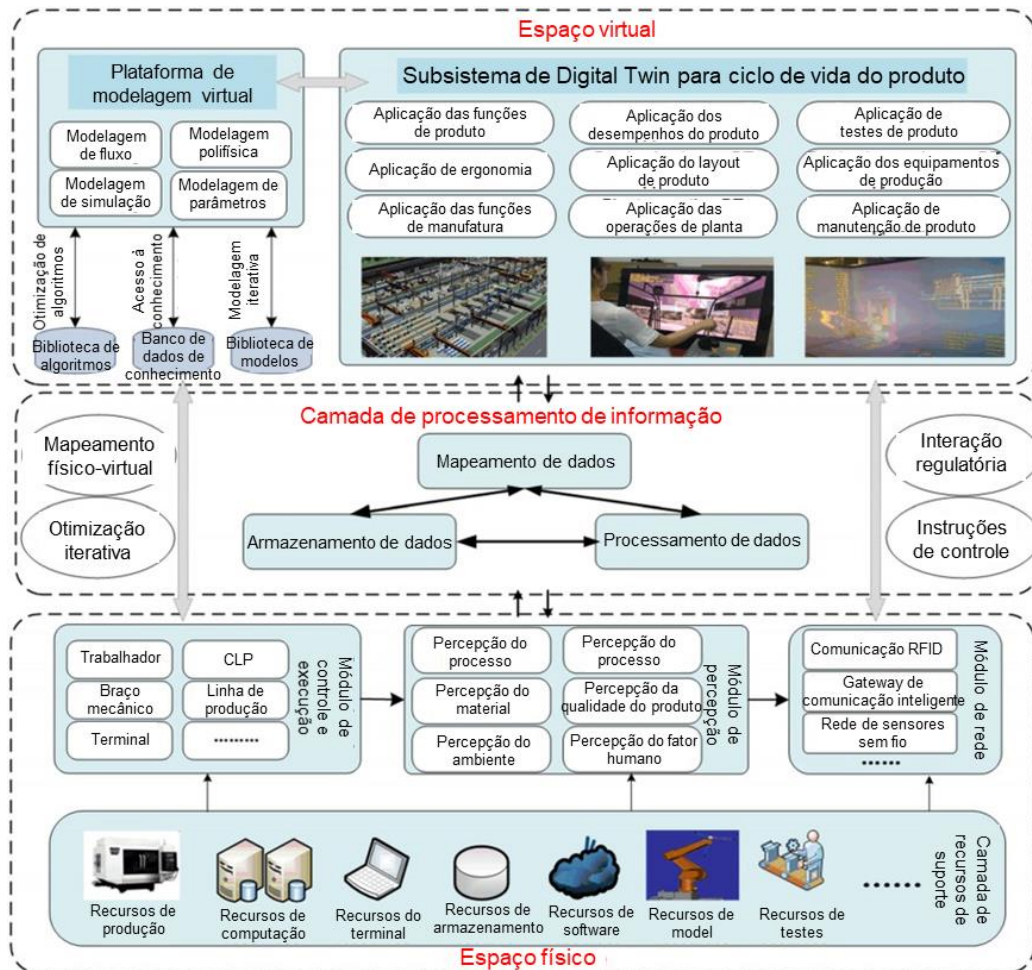
Segundo Zheng, Yang e Cheng (2018) uma estrutura de aplicação do Digital Twin para gerenciamento do ciclo de vida do produto consiste em três partes: espaço físico, espaço virtual e camada de processamento de informações. No processo de aplicação, realiza-se o mapeamento físico completo do sistema, a modelagem dinâmica do ciclo de vida e a otimização em tempo real de todo o processo. O mapeamento bidirecional e a interoperabilidade do espaço físico e do espaço virtual são realizados por meio da interação de dados. A estrutura de aplicação do Digital Twin proposto por Zheng e seus colegas é ilustrada na figura 3.3.

No espaço físico, sensores inteligentes e equipamentos de comunicação são usados para coletar e transmitir dados heterogêneos de múltiplas fontes, incluindo atributos de equipamentos, status, processo, falha, perturbação etc. Esses dados são coletados por dispositivos digitais e transferidos para a rede. Além disso, de acordo com as instruções de feedback do espaço virtual, os dispositivos físicos relacionados também possuem uma reação inteligente oportuna. O mapeamento entre dados e atributos do dispositivo torna possível a interação entre o espaço físico e o digital.

A camada de processamento de informações é o canal que conecta o espaço físico e o espaço virtual. O mapeamento bidirecional e a interoperação do espaço físico e do espaço virtual são realizados por meio da interação de dados nesta camada. Esta camada proposta por Zheng é dividida em três módulos. Primeiro, armazenamento de dados, onde são organizados e guardados os dados físicos e virtuais. Segundo processamento de dados, um conjunto de operações

que realiza a aquisição de dados brutos, a extração de dados úteis e análise de dados para gerar soluções. Terceiro, mapeamento de dados, atuando na sincronia entre as operações físicas e virtuais.

Figura 3.3 – Framework de aplicação do Digital Twin.



Adaptação de Zheng et al. (2018)

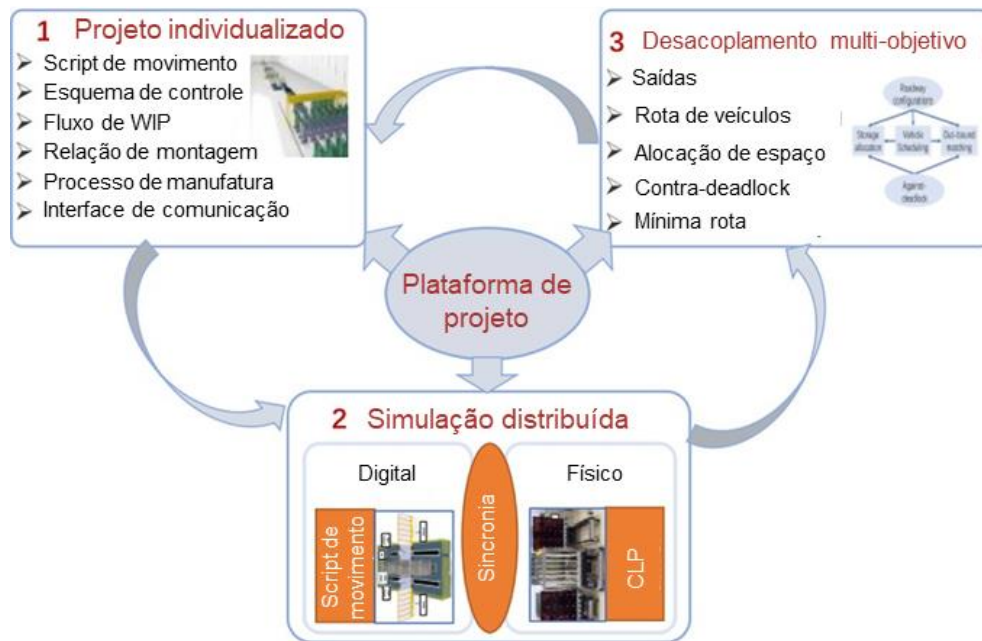
O espaço virtual consiste em duas partes: a plataforma de ambiente virtual e o subsistema de aplicação de Digital Twin para gerenciamento do ciclo de vida do produto. A plataforma de ambiente virtual é construída para estabelecer um modelo virtual tridimensional unificado para a aplicação e fornece um ambiente operacional para a biblioteca de algoritmos. A plataforma fornece vários modelos virtuais para Digital Twin, incluindo modelo polifísico, de fluxo de trabalho, de simulação, entre outros. Digital Twins acumulam vários modelos, métodos e dados históricos que são criados durante a operação na plataforma de ambiente virtual.

3.4 Abordagem de design e otimização multiobjetivo baseado em Digital Twin

Hao Zhang et al (2017) propõem um modelo de design e otimização baseado em conceitos definidos para Digital Twin. O desenvolvimento do Digital Twin é incorporado dentro do processo de design promovendo outras características do Digital Twin além do espelhamento da contraparte física. Conforme mostrado na figura 3.4, a abordagem de design e otimização multiobjetivo baseado em Digital Twin, proposto por Zhang e seus colegas, consiste em três etapas principais:

- 1) Projeto inicial individualizado. Com base em uma série de modelos de referência tridimensionais predefinidos e no encapsulamento modular, o projetista pode realizar a montagem e operação da linha de produção. A função e a eficiência do equipamento com base no modo de ação real e modo de controle são encapsuladas, e a interface de dados padronizada e a interface de informação são definidas.
- 2) Simulação semifísica distribuída. De acordo com os requisitos do local, um planejamento do layout e montagem do modelo são realizados na plataforma de simulação de forma distribuída semifísica. O design de movimento, design de esquema de controle, design de execução e simulação de operação dinâmica para cada etapa em toda a linha são concluídos.
- 3) Ajuste do projeto com base na avaliação de desempenho. Com base no esquema de projeto preliminar, o processo de produção é verificado com o auxílio de uma plataforma de simulação dinâmica. De acordo com a eficiência da operação e análise de carga para modificações de projeto, um novo conjunto do projeto mais adequado para linha de produção e algoritmos inteligentes são formados.

Figura 3.4 – Abordagem de design individualizado rápida e iterativa digital baseada em gêmeos.



Adaptação de Hao Zhang et al. (2017)

Para garantir que os modelos de referência possuam atributos, como interoperabilidade e integração, um modelo de dados semânticos de quatro tuplas é estabelecido como uma representação de referência do projeto e operações do sistema, onde os quatro elementos denotam: atributos estáticos, script de movimento, esquema de controle e interface de comunicação. Desta forma, as informações de engenharia no paradigma orientado a objetos e permite a modelagem de componentes físicos e lógicos da linha de produção como objetos de dados que encapsulam diferentes atributos.

3.5 Considerações finais

No trabalho de Lee e Park (2014) é apresentada uma metodologia para virtualização de processos e dispositivos físicos. Consiste na modelagem geométrica e cinemática dos elementos físicos, e lógica e comportamental das suas interações, gerando assim dispositivos virtuais. Tal aspecto é incorporado na metodologia deste trabalho, a fim de formalizar em um modelo o comissionamento dos elementos físicos para elementos virtuais.

O Digital Twin Experimental concebido por Schluse et al (2018) propõe um modelo de simulação para elementos virtuais utilizando MBSE. A simulação é uma característica intrínseca do Digital Twin, devido à possibilidade de gerar e analisar diferentes cenários para um sistema de manufatura. Subdividido em três blocos de processamento de sinais, ele simula o comportamento de ativo em três instâncias. Na interação com usuário, em como os sensores e atuadores operam no sistema, e em que resultados esse processo deve gerar. A metodologia deste trabalho propõe fazer uso desse método de simulação apresentado por Schluse para gerar os comportamentos de cinemática e lógico dos equipamentos de manufatura em um ambiente virtual.

No framework proposto por Zheng, Yang e Cheng (2018) organiza a aplicação de um Digital em três ambientes: espaço físico, espaço virtual e camada de processamento de informação. Essa estrutura delimita a atuação do Digital Twin em cada um desses espaços. Essa organização permite mapear quais são as interações entre os componentes físicos e virtuais, e em qual camada elas ocorrem.

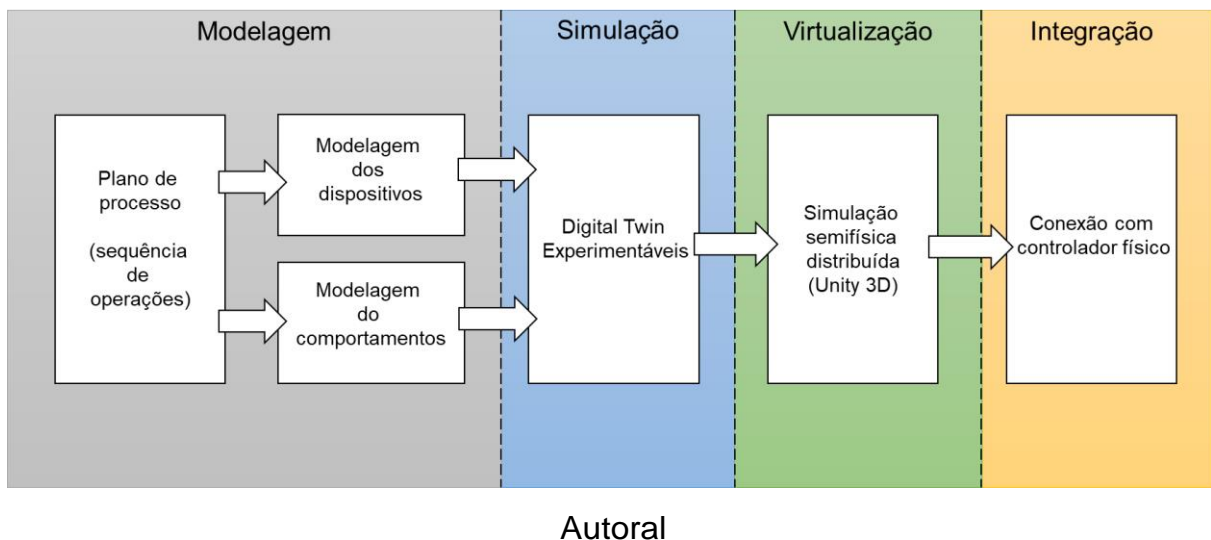
Por fim, Zhang et al (2017) propõem uma abordagem para projetar e implementar um Digital Twin em ambiente de manufatura. Modelagem individualizada e simulação semifísica apresentam conceitos e métodos para a geração de uma contraparte digital no aspecto industrial, usando o conceito de camada apresentado por Zheng, Yang e Cheng (2018). O ajuste do projeto com base em avaliação de desempenho apresenta formas de avaliar um desempenho de uma planta virtual considerando as prioridades de um ambiente industrial.

No próximo capítulo é apresentado a metodologia deste trabalho para o desenvolvimento de um Digital Twin baseado nas metodologias e técnicas apresentadas neste capítulo. Com o objetivo de mostrar as etapas necessárias para gerar um ambiente virtual a partir das entradas e saídas de um controlador físico. Fazendo uso das metodologias apresentadas para realização da virtualização de uma planta física, usando motor gráfico de jogos como ferramenta de geração de ambiente virtual.

Capítulo 4 - Metodologia

A metodologia proposta, ilustrada na figura 4.1 é dividida em quatro etapas consecutivas de desenvolvimento: modelagem, simulação, virtualização e integração. O método se inicia a partir de um escopo definido das relações de controle e interações entre os ativos para o processo de manufatura. Posteriormente, são virtualizados esses processos em um modelo que represente quais informações são relevantes para a manufatura. A partir desse modelo, gerar uma simulação dentro de um ambiente virtual e conectá-lo ao controlador físico, gerando assim um Digital Twin.

Figura 4.1 – Metodologia proposta para Digital Twin



A etapa de modelagem é dividida em três partes. Primeiro é definido um plano de processo em que é descrita a seqüência de operações para fabricação de um produto ou execução de uma etapa dentro de um processo produtivo. Após definida a seqüência de operações, dividimos a etapa em modelagem dos dispositivos e modelagem do comportamento. Na modelagem dos dispositivos, são modelados os ativos físicos do processo produtivo, como maquinário, controladores, motores, esteiras, robôs, e qualquer outro dispositivo que desempenhe um papel dentro da produção. E na modelagem de comportamento, são modeladas as interações entre os dispositivos físicos descrevendo todos os movimentos e comportamentos relevantes dentro do processo de manufatura, que

auxiliem no processo de controle e coleta de informações essenciais para o monitoramento e manipulação dos produtos.

Na etapa de simulação ocorre a digitalização dos modelos gerados na etapa anterior. Fazendo uso do Digital Twin Experimentável, onde os modelos são descritos por meio das entradas e saídas do sistema, e dos comportamentos dos dispositivos físicos. E, posteriormente, tem suas interações definidas por meio de diagramas de fluxo de sinais. A partir dos Digital Twin Experimentáveis, é gerado um modelo simulado da planta física que corresponde às principais funções dentro de um processo de manufatura.

Na etapa de virtualização, o modelo digital proposto é criado dentro de um ambiente virtual gerado pelo motor gráfico Unity3D. No ambiente virtual são criados objetos virtuais que representam os ativos físicos do processo de manufatura, bem como são implementados os fenômenos físicos que correspondem ao comportamento e interações realizadas durante a produção. Além disso, são implementados dentro dos ambientes virtuais, interfaces de controle e monitoramento do processo produtivo.

Na etapa de integração, a cópia digital simulada em ambiente virtual é integrada ao controlador físico. Essa última etapa conclui o comissionamento virtual e comissionamento de realidade em loop. Já que a interface de interação entre o controlador físico e virtual são as entradas e saídas compartilhadas por ambos. A partir dessa interface integrada todas as ações que ocorrem um controlador de respectivamente serão refletidas no outro, ambos reagindo de forma síncrona.

4.1. Modelagem

Como os dispositivos virtuais precisam se comunicar com um controlador real, o dispositivo virtual deve se comportar da mesma maneira que o dispositivo real. Um dispositivo virtual precisa manter, bem como os atributos físicos do dispositivo real, como a cinemática e a forma geométrica. Na etapa de modelagem, primeiramente, é preciso definir um plano de produção. O plano de produção descreve uma sequência de operações que levam a manufatura do produto. A partir da sequência de operações pode-se definir o impacto que os ativos desempenham dentro do processo produtivo e quais informação são

relevantes dentro desse processo. Após definido o plano de produção, o processo de modelagem é dividido em duas etapas. Modelagem dos dispositivos e modelagem do comportamento.

4.1.1. Modelagem dos dispositivos

Os motores gráficos de jogo usam as representações de malha poligonal, onde um modelo 3D é representado por um conjunto de triângulos ou polígonos mais complexos. Esta abordagem fornece uma representação simplificada facetada. Por outro lado, os fluxos de trabalho de design CAD são baseados no uso de representações de fronteira, conhecidos como B-Rep. Nesta abordagem, o modelo 3D é representado por meio de definições geométricas precisas de superfícies e curvas. O B-Rep fornece uma definição precisa e compacta, mas é efetivamente inutilizável para visualização.

Passar da definição B-Rep para a poligonal, envolve um processo conhecido como triangulação, que pode ser feita com diferentes níveis de aproximação e, portanto, pode produzir diferentes malhas ou níveis de detalhes. Para modelagem dos dispositivos de manufatura, esta metodologia propõe o uso do CAD Exchanger, um plugin converte qualquer formato CAD em um modelo de dados unificado. CAD Exchanger fornece uma API completa para o modelo de dados unificado através de bibliotecas C #, C ++ e Java que converte dados CAD em GameObjects da Unity.

CAD Exchanger abrange mais de 20 formatos CAD como JT, STEP, Solidworks, Rhino e muitos outros formatos de arquivo neutros e nativos. Isso torna uma das ferramentas mais práticas dos desenvolvedores de Unity/CAD para modelagem de objetos virtuais para inserir em um ambiente virtual interativo.

4.1.2. Modelagem do comportamento

Lee e Park (2014) propõem o uso do formalismo de DEVS de Zeigler empregado para a modelagem dos aspectos lógicos de um dispositivo virtual. O formalismo de DEVS suporta a especificação de modelos de eventos discretos de uma maneira modular e hierárquica. A semântica do formalismo é altamente compatível com as especificações orientadas a objetos para modelos de

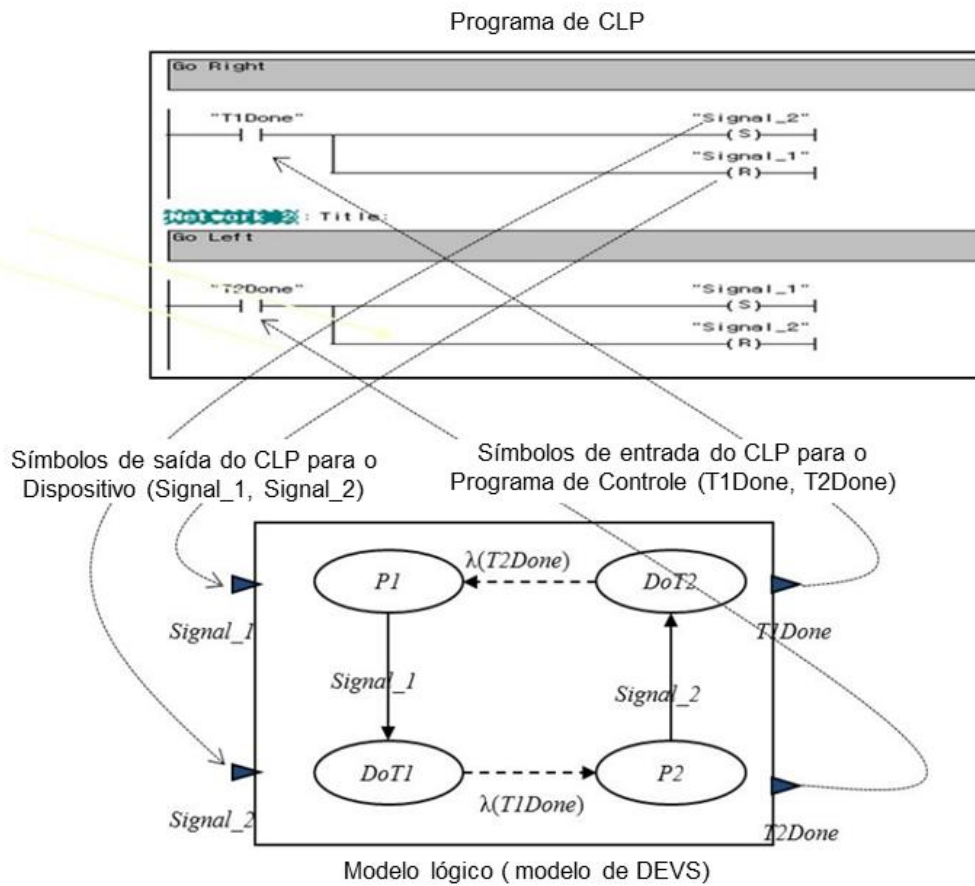
simulação. Dentro do formalismo de DEVS é especificado dois tipos de submodelos: (1) o modelo atômico, os modelos básicos a partir dos quais modelos maiores são construídos; e (2) o modelo acoplado, como os modelos atômicos são conectados de maneira hierárquica. Formalmente, um modelo atômico e acoplado, especificado na tabela 4.1, é composto por uma dupla de 7 variáveis. Onde cada variável é um aspecto do modelo a fim de representar comportamento em um diagrama de eventos discretos.

Tabela 4.1 – Formalismo de DEVS.

<p align="center">Modelo atômico</p> <p align="center">$M = \langle X, S, Y, \delta_{int}, \delta_{ext}, \lambda, t_a \rangle$</p>	<p align="center">Modelo acoplado</p> <p align="center">$DN = \langle X, Y, M, EIC, EOC, IC, SELECT \rangle$</p>
<p><i>X</i>: conjunto de eventos de entrada.</p> <p><i>S</i>: conjunto de estados de sequência.</p> <p><i>Y</i>: conjunto de eventos de saída.</p> <p>$\delta_{int}: S \rightarrow S$: função de transição interna.</p> <p>$\delta_{ext}: M * X \rightarrow S$: função de transição externa.</p> <p>$\lambda: S \rightarrow Y$: função de saída.</p> <p>t_a: função de avanço no tempo.</p>	<p><i>X</i>: conjunto de eventos de entrada.</p> <p><i>Y</i>: conjunto de eventos de saída.</p> <p><i>M</i>: conjunto de todos os componente de modelo</p> <p>$EIC \subseteq DN.IN * M.IN$:</p> <p>relação de acoplamento de entradas externas</p> <p>$EOC \subseteq M.OUT * DN.OUT$:</p> <p>relação de acoplamento de saídas externas</p> <p>$IC \subseteq M.OUT * M.IN$:</p> <p>relação de acoplamento interna</p> <p>$SELECT: 2^M - \emptyset \rightarrow M$: seletor de desempate</p>

Após o modelo de comportamento lógico de um dispositivo virtual construído, é necessário definir o mapeamento de símbolos de entradas / saídas com o programa de controle correspondente, conforme a figura 4.2. Um programa PLC aciona as tarefas de um dispositivo virtual por meio de símbolos de saída e monitora o status do sistema por meio de símbolos de entrada.

Figura 4.2 – Mapeamento de símbolo de entrada / saída entre um programa de controle e um modelo DEVS lógico.



Adaptação de Lee e Park (2014)

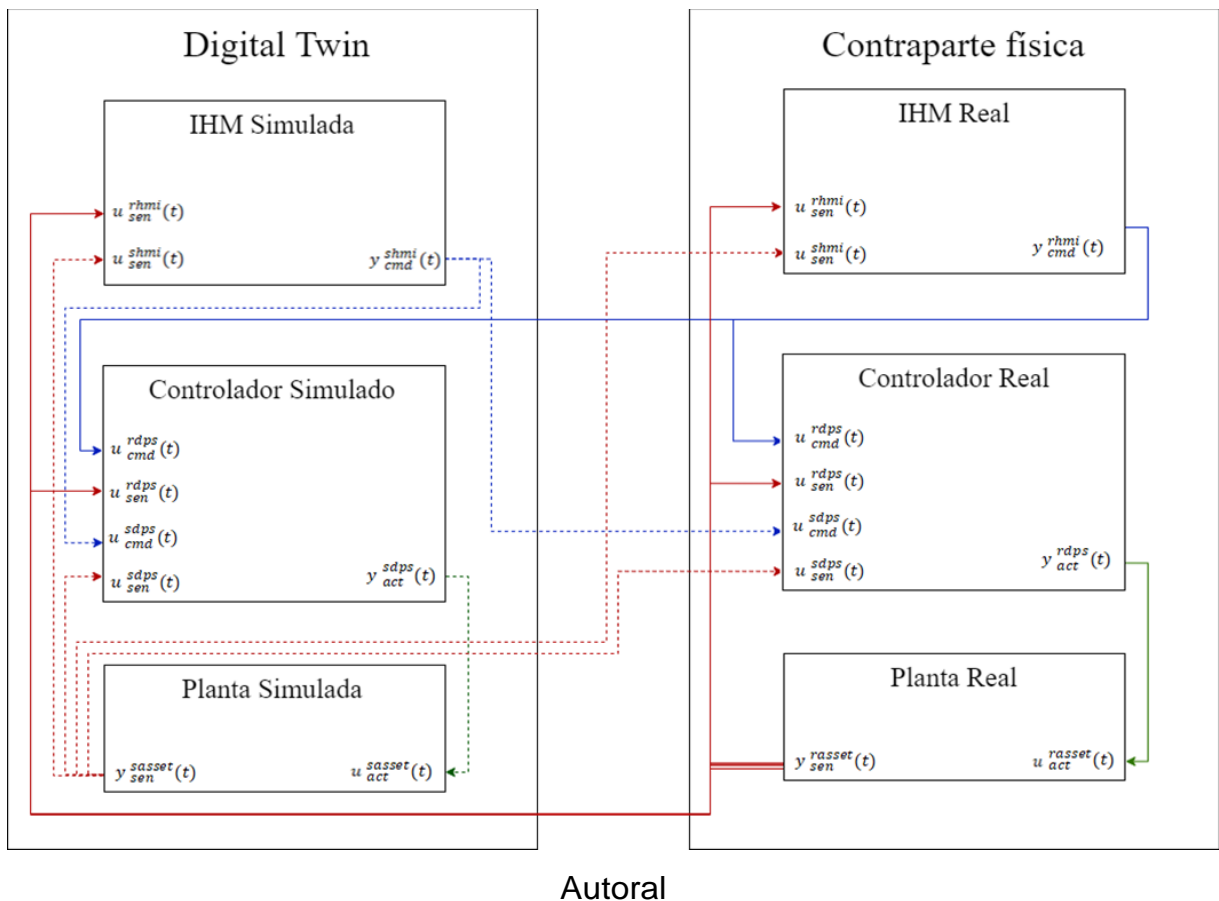
4.2. Simulação

Durante o desenvolvimento do sistema, protótipos virtuais interativos em pleno funcionamento permitem um desenvolvimento e validação orientados a objetivos, tanto no nível do componente quanto no sistema como um todo. Além disso, a tecnologia de simulação 3D não só permite visualizar, simular, testar e experimentar o protótipo virtual, fornecendo os chamados recursos de "Banco de ensaios virtual" (ROSSMANN; SCHLUSE, 2011). Mas também pode ser usada como uma estrutura de desenvolvimento para implementar algoritmos de controle e supervisão, como controladores de motor, programas de robô, algoritmos de processamento de imagem, usando conceitos de "Controle baseado em simulação" (ROSSMANN et al, 2012). Isso permite lidar com uma complexidade

cada vez maior dos sistemas a serem desenvolvidos.

Os EDTs contribuem enormemente para a visão geral do MBSE no que diz respeito à aplicação formalizada da modelagem para suportar todo o ciclo de vida, integrando a modelagem e simulação em um processo consistente. Isso se deve ao fato do uso contínuo e integrado de tecnologia de simulação em um processo de engenharia de sistemas baseado em simulação leva a processos de desenvolvimento com boa relação custo-benefício, projetos melhores e sistemas mais confiáveis.

Figura 4.3 – Modelo de virtualização baseado em EDT.



Como dito anteriormente, um EDT combina um sistema de processamento de sinal simulado com um recurso técnico simulado e uma interface homem-máquina simulada. Baseado nesse conceito, esta metodologia propõe que na etapa de virtualização, a transformação dos modelos de dispositivos e comportamento em um diagrama de fluxo de sinais baseado em EDT, ilustrado na figura 4.3. Modelo de virtualização é constituído de duas estruturas

espelhadas, Digital Twin e contraparte física, ambas contêm três estruturas, que representam um sistema produtivo: uma interface humano-máquina, um controlador e uma planta de manufatura.

A interface humano-máquina representa todas as interfaces físicas que um operador interage com a planta de manufatura. Por meio de botão, chaves, painéis luminosos, sinaleiras, ou qualquer outro dispositivo que esteja incorporado aos controladores dos ativos físicos dentro da planta. O IHM tanto da estrutura simulada quanto real, pois as entradas u_{sen}^{rhmi} , que representa os sensores da planta real, e u_{sen}^{shmi} , que representa os sensores da planta simulada. Dessa forma, temos que todos os sinais emitidos de ambas as plantas refletem uma mudança de estado em ambas as IHMs. De forma análoga, a saída dos IHMs, y_{cmd}^{shmi} e y_{cmd}^{rhmi} , enviam os sinais de comando para que o resultado se reflita em ambos os controladores.

Os controladores são responsáveis pelo processamento dos sinais de entrada tanto da contraparte digital quanto da física. A ação a ser executada após o processo é dada à parte de uma análise comparativa entre os dados físicos e virtuais. As entradas u_{cmd}^{rdps} e u_{cmd}^{sdps} recebem os comandos vindos das IHM real e simulada, respectivamente. E as entradas u_{sen}^{rdps} e u_{sen}^{sdps} recebem o conjunto de resposta dos sensores oriundos da planta física e virtual, respectivamente. O processamento realizado em ambos os controladores deve manter a informação consistente que será transmitida para a planta, por esse motivo devem se manter sempre sincronizados. Para este modelo cabe ao controlador virtual garantir a consistência de dados e alertar quando ocorrer uma falha de sincronia.

Por fim, as plantas de manufatura são os sistemas coordenados pelo controlador e a IHM. As plantas são controladas somente pelo seu respectivo controlador, ou seja, as entradas da planta real u_{act}^{rasset} recebe instruções apenas das saídas do controlador real y_{act}^{rdps} e as entradas da planta simulada u_{act}^{sasset} recebe instruções apenas das saídas do controlador simulado y_{act}^{sdps} . Por outro lado, as respostas geradas por essa planta são compartilhada para ambos os controladores e IHMs virtual e físico, y_{sen}^{sasset} e y_{sen}^{rasset} , para que esses dispositivos tenham a informação mais atualizada possível.

4.3. Virtualização

Na etapa de virtualização é gerado o ambiente virtual onde será modelado a contraparte digital. Segundo Zheng, Yang e Cheng (2018) , a plataforma de ambiente virtual é construída para estabelecer um modelo virtual tridimensional unificado para aplicação e fornece um ambiente operacional para os algoritmos de controle e operação. O Digital Twin pode acumular vários modelos, métodos e dados históricos que são criados durante a operação em uma plataforma de ambiente virtual. Para esta metodologia, o motor gráfico de jogos Unity3D é usado para construir ambientes virtuais. O Unity3D é um conjunto de software que possui vários componentes de física integrados. Ele lida com simulações físicas, ajustando algumas configurações de parâmetro, podemos criar um objeto que se comporta de maneira realista. Corpos rígidos, colisores e articulações descrevem os componentes básicos de física integrados no Unity3D, que são definidos para o desenvolvimento interativo e simulações.

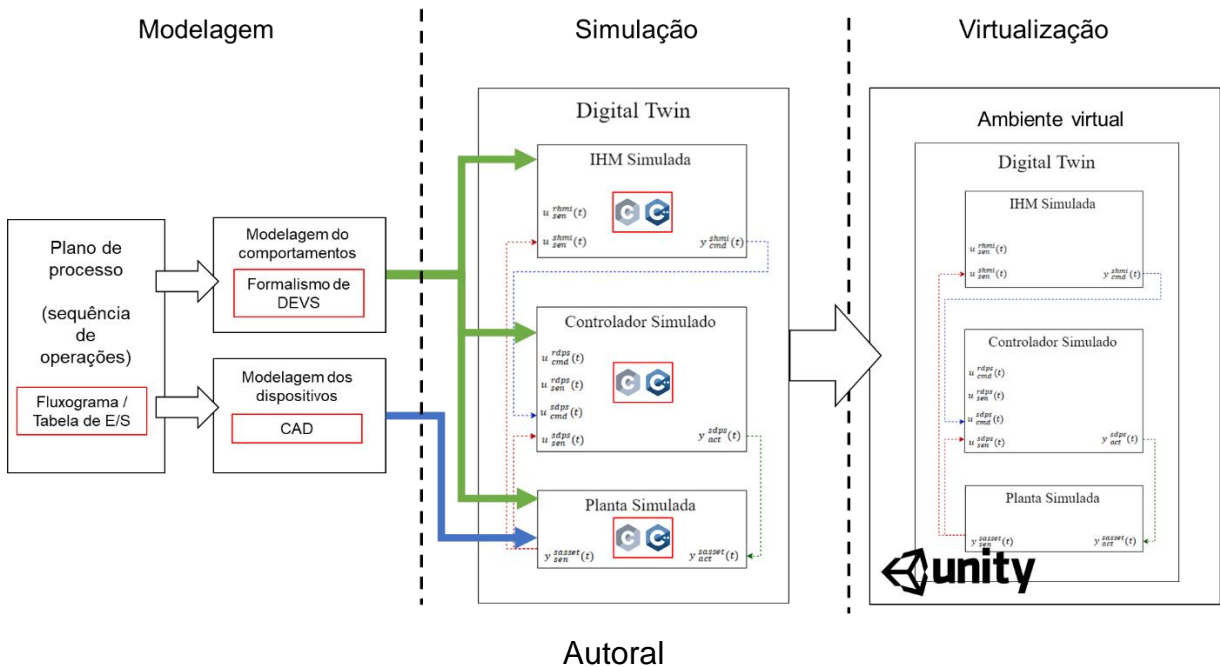
Em uma simulação, o corpo rígido é o componente mais importante. Ele habilita o comportamento físico de um objeto. Ao anexar um componente de corpo rígido a um objeto pode aplicar forças no objeto para movimentá-lo ou interagir com ele no espaço. Quando o movimento de um objeto de corpo rígido necessita ser controlado por algoritmo. Esse tipo de movimento produzido a partir de um script é conhecido como movimento cinemático. Cinemática é uma das propriedades de um corpo rígido que irá removê-lo do controle do motor de física e permitir que seja movido através de algoritmos.

Colisor é um dos componentes integrados mais importantes do Unity3D. Um componente do colisor é usado para definir as formas de colisão física entre os objetos. Colisores anexados a um objeto de corpo rígido são conhecidos como colisores dinâmicos. Diferentes materiais são usados para diferentes objetos, à medida que os colisores interagem, suas superfícies precisam simular as propriedades do material que deveriam representar. Podemos configurar o coeficiente de atrito e de elasticidade usando materiais físicos.

A Unity3D fornece diferentes articulações para diferentes cenários. Sendo possível anexar um objeto de corpo rígido a outro ou a um ponto fixo no espaço usando um componente de junta. Permitindo também que uma articulação possua alguma liberdade de movimento. A Unity3D fornece diferentes componentes de

articulação que impõem diferentes restrições, como, por exemplo, uma articulação pode quebrar quando a força aplicada a ela excede um limite definido.

Figura 4.4 – Processo de virtualização de processos de manufatura proposto.



Para virtualização do sistema de manufatura, fazemos uso das etapas realizadas anteriormente. A figura 4.4 resume o processo de virtualização de processos de manufatura proposto por esta metodologia, após definido os modelos de comportamento do sistema, esse comportamento passa a ser descrito através de uma linguagem de programação, como C e C++. Essas linguagens formam a base das estruturas de lógica e dados do Unity3D, portanto os sinais de entrada do IHM, controlador e planta são analisados e processados dentro de uma lógica de programação que reflita o comportamento esperado.

Além disso, temos a modelagem dos dispositivos da planta simulada. A simulação do comportamento precisa refletir o resultado esperado nas saídas lógicas dos dispositivos, mas também precisa converter esse comportamento em interação cinemática entre os ativos da planta. Fazendo uso dos componentes básicos da física integrada no Unity3D. Desse modo, após o processo de triangulação descrito no processo de modelagem dos dispositivos, devem ser atribuídas as propriedades de corpo rígido, colisão e articulação aos modelos dos ativos de produção para que eles possam interagir dentro de um ambiente virtual. O ambiente virtual controlado por um

motor gráfico de jogos a partir das simulações geradas pelo EDT é o resultado esperado da etapa de virtualização.

4.4. Integração

Na etapa de integração, temos a finalização do ciclo de desenvolvimento de um Digital Twin nesta metodologia proposta. Segundo Lee e Park (2014), para cumprir os critérios de comissionamento virtual e comissionamento de realidade em loop, o controlador físico deve controlar a planta virtual e o controlador virtual deve controlar a planta física. Para que esses critérios sejam incorporados ao Digital Twin, ambos os controladores devem atuar de forma semelhante e compartilhar as mesmas entradas e saídas em seus controladores.

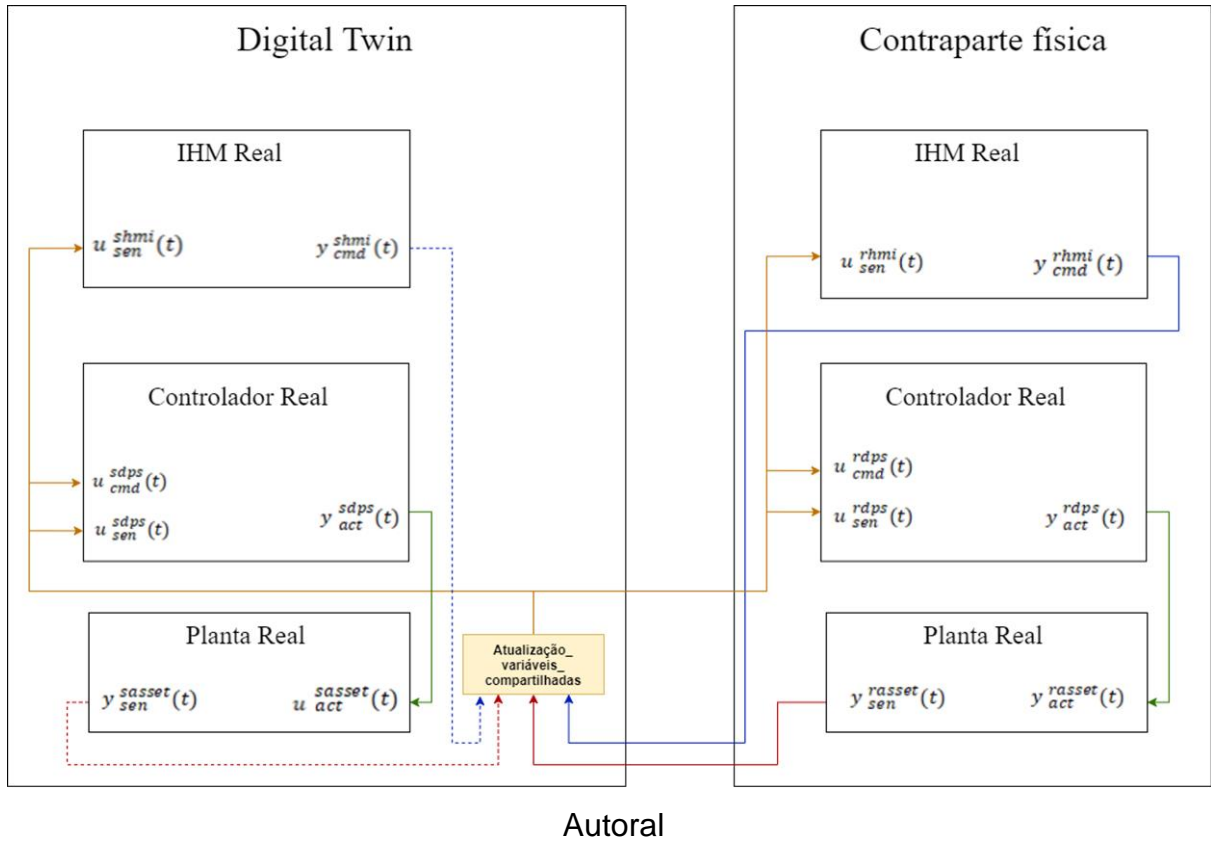
Sendo assim, ao modelar o comportamento dos dispositivos da planta deve se considerar a forma de controle físico, convertendo as operações virtuais de forma que seja possível que o controlador físico as execute. Para esta metodologia, propõe-se o mapeamento das entradas e saídas do controlador físico e que seja compartilhado com o controlador virtual. Dessa forma, as mudanças de estado que ocorra em um controlador devem obrigatoriamente refletir na sua contraparte. Para manter a consistência entre o Digital Twin e a planta física, os dados compartilhados devem consultar a mesma fonte.

Um aspecto importante para integração da contraparte virtual e física é a consistência dos dados nos controladores. Com o controlador físico e virtual alterando o estado das entradas e saídas do sistema, há concorrência durante a mudança dos estados das variáveis de ambos os sistemas. Por conta disso, esta metodologia se propõe implementar um passo de checagem das mudanças de estado antes de alterar as variáveis compartilhadas a fim de garantir a consistência nas operações dos controladores e IHM.

Na figura 4.5 temos representado no bloco Atualização variáveis compartilhadas a forma de controle via software das entradas de ambos os sistemas físico e virtual. Todas as saídas que retroalimentam os controladores são primeiramente sincronizadas para então serem redistribuídas. Para realizar o processo de sincronização é necessária uma mudança de estado das variáveis de entrada. Caso ocorra uma mudança, é gravado o novo valor da variável no local compartilhado das variáveis. Na próxima iteração, ambos os controladores

consultam as variáveis compartilhadas e iniciam a interação com os dados atualizados.

Figura 4.5 – EDT com integração ao controlador físico.



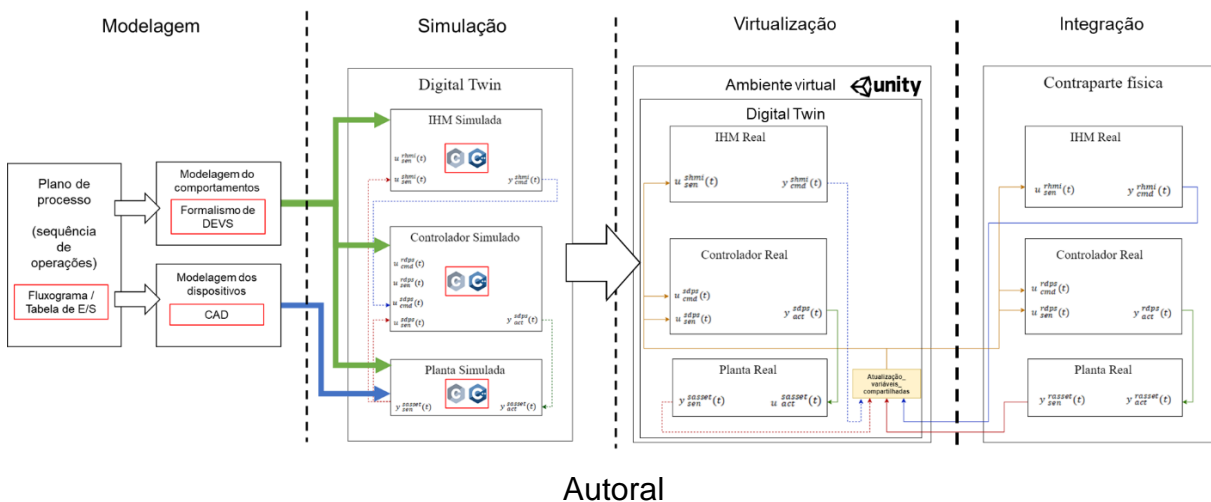
Outro aspecto importante é que nesta metodologia as configurações do Digital Twin mudam quando está configurado para integração com controlador físico em relação a configuração usada para simulação. Comparando as figuras 4.4 e 4.6, temos alterações na forma de como as variáveis de entrada são tratadas pelos controladores. No diagrama da figura 4.3, o modelo é definido para simulações geradas dentro de um ambiente virtual, dessa forma o Digital Twin espelha também um componente virtual. Já no modelo integrado ao controlador físico, no diagrama da figura 4.5, por conta da diferença de velocidade entre os acessos dos controladores à informação, o processo de sincronia se faz necessário para manter a consistência dos dados durante a operação dos controladores.

4.5. Considerações finais

A figura 4.6 lustra a proposta de metodologia para desenvolvimento de um Digital Twin em um ambiente virtual gerado pelo motor gráfico Unity3D. Dividido em quatro etapas, a metodologia propõe a criação de um modelo virtual a partir de um sistema de manufatura existente. Na etapa de modelagem, utilizamos o planejamento de processos descrito por Lee e Park (2014), para comissionamento virtual, o sistema de manufatura é simplificado e descrito em uma sequência de operações. Que após a elaboração da sequência de operações, se divide em dois estágios menores, a modelagem de dispositivos físicos e modelagem de dispositivos lógicos.

Para modelagem de dispositivos físicos, a metodologia opta pelo uso de uma ferramenta de CAD que faça integração com CAD Exchange do Unity3D, fazendo uso da técnica de design individualizado proposto por Zhang et al (2017). Dessa forma o modelo 3D pode ser convertido em um objeto virtual interativo para modelagem de dispositivos lógicos, a metodologia propõe o uso do formalismo de DEVS que gera um modelo lógico representado por um sistema de eventos discreto finito a partir do código lógico dos controladores.

Figura 4.6 – Metodologia proposta.



Após gerar os modelos lógicos e modelos 3D dos dispositivos, a metodologia propõe a geração de uma simulação por meio dos EDTs. A simulação é gerada a partir da modelagem do comportamento dos sistemas de manufatura em um diagrama de blocos de sinais contendo as três principais estruturas de um sistema de produção: a IHM, o controlador e a planta de manufatura. Nesta etapa, é feito o mapeamento das

entradas e saídas do sistema de produção e criado as variáveis de interação entre o sistema físico e o virtual. A partir destas informações pode-se descrever o comportamento lógico dos sistemas em uma linguagem de programação de alto nível, como C++. Importante destacar que, nos EDT devem ser compiladas as informações das entradas e gerar uma resposta a partir da análise destas informações, como os sistemas físicos responderiam a nível lógico. Como esse comportamento irá refletir em um ambiente virtual é tratado na etapa seguinte.

A partir das simulações geradas por meio do EDT, é gerado o ambiente virtual onde os modelos de dispositivos lógicos e dispositivos físicos irão interagir em um ambiente tridimensional que simula o espaço físico. Usando o motor gráfico de jogos Unity3D, os modelos dos ativos físicos da planta são integrados ao ambiente via CAD Exchange, convertendo um modelo 3D em um objeto virtual. A partir desses objetos, são inseridas as propriedades dos objetos virtuais como rigidez do corpo, colisão, articulações e cinemática. Além de preparar o ambiente e configurar quais propriedades físicas e de ambiente, os objetos irão reagir.

A vantagem de implementar as lógicas de comportamento em ambientes gerados por motores gráfico de jogos, é o fato de possuírem propriedades físicas integradas como gravidade, cinemática, atrito, elasticidade, sem a necessidade de considerar essas propriedades ao modelar os sistemas. Após os objetos importados para o ambiente virtual no Unity3D e as propriedades dos objetos configuradas, implementamos as regras modeladas para a IHM, o controlador e a planta durante a etapa de simulação, para refletir o comportamento da contraparte física. O Unity3D é uma ferramenta que permite a integração com outros sistemas e softwares, desse modo, podemos criar formas de interação com ambiente e interação com outros sistemas, bem como fazem os jogos eletrônicos.

A última etapa da metodologia proposta é a de integração com a contraparte física. Dentro do ambiente virtual é gerado uma verificação de consistências das variáveis de entrada do sistema. Obrigando tanto o controlador físico quanto o virtual a consultarem a mesma fonte antes de iniciar a próxima iteração no processo. Esta verificação é essencial para o funcionamento adequado do Digital Twin pois as mudanças de estados das variáveis podem vir tanto da contraparte virtual quanto da parte física, este processo mantém ambos os sistemas sincronizados apesar da diferença de execução. Este controle é implementado na contraparte virtual pois se o controlador físico pode possuir limitações de hardware, como é o caso do Controlador

Lógico Programável, a limitação do dispositivo não permite a implementação de uma verificação dessa forma. Concluindo a etapa de integração temos a consolidação de um Digital Twin implementado em um ambiente virtual gerado por um motor gráfico. Seguindo a categoria de Digital Twin descrita por Kritzinger et al. (2018) e implementando as configurações de o comissionamento virtual e comissionamento de realidade em loop propostas por Lee e Park (2014).

No próximo capítulo é feito um desenvolvimento experimental implementando em planta industrial fictícia, porém implementado usando o simulador de CLP. O objetivo é aplicar as etapas definidas dentro da metodologia proposta para gerar um Digital Twin e levantar quais os pontos positivos e negativos ao usar essa abordagem.

Capítulo 5 - Experimentos e resultados

Este capítulo descreve um estudo de caso para desenvolver um Digital Twin a partir da metodologia proposta no capítulo anterior. O sistema de manufatura a ser virtualizado é baseado numa planta de produção fictícia que realiza uma etapa de fabricação de latas. Todos os processos realizados utilizam CLPs para execução das instruções que irão interagir com o Digital Twin por meio de uma configuração de CLP espelhada em processos simulado.

A etapa de modelagem faz uso dessas informações levantadas da planta física, principalmente a respeito da lógica de comportamento implementado e os objetos físicos que devem ser modelados. A partir dos modelos de dispositivos físicos e de dispositivos lógicos gerar os EDTs para gerar a simulação em ambiente virtual. Nessa etapa, temos a integração das lógicas de comportamentos implementadas em linguagem de programação a fim de serem integradas ao ambiente virtual gerado pelo motor gráfico Unity3D.

Após gerada os EDTs, a simulação foi integrada ao ambiente virtual, bem como os objetos modelados na primeira etapa. Na etapa de virtualização, o ambiente e os objetos virtuais têm os seus aspectos físicos configurados com objetivo de espelhar o funcionamento da planta física. Depois de gerado o modelo digital em ambiente virtual, a última etapa integra os controladores virtuais com os controladores físicos simulados para que seja implementada a função de espelhamento do Digital Twin.

5.1. Planta física e planejamento de produção

Antes de iniciar a etapa de modelagem, a metodologia proposta necessita de um plano de produção definido para iniciar o processo de virtualização. Para atender tal finalidade, um processo de manufatura é proposto para ser a contraparte física do Digital Twin. A contraparte física é um sistema de manufatura automatizado que representa uma etapa de fabricação de latas. Onde o produto acabado é transportado por uma esteira e posteriormente organizado em caixas plásticas, e então as caixas são empilhadas por um braço robótico e transportadas para expedição.

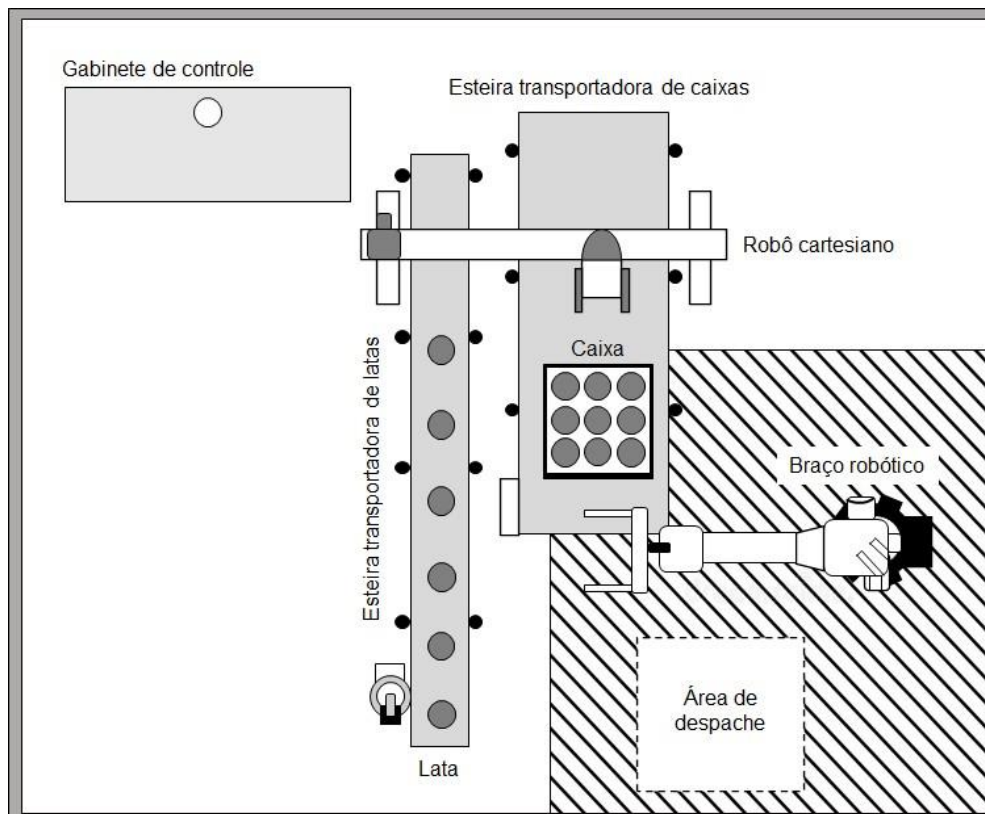
Todo processo é controlado por um conjunto de sensores e atuadores

coordenados por quatro CLPs que executam o processo de forma automática. Dividido em quatro subsistemas controlado por meio de CLP são:

1. Uma esteira transportadora de lata que representa o início do processo, em que latas são transportadas até que cheguem na posição, sinalizada por um sensor, onde o robô cartesiano possa alcançar;
2. Um robô cartesiano de transporte que se movimenta em dois eixos perpendiculares que faz o transporte das latas para o interior das caixas;
3. Uma esteira transportadora de caixa que posiciona a caixa para que o robô cartesiano possa inserir as latas, sinalizado por sensor, e depois movimenta a esteira em sentido oposto para que o braço robótico possa alcançar, também sinalizado por sensor;
4. Um braço robótico de seis eixos que transporta as caixas de latas para uma área de despacho.

A representação de um sistema de manufatura proposta para ser a planta física é ilustrada na planta baixa da linha de produção ilustrada na figura 5.1 e o comportamento dos ativos físicos é detalhado no fluxograma contido no apêndice.

Figura 5.1 – Planta baixa da célula de manufatura.



Autoral

Além do fluxograma, apresentado no apêndice B, que descreve toda a sequência de operações durante a produção. Na tabela 5.1, temos o mapeamento de todas as entradas e saídas dos controladores lógicos programáveis e suas funções dentro do processo produtivo, sendo cada subsistema é representado por uma cor. Em azul temos o CLP da esteira transportadora de latas, em verde temos o CLP do robô cartesiano, em vermelho temos o CLP da esteira transportadora de caixas, e em laranja temos o CLP do braço robótico.

Tabela 5.1 – Portas de entradas e saída do controlador físico.

Porta E/S	Tipo	Função
CanCoveyorStart	Saída Boolean	Aciona o motor que liga a esteira
CanCoveyorOn	Entrada Boolean	Botão que liga o motor da esteira
CanCoveyorSensor	Entrada Boolean	Informa se a lata foi detectada pelo sensor
LampCanAtPosition	Saída Boolean	Indicador visual que a lata foi detectada pelo sensor
GantryYPosition	Saída Float	Envia a posição no eixo Y que deve alcançar
GantryYReverse	Saída Boolean	Aciona o motor em sentido reverso que realiza os movimentos no eixo Y
GantryYStart	Saída Boolean	Aciona o motor que realiza os movimentos no eixo Y
GantryZPosition	Saída Float	Envia a posição no eixo Z que deve alcançar
GantryZReverse	Saída Boolean	Aciona o motor em sentido reverso que realiza os movimentos no eixo Z
GantryZStart	Saída Boolean	Aciona o motor que realiza os movimentos no eixo Z
CanGripperOpen	Saída Boolean	Aciona o motor pra abrir a garra
CanGripperOpened	Entrada Boolean	Informa se a garra está aberta
CanGripperClose	Saída Boolean	Aciona o motor pra fechar a garra
CanGripperClosed	Entrada Boolean	Informa se a garra está fechada
HandlingOn	Entrada Boolean	Liga todas as fontes de energia do robô cartesiano
CanCount	Entrada Integer	Conta em qual etapa de posicionamento está o robô
BoxStatus	Entrada Boolean	Informa <i>true</i> se a caixa estiver cheia e <i>false</i> se vazia
BoxConveyorStart	Saída Boolean	Aciona o motor que liga a esteira
BoxConGantrySensor	Entrada Boolean	Informa se a caixa está na posição para receber as latas
BoxConRobotSensor	Entrada Boolean	Informa se a caixa está na posição para o robô pegá-la
BoxConveyorPosition	Entrada Float	Informa a posição da caixa na esteira
BoxConBackwards	Saída Boolean	Aciona o motor para rotacionar no sentido oposto
LampBoxAtPosition	Saída Boolean	Indicador visual de que a caixa foi detectada pelos sensores
LampChangeCycle	Saída Boolean	Indicador visual de que um novo ciclo foi iniciado
StartBoxChangeCycle	Entrada Boolean	Ação manual que executa a troca de caixa na esteira
RobotGripperOpen	Saída Boolean	Aciona o motor pra abrir a garra
RobotGripperOpened	Entrada Boolean	Informa se a garra está aberta
RobotGripperClose	Saída Boolean	Aciona o motor pra fechar a garra
RobotGripperClosed	Entrada Boolean	Informa se a garra está fechada

Porta E/S	Tipo	Função
RobotPosition1	Entrada Boolean	Robô em posição para pegar a caixa
RobotPosition2	Entrada Boolean	Robô em posição para deixar a caixa
RobotStartCycle	Saída Boolean	Sinaliza o braço robótico a iniciar a operação

5.2. Modelagem dos dispositivos lógicos

A modelagem dos dispositivos lógicos utiliza o formalismo de DEVS para descrever o comportamento dos ativos da planta de manufatura em um sistema de eventos discretos finitos representado pelos modelos atômico e acoplado. Como não existe nenhuma relação de hierarquia entre os controladores, será necessário somente o uso do modelo atômico para descrição do comportamento dos controladores.

Cada controlador será representado por um modelo atômico que tem sua definição a partir do comportamento lógico descrito pelo controlador físico, em linguagem de programação. Para nosso experimento prático, o controlador descreve sua lógica em Ladder, já que CLP é um dos controladores amplamente usado em ambientes industriais.

A esteira transportadora de latas tem seu comportamento ilustrado na figura 5.2 por meio do diagrama de Ladder, a esteira funciona de forma contínua levando as latas próximas ao robô cartesiano, e tem o funcionamento do motor interrompido quando o sensor de presença detecta que a lata chegou na posição onde pode ser removida pelo robô cartesiano. A modelagem em formalismo de DEVS da esteira transportadora de latas e o modelo atômico são descritos abaixo:

$$X = \{CanConveyorStart, LampCanAtPosition\}$$

$$S = \{Acionado, Parado\}$$

$$Y = \{CanConveyorOn, CanConveyorSensor\}$$

$$\delta_{int}(Acionado) = Parado$$

$$\delta_{int}(Parado) = Acionado$$

$$\delta_{ext}(Parado, CanConveyorStart) = Acionado$$

$$\delta_{ext}(Acionado, LampCanAtPosition) = Parado$$

$$\lambda(Acionado) = CanConveyorSensor$$

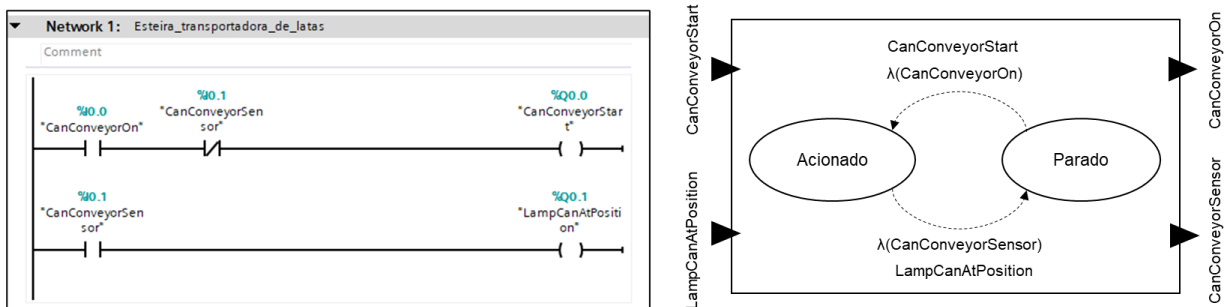
$$\lambda(Parado) = CanConveyorOn$$

$$t_a(Acionado) = t_1$$

$$t_a(\textit{Parado}) = t_2$$

O dispositivo virtual para esteira transportadora de latas no modelo de DEVS possui dois estados de sequência: o estado *Acionado*, onde o motor da esteira está ligado, e o estado *Parado*, onde o motor da esteira está desligado. Nesse modelo temos a possibilidade da troca do estado *Acionado* para o *Parado*, a partir da emissão do sinal *LampCanAtPosition* oriunda da função de transição externa que indica a detecção da lata no sensor de presença, que por sua vez desencadeia a função de saída do sinal *CanConveyorSensor*. A mudança do estado *Parado* para *Acionado*, a emissão do sinal *CanConveyorStart* oriunda da função de transição externa que indica o acionamento da esteira, que por sua vez desencadeia a função de saída do sinal *CanConveyorOn*.

Figura 5.2 – Modelo de DEVS: Esteira transportadora de latas.



Autoral

O robô cartesiano movimenta-se em dois eixos, o eixo Z representa os movimentos verticais, usados para pegar e deixar as latas. O eixo Y representa os movimentos horizontais, usados para transportar as latas nas três posições programadas. A *posição Z1* é a posição no eixo Z na altura máxima vertical, para transportar as latas da esteira para caixa em segurança, e a *posição Z2* é a posição no eixo Z que o robô cartesiano pode pegar a lata ou deixá-la na caixa. As posições Y1, Y2, Y3 e Y4 são posições no eixo Y que representam, respectivamente, a posição acima da esteira de latas, a primeira posição da lata na caixa, a segunda posição da lata na caixa e a terceira posição da lata na caixa. A modelagem em formalismo de DEVS do robô cartesiano é ilustrado na figura 5.3 e o algoritmo de controle escrito em Ladder no apêndice C. O modelo atômico descrito abaixo:

$$X = \{GantryYReverse, CanGripperOpen, GantryYStart, GantryZReverse, \\ CanGripperClose, GantryZStart\}$$

$$S = \{Posição Z1, Posição Z2, Posição Y1, Posição Y2, Posição Y3, Posição Y4\}$$

$$Y = \{GantryYPosition, CanGripperClosed, CanGripperOpened, \\ GantryZPosition, CanCount, CanConveyorSensor\}$$

$$\delta_{int}(Posição Z1) = Posição Z2, Posição Y1, Posição Y2, Posição Y3, Posição Y4$$

$$\delta_{int}(Posição Z2) = Posição Z1$$

$$\delta_{int}(Posição Y1) = Posição Z1, Posição Y2, Posição Y3, Posição Y4$$

$$\delta_{int}(Posição Y2) = Posição Z1, Posição Y1$$

$$\delta_{int}(Posição Y3) = Posição Z1, Posição Y1$$

$$\delta_{int}(Posição Y4) = Posição Z1, Posição Y1$$

$$\delta_{ext}(Posição Z1, [CanGripperClose, CanGripperOpen]) = Posição Z2$$

$$\delta_{ext}(Posição Z2, GantryZReverse) = Posição Z1$$

$$\delta_{ext}(Posição Z1, GantryYStart) = Posição Y1, Posição Y2, Posição Y3, \\ Posição Y4$$

$$\delta_{ext}([Posição Y1, Posição Y2, Posição Y3, Posição Y4], GantryZStart) \\ = Posição Z1$$

$$\delta_{ext}(Posição Y1, GantryYStart) = Posição Y2, Posição Y3, Posição Y4$$

$$\delta_{ext}([Posição Y2, Posição Y3, Posição Y4], GantryYReverse) = Posição Y1$$

$$\lambda (Posição Z1) = CanCount, GantryZPosition, CanGripper, GantryYPosition$$

$$\lambda (Posição Z2) = CanCount, GantryZPosition$$

$$\lambda (Posição Y1, Posição Y2, Posição Y3, Posição Y4) \\ = CanCount, GantryYPosition$$

$$t_a(Posição Z1) = t_3$$

$$t_a(Posição Z2) = t_4$$

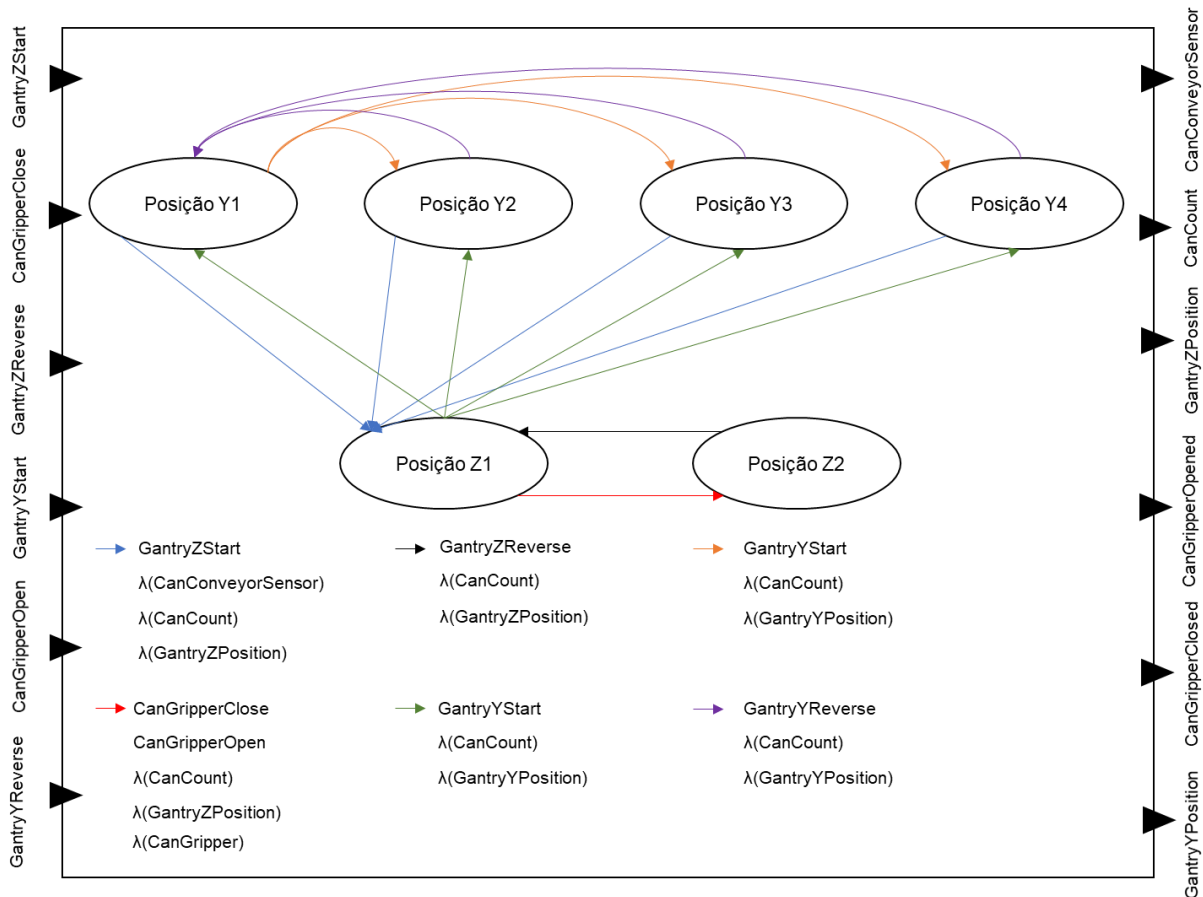
$$t_a(Posição Y1) = t_5$$

$$t_a(Posição Y2, Posição Y3, Posição Y4) = t_6$$

O robô cartesiano dentre os dispositivos virtuais é o que possui o modelo mais complexo. Ele possui seis estados de sequência que representam quais posições que devem se mover e quais ações devem executar. A transição iniciada pelo sinal *GantryZStart* entre os estados *Posição Y1* e *Posição Z1*, representada pela seta azul, vem da função de transição externa que sinalizam que indica que a lata está pronta para ser retirada, desencadeando a função de saída *CanConveyorSensor*.

A transição da *Posição Z1* e *Posição Z2*, representada pela seta vermelha, é feita pelo sinal *CanGripperClose* ou *CanGripperOpen* que vêm das funções de transição externa que sinalizam que o robô deve pegar ou soltar a lata, desencadeando as funções de saída do sinal *CanGripper*. A transição de estados da *Posição Z2* para *Posição Z1*, representada pela seta preta, é desencadeada pelo sinal *GantryZReverse*, uma função de transição externa que indica que o robô deve retornar à posição Z1, que sinaliza as funções de saída *CanCount* e *GantryZPosition*. Esse comportamento se repete para as todas as transições de estados de sequência por conta dos movimentos dos eixos do robô.

Figura 5.3 – Modelo de DEVS: Robô cartesiano.



Autoral

A esteira transportadora de caixas funciona de forma semelhante a esteira transportadora de latas, com diferença de que possui dois sensores de presença, um para detectar se a caixa está em posição para que o robô cartesiano deposite as latas, e outro para detectar se está em posição para que o braço robótico pegue a caixa.

Além disso, é implementado no controlador uma lógica de posicionar a caixa de forma que ao receber três latas a esteira, desloca a caixa para o robô cartesiano posicionar uma nova fileira de latas. Na figura 5.4, temos a modelagem em formalismo de DEVS do braço robótico. Com o modelo atômico descrito abaixo:

$$X = \{BoxConveyorStart, LampBoxAtPosition, BoxConBackwards\}$$

$$S = \{Cartesiano, Posição 1, Posição 2, Posição 3, Braço\}$$

$$Y = \{BoxConRobotSensor, BoxConveyorPosition, BoxConGantrySensor, \\ BoxStatus\}$$

$$\delta_{int}(Cartesiano) = Posição 1$$

$$\delta_{int}(Posição 1) = Posição 2$$

$$\delta_{int}(Posição 2) = Posição 3$$

$$\delta_{int}(Posição 3) = Braço$$

$$\delta_{int}(Braço) = Cartesiano$$

$$\delta_{ext}(Cartesiano, [BoxConveyorStart, LampBoxAtPosition]) = Posição 1$$

$$\delta_{ext}(Posição 1, [BoxConveyorStart, LampBoxAtPosition]) = Posição 2$$

$$\delta_{ext}(Posição 2, [BoxConveyorStart, LampBoxAtPosition]) = Posição 3$$

$$\delta_{ext}(Posição 3, [BoxConveyorStart, LampBoxAtPosition]) = Braço$$

$$\delta_{ext}(Braço, [BoxConBackwards, LampBoxAtPosition]) = Cartesiano$$

$$\lambda(Cartesiano) = BoxStatus, BoxConGantrySensor$$

$$\lambda([Posição 1, Posição 2, Posição 3]) = BoxStatus, BoxConveyorPosition$$

$$\lambda(Braço) = BoxStatus, BoxConRobotSensor$$

$$t_a(Cartesiano) = t_6$$

$$t_a(Posição 1) = t_7$$

$$t_a(Posição 2) = t_8$$

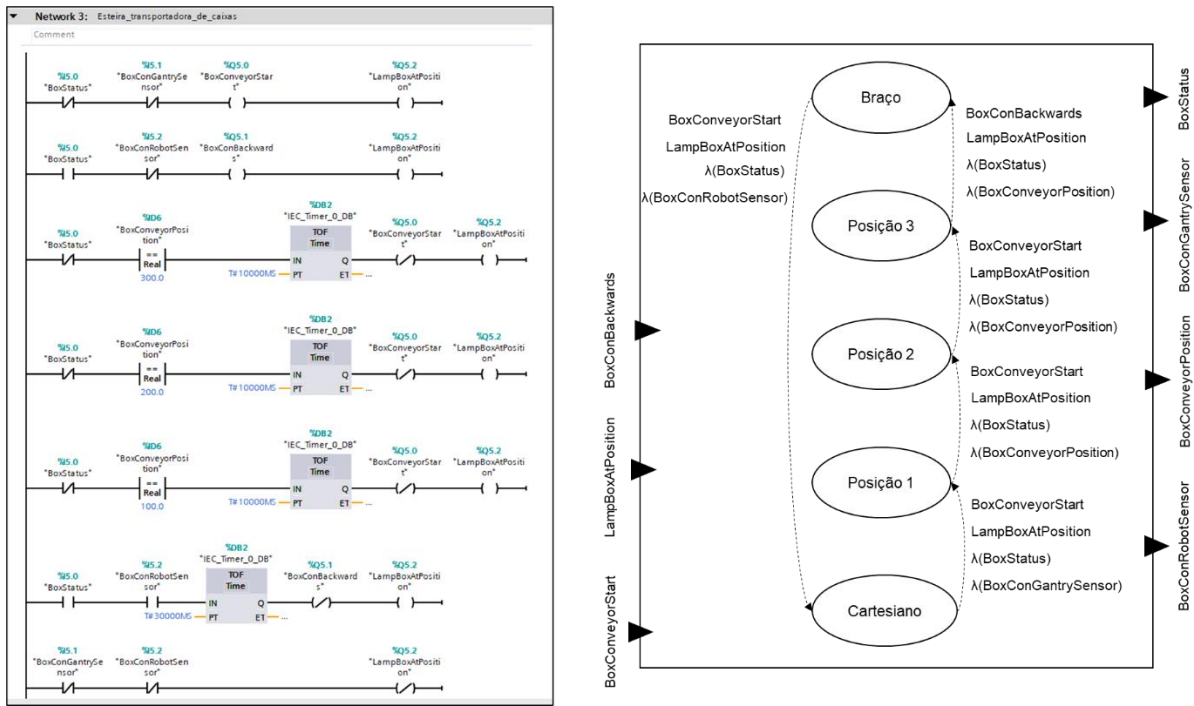
$$t_a(Posição 3) = t_9$$

$$t_a(Braço) = t_{10}$$

O dispositivo virtual da esteira transportadora de caixas possui cinco estados de sequência. A transição do estado *Cartesiano* para *Posição 1* é ativado pelo sinal *LampBoxAtPosition* que movimenta a esteira até o momento que o sensor de presença detecta que a caixa está em posição para o robô cartesiano depositar as latas. Também desencadeando nas funções de saída *BoxStatus* e *BoxConGantrySensor*. Esse padrão se repete nas transições da *Posição 1* para *Posição 2*, da *Posição 2* para *Posição 3*, e da *Braço* para *Cartesiano*. Mudando na

transição do estado *Posição 3* para *Braço*, onde o sinal de ativação é feito pelo *BoxConBackwards* oriundo da função de transição externa que indica que o motor da esteira irá rotacionar em sentido posto em direção ao braço robótico. Desencadeando nas funções de saída *BoxStatus* e *BoxConRobotSensor*.

Figura 5.4 – Modelo de DEVS: Esteira transportadora de caixas.



Autorial

Na figura 5.5, temos a modelagem em formalismo de DEVS do braço robótico. Com o modelo atômico descrito abaixo:

$$X = \{RobotGripperOpen, RobotStartCycle, RobotGripperClose\}$$

$$S = \{Empilha, Retorna\}$$

$$Y = \{BoxConRobotSensor, RobotPosition1, RobotGripperOpened, RobotPosition2, RobotGripperClosed\}$$

$$\delta_{int}(Empilha) = Retorna$$

$$\delta_{int}(Retorna) = Empilha$$

$$\delta_{ext}(Empilha, [RobotGripperClose, RobotStartCycle]) = Retorna$$

$$\delta_{ext}(Retorna, RobotGripperOpen) = Empilha$$

$$\lambda(Empilha) = RobotPosition1, BoxConRobotSensor, RobotGripperOpened$$

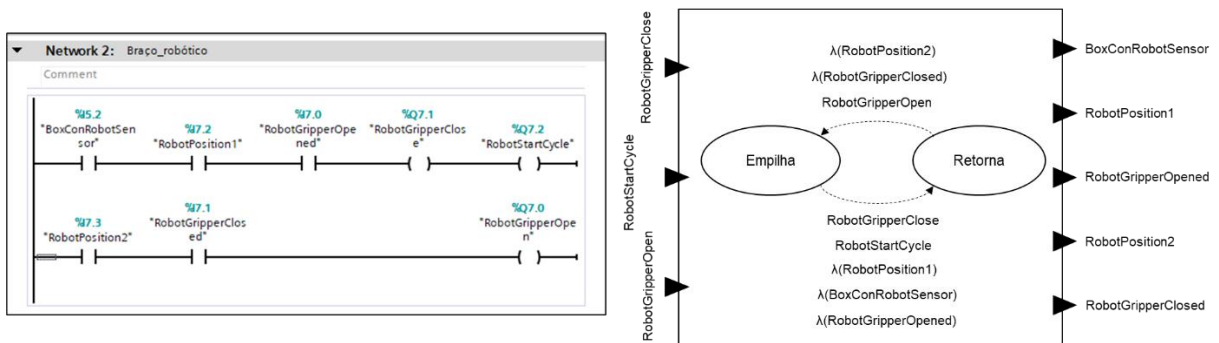
$$\lambda(Retorna) = RobotPosition2, RobotGripperClosed$$

$$t_a(\text{Empilha}) = t_{11}$$

$$t_a(\text{Retorna}) = t_{12}$$

O braço robótico possui dois estados de sequência: *Empilha* e *Retorna*. Mudança de estado de *Empilha* para *Retorna* é acionado pela emissão em conjunto dos sinais de *RobotStartCycle* e *RobotGripperClose* que indica que o braço robótico está pronto para executar o processo de empilhar. Desencadeando também os sinais *RobotPosition1*, *BoxConRobotSensor* e *RobotGripperOpened* das funções de saída.

Figura 5.5 – Modelo de DEVS: Braço robótico



Autoral

5.3. Simulação

Com o comportamento dos dispositivos virtuais modelados a partir do formalismo de DEVS, temos o ponto de partida para gerar as simulações por meio dos EDTs. Já que modelo de DEVS descreve as entradas do dispositivo virtual a partir das saídas do controlador e as saídas do dispositivo como retroalimentação das entradas do controlador. Inserindo no contexto do EDT, o modelo de DEVS possui as características que representa a planta simulada do EDT, sendo assim, temos o comportamento da planta modelado a partir de sistema de eventos discretos que tem seus parâmetros manipulados por um controlador e IHM que simula o comportamento da contraparte física. As simulações geradas a partir do EDT são escritas em linguagem de programação que permite a interpretação feita pelo ambiente virtual gerada pelo Unity3D. Por esse motivo, os scripts de comportamento dos modelos lógicos incorporam as ferramentas de física integrada do Unity3D.

No ambiente virtual gerado pelo Unity3D, os movimentos e interações dos objetos se dão a partir de duas formas. Do resultado da ação e reação dos objetos

com a física integrada no ambiente, ou por meio dos movimentos cinemáticos descrito por scripts. Os scripts, por sua vez, podem ser gerados a partir das bibliotecas de animação padrão da ferramenta. Isso permite que os componentes presentes no ambiente virtual atuem de acordo com as regras de interação definido em arquivos descritos em linguagem de programação de alto nível.

Para gerar variedade de comportamento e possibilidade de simulações, os scripts são parametrizados por meio de variáveis virtuais, ou seja, variáveis que existem apenas no espaço virtual. Porém no contexto de EDT, algumas das variáveis devem compartilhar informações em comum com o meio físico, que nesta metodologia, são as entradas e saídas do controlador físico. Estes parâmetros compartilhados entre os controladores físico e virtual são armazenados em arquivos XML, para atender os critérios de resposta do modelo virtual ao modelo físico (LU et al., 2019a; MORENO et al., 2017; UM; WEYER; QUINT, 2017). Esse modo de armazenamento permite que a mudança de parâmetros ocorra de forma veloz, na unidade computacional onde o modelo digital está sendo processado.

Tabela 5.2 – Scripts da planta simulada para a esteira transportadora de latas.

Script	Variáveis virtuais	E/S compartilhadas
Drive	Speed: Integer	CanConveyorStart CanConveyorOn
Conveyor	FrictionRate: Integer	-
Sensor	-	CanConveyorSensor LampCanAtPosition

Na tabela 5.2, temos a descrição dos scripts que simulam o comportamento da esteira transportadora de latas, dividido em *Drive*, *Conveyor* e *Sensor*, cada um deles trata de um aspecto importante do dispositivo virtual que está representando. O script *Drive* trata do funcionamento do motor acoplado a esteira, ele tratada do acionamento e informa se motor está em funcionamento por meio das portas compartilhadas, possui também uma variável virtual que atua somente no ambiente virtual que controla a velocidade de funcionamento do motor. O script *Conveyor* possui apenas uma variável virtual que regula o coeficiente de atrito entre a lata e a esteira. O script *Sensor* trata das entradas e saídas compartilhadas do sensor de presença que detecta a lata e emite o sinal que informa que foi detectada.

Na tabela 5.3, temos a descrição dos scripts que simulam o comportamento do

robô cartesiano, dividido em *Drive_GantryZ*, *Drive_GantryY* e *Grip*. O script *Drive_GantryZ* faz o controle dos movimentos do robô no eixo Z, acionando o motor que movimentava o eixo nos dois sentidos por meio das variáveis *GantryZStart* e *GantryZReverse*, informando a posição no eixo Z com *GantryZPosition*, quando deve mudar para o próximo estado com *CanCount* e se o robô cartesiano está operando com *HandlingOn*. No script *Drive_GantryY* opera de forma análoga ao *Drive_GantryY*, mas para o eixo Y. O script *Grip* controla a garra que pega as latas, acionando o motor para pegar ou largar a latas por meio das entradas e saídas compartilhadas *CanGripperOpen* e *CanGripperClose*, e informando em que estado se encontram *CanGripperOpened* e *CanGripperClosed*.

Tabela 5.3 – Scripts da planta simulada para o robô cartesiano.

Script	Variáveis virtuais	E/S compartilhadas
Drive_GantryZ	Speed: Integer	GantryZPosition GantryZReverse GantryZStart HandlingOn CanCount
Drive_GantryY	Speed: Integer	GantryYPosition GantryYReverse GantryYStart HandlingOn CanCount
Grip	Speed: Integer FrictionRate: Integer	CanGripperOpen CanGripperOpened CanGripperClose CanGripperClosed HandlingOn CanCount

Na tabela 5.4, temos a descrição dos scripts que simulam o comportamento da esteira transportadora de caixas, dividido em *Drive*, *Conveyor*, *SensorGantry* e *SensorRobot*. O script *Drive* realiza as operações de controle do motor da esteira de forma semelhante ao da esteira transportadora de latas, mas também movimentava a esteira em sentido contrário com *BoxConBackwards*. No script *Conveyor* é adicionado uma nova entrada compartilhada *BoxConveyorPosition* que indica a posição da caixa

na esteira. Os scripts *SensorGantry* e *SensorRobot* controlam as informações relacionadas aos sensores de presença na esteira. O *BoxStatus* sinalizando a direção que a esteira deve seguir. O *BoxConGantrySensor* e o *BoxConRobotSensor* informam se a caixa foi detectada pelos sensores. O *LampBoxAtPosition* e *LampChangeCycle* informam visualmente se a caixa foi detectada pelos sensores e o braço robótico iniciou o processo de troca da caixa, respectivamente. O *StartBoxChangeCycle* aciona manualmente o processo de troca da caixa.

Tabela 5.4 – Scripts da planta simulada para a esteira transportadora de caixas.

Script	Variáveis virtuais	E/S compartilhadas
Drive	Speed: Integer	BoxConveyorStart BoxConBackwards
Conveyor	FrictionRate: Integer	BoxConveyorPosition
SensorGantry	-	BoxStatus BoxConGantrySensor LampBoxAtPosition
SensorRobot	-	BoxStatus BoxConRobotSensor LampBoxAtPosition LampChangeCycle StartBoxChangeCycle

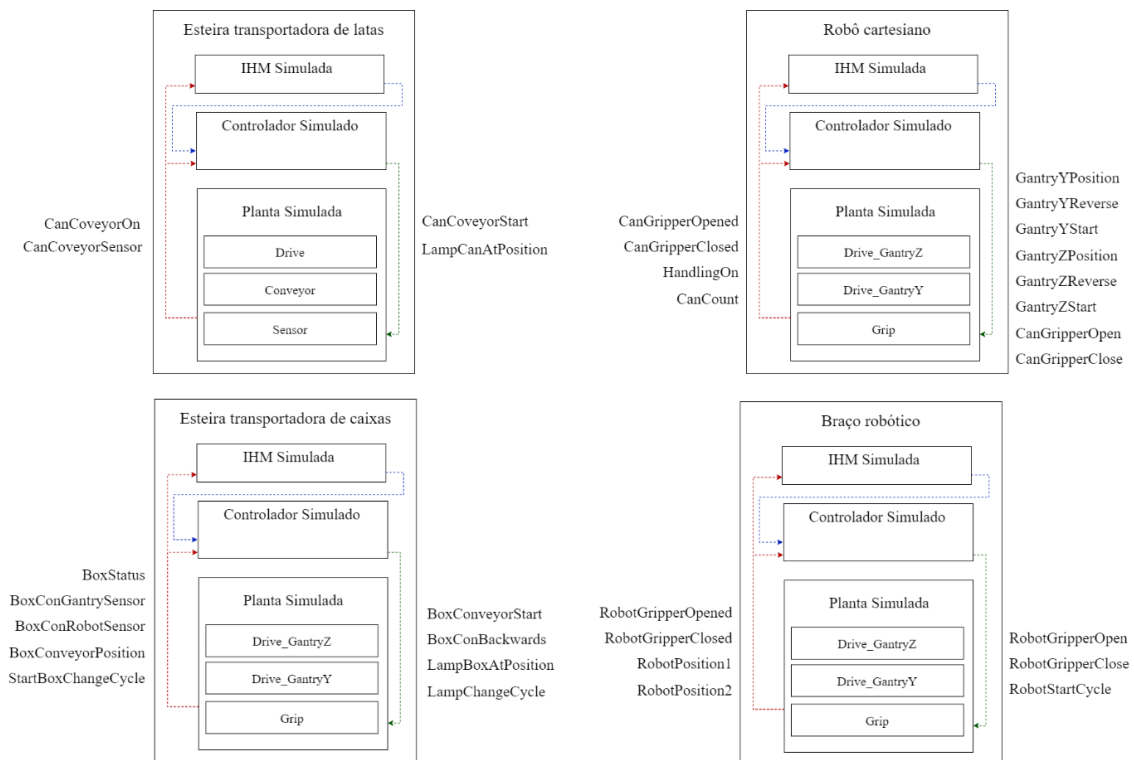
Na tabela 5.5, temos a descrição dos scripts que simulam o comportamento do braço robótico dividido em *Robot* e *Grip*. O script *Robot* realiza todos os movimentos que o braço robótico deve fazer para realizar o seu processo de coletar e trocar de caixa, as entradas e saídas compartilhadas *RobotPosition1* e *RobotPosition2* informam ao robô qual posição ele deve atingir e *RobotStartCycle* inicia o processo.

Tabela 5.5 – Scripts da planta simulada para o braço robótico.

Script	Variáveis virtuais	E/S compartilhadas
Robot	Speed: Integer	RobotPosition1 RobotPosition2 RobotStartCycle
Grip	FrictionRate: Integer	RobotGripperOpen RobotGripperOpened RobotGripperClose RobotGripperClosed

Os componentes de IHM e controlador do EDT são definidos a partir do comportamento das suas contrapartes físicas. Como a planta simulada é gerada a partir do modelo de DEVS que por sua vez usa como referência os diagramas de Ladder que descrevem o comportamento do controlador físico. É factível que os componentes virtuais repliquem o comportamento dos físicos. Na figura 5.6, temos o diagrama de simulação dos dispositivos físicos usando EDTs, a partir destes diagramas pode-se iniciar o processo de virtualização do sistema de manufatura através do motor gráfico de jogos.

Figura 5.6 – EDT dos dispositivos virtuais.



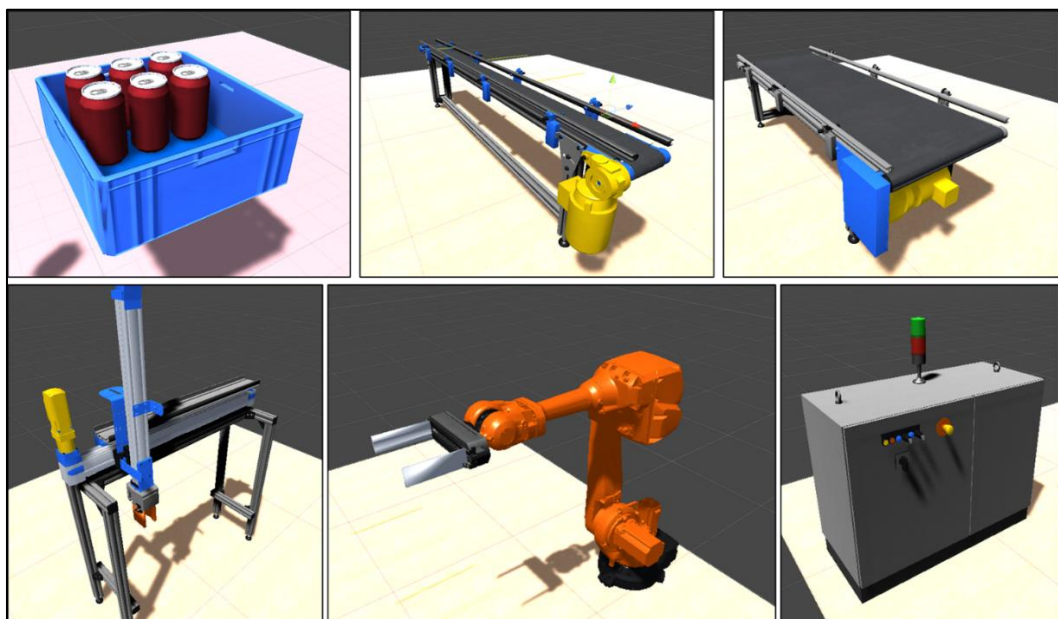
Autoral

5.4. Virtualização

Na etapa de modelagem, um dos processos necessários para virtualização em ambiente virtual é a modelagem dos dispositivos físicos. Na metodologia proposta, a modelagem desses dispositivos é feita por meio de modelo 3D criados em softwares CAD que são convertidos em objetos interativos por meio do plugin CAD Exchanger. A figura 5.7 ilustra todos os objetos 3D, disponibilizados de forma gratuita no site

MySolidWorks (<https://my.solidworks.com/cadmodels>) que foram modelados em SolidWorks e posteriormente convertidos para o ambiente virtual. No entanto, os objetos ainda não possuem suas características físicas definidas que descreve como o objeto vai interagir no ambiente virtual. Na etapa de virtualização, são atribuídas as características básicas aos objetos virtuais: corpo rígido, colisão e articulações. Essas propriedades irão definir de forma básica como os objetos irão interagir neste ambiente virtual.

Figura 5.7 – Modelo dos dispositivos físicos.



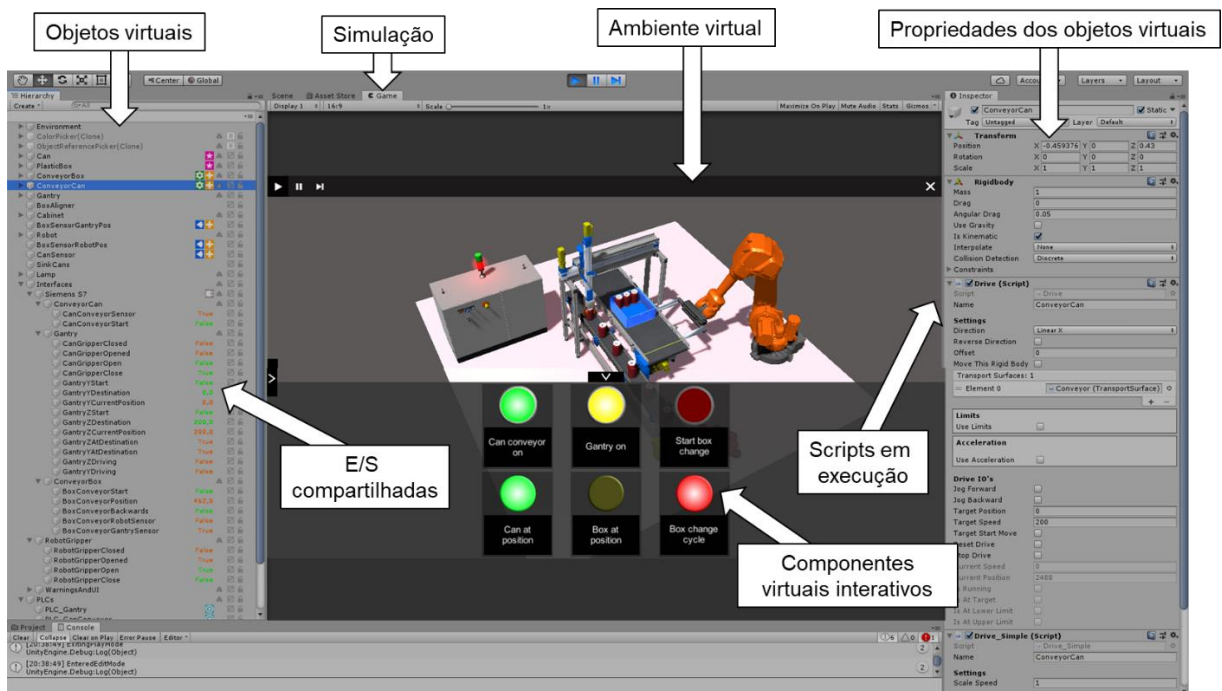
Autoral

O Unity3D é uma ferramenta que gera ambientes virtuais a partir do motor gráfico de jogos. Assim como os jogos eletrônicos, esses ambientes possuem capacidade de imersão e interação com seus componentes virtuais. A figura 5.8 mostra a tela de edição desses ambientes e como fazer uso da física integrada através das propriedades físicas dos objetos. Primeira etapa para configuração é o ambiente em si, o Unity3D se organiza em uma hierarquia de pastas que também se comporta como uma hierarquia de classes em programação orientada a objetos.

Na aba Hierarchy, temos listado todos os objetos virtuais, o ambiente em si também é um objeto que interage com os dispositivos físicos, nele é configurado algumas propriedades básicas como passagem de tempo no ambiente, cinética dos objetos, iluminação e fontes de luz do ambiente, câmeras que moldam como vemos o ambiente virtual, e outras propriedades. Cada objeto tem suas propriedades definidas

na aba Inspector e anexado os scripts que executam o comportamento implementado. O ambiente virtual, presente no centro da figura 5.8, mostra os objetos virtuais posicionados no espaço e é possível gerar uma simulação da planta virtual funcionando na opção “Game” que gera o ambiente virtual juntamente com os componentes virtuais que interagem com ele.

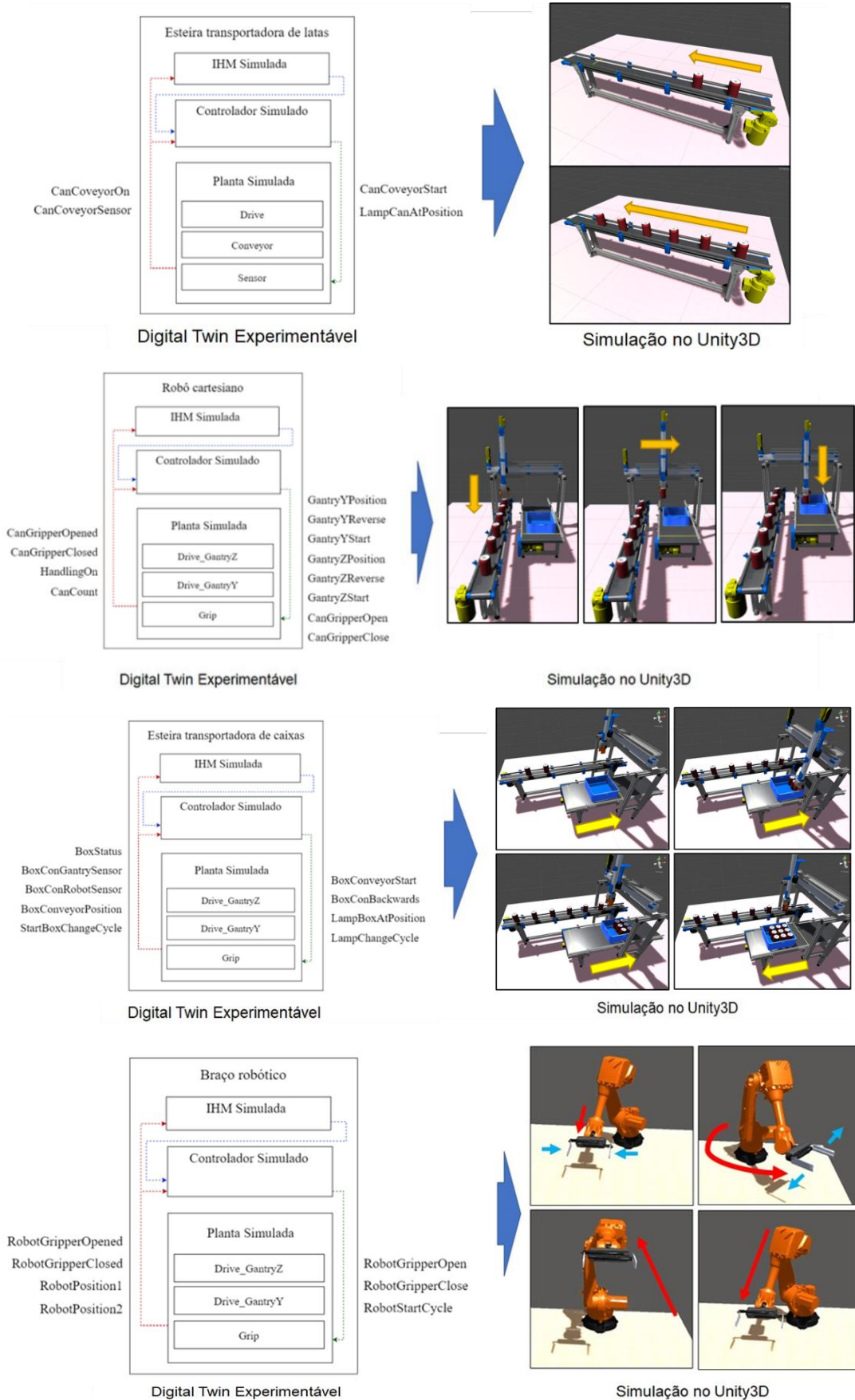
Figura 5.8 – Ambiente virtual no Unity3D.



Autorial

Nesse processo de virtualização, cada um dos dispositivos virtuais é configurado a partir dos scripts definidos na etapa de simulação gerada pelos EDTs. A figura 5.9 abaixo mostra como é realizado o processo de virtualização dos dispositivos físicos. Os comportamentos descritos nos scripts são implementados no ambiente virtual correspondendo aos movimentos cinemáticos que os objetos virtuais precisam executar para corresponder ao comportamento realizado na contraparte física. As entradas e saídas compartilhadas e as variáveis virtuais alteram o comportamento dos scripts e desencadeiam na animação cinemática dos objetos virtuais replicando a contraparte física. Essa etapa representa uma grande vantagem para criação de Digital Twin, pois os modelos virtuais desses sistemas são gerados automaticamente por meio a física integrada no motor gráfico, que é resultado de um consolidado desenvolvimento de jogos que buscam aproximar de resultados reais.

Figura 5.9 – Virtualização dos dispositivos físicos



5.5. Integração

O TIA Portal é uma ferramenta da Siemens para configuração, programação, e compilação de código para CLPs que utilizam o padrão de programação STEP 7. Ilustrado na figura 5.10, a ferramenta que permite monitorar as entradas e saídas de um CLP Siemens em tempo de execução, por meio do diagrama Ladder embarcado no controlador. Os dados de controle do CLP são replicados e organizados em tags, podendo acessá-los através do TIA Portal. Ao configurar o CLP no modo observador podemos monitorar e atuar nas tags que armazenam os dados das entradas e saídas do controlador. Todas as tags correspondem às variáveis de entrada e saída do controlador físico e conseqüentemente do virtual.

Figura 5.10 – Algoritmos do controlador físico e variáveis compartilhadas.

Name	Tag table	Data type	Address	Retain	Access	Write	Visible
1	CanConveyorStart	Bool	%Q0.0				
2	CanConveyorSensor	Bool	%I0.1				
3	CanConveyorOn	Bool	%I0.0				
4	LampCanAPosition	Bool	%Q0.1				
5	BoxConveyorStart	Bool	%Q5.0				
6	BoxConveyorEnd	Bool	%Q5.1				
7	LampConveyorPosition	Bool	%Q5.2				
8	LampChangeCycle	Bool	%Q5.3				
9	GantryPosition	Real	%D2				
10	GantryStart	Bool	%Q1.0				
11	GantryPosition	Real	%D3				
12	GantryStart	Bool	%Q1.1				
13	CanGripperOpen	Bool	%Q1.2				
14	CanGripperClose	Bool	%Q1.3				
15	CanGripperOpened	Bool	%I1.2				
16	CanGripperClosed	Bool	%I1.3				
17	HandlingOn	Bool	%I1.4				
18	CanBoxChangeCycle	Bool	%I5.3				
19	RobotGripperOpen	Bool	%Q7.0				
20	RobotGripperClose	Bool	%Q7.1				
21	RobotGripperOpened	Bool	%I7.0				
22	RobotGripperClosed	Bool	%I7.1				
23	RobotStartCycle	Bool	%Q7.2				
24	CanCount	Int	%QW4				
25	BoxStatus	Int	%I5.0				
26	BoxConveyorSensor	Bool	%I5.1				
27	BoxConveyorEnd	Bool	%I5.2				
28	BoxConveyorPosition	Real	%D6				
29	RobotPosition1	Real	%I7.2				
30	RobotPosition2	Real	%I7.3				
31	GantryReverse	Bool	%Q1.4				
32	GantryReverse	Bool	%Q1.5				
33	<Add new>						

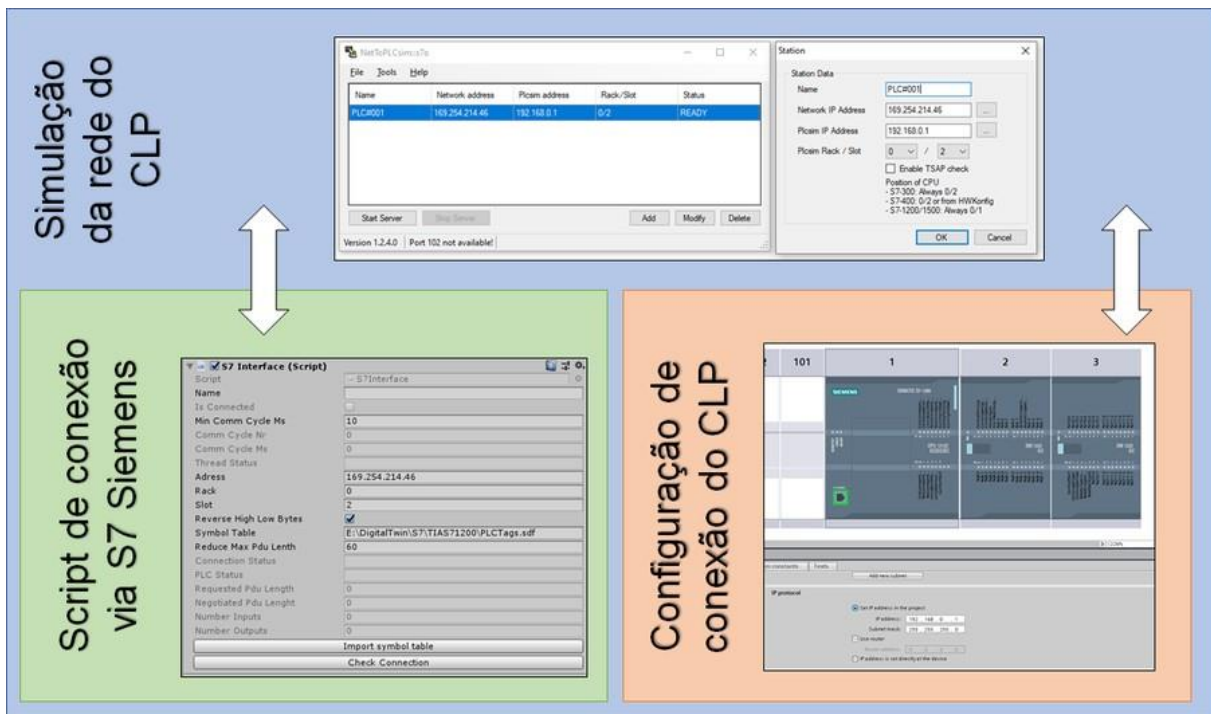
Autoral

As mudanças que ocorrem no controlador virtual são propagadas para as tags no TIA Portal que estão armazenadas no computador onde a ferramenta está sendo executada. Dessa forma, o sincronismo entre o controlador físico e o virtual é mantido através da atualização constante das variáveis compartilhadas. Para atuar no meio físico, os algoritmos que controlam a planta física são os códigos em linguagem Ladder embarcados no CLP via TIA Portal, como os exemplos

ilustrados na figura 5.10. Durante a execução do processo, as entradas e saídas do PLC alteram de valor e essa mudança é refletida nas tags. Quando a mudança ocorre pelo controlador virtual, é alterado o valor na tags que atualiza o controlador físico, mudando os processos que estão em execução no CLP.

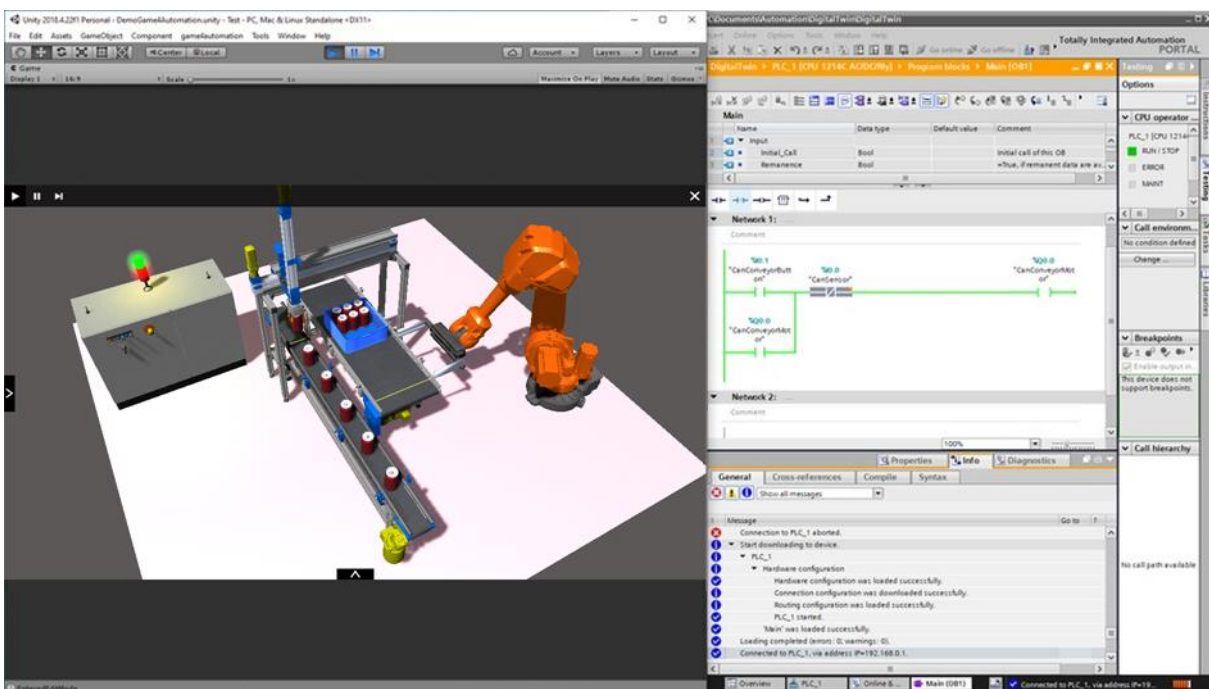
Outra ferramenta importante para integração é a NetToPLCSim S7, que permite a criação de uma rede local que interfacea a rede do CLP com a placa de rede local. Isso permite que o CLP físico visualize o CLP virtual como um CLP conectado a mesma rede e consulte a tabela das E/S compartilhadas para fazer suas mudanças de estado. Para que ocorra a comunicação entre o modelo digital e o físico, é necessário simular uma rede onde o controlador virtual e físico estejam conectados. Ao gerar uma rede simulada de CLPs, é feito o endereçamento de IP “169.254.214.46” do controlador virtual como CLP principal, como ilustrado na figura 5.11. É implementado no Digital Twin um script em C++ que permite a comunicação via S7 Siemens, além de configurar o endereçamento, também é configurado a tabela de símbolos onde é armazenado as E/S compartilhadas.

Figura 5.11 – Rede simulada para conexão do modelo virtual e física.



A última ferramenta que compõe o processo de integração neste desenvolvimento experimental é o PLCSim. O PLCSim é um software de simulação de planta e simulação do processo com integração ao TIA Portal. Isso permite simular todo o processo antes de instalar hardware fisicamente. Por conta das limitações de acesso ao laboratório e restrições de circulação por conta da pandemia de covid-19, foi adotado essa forma de simulação para compor a contraparte física. No PLCSim é definido uma sequência de acionamentos das entradas e saídas da tabela de símbolos definida para as E/S compartilhadas. Após a criação do CLP simulado no PLCSim e definida a sequência de operações é feita a conexão dele com a rede simulada pelo NetToPLCSim, através do TIA Portal configuramos o CLP simulado para atuar como CLP secundário do CLP virtual do Digital Twin, sendo assim o CLP simulado consulta a tabela de símbolos do Digital Twin.

Figura 5.12 – Espelhamento síncrono do Digital Twin com controlador físico.



Autoral

A conexão entre espaço físico e virtual é realizada por meio dos dados compartilhados entre os controladores. Ilustrado na figura 5.12, temos a execução paralela dos controladores. No lado esquerdo, temos o processo virtual executando em ambiente virtual Unity3D, seus processos são descritos pelos scripts e animações programadas dentro do ambiente. No lado direito, temos os

algoritmos em Ladder executando no CLP físico simulado e seus valores de entradas e saídas refletidos no modo observador do TIA Portal.

5.6. Resultados

Após o desenvolvimento experimental é possível avaliar os resultados alcançados a partir da metodologia e dos objetivos propostos. O objetivo do desenvolvimento experimental é demonstrar que ao aplicarmos as técnicas e métodos apresentados na metodologia, teríamos como resultado um Digital Twin. A próxima é validar se o Digital Twin gerado cumpre com os requisitos vigentes da literatura. Primeiro, o Digital Twin é avaliado no contexto das tecnologias da Indústria 4.0 apresentadas, o comissionamento virtual e sistemas ciberfísicos. O comissionamento virtual é uma técnica incorporada na metodologia proposta e demonstrada no desenvolvimento experimental. Já o sistema ciberfísico é um conceito a ser validado neste capítulo.

Segundo, é descrito os resultados a partir da capacidade de simulação do ambiente virtual. Como a simulação em um ambiente virtual representa uma das maiores vantagens para criação de um Digital Twin para sistemas de manufatura, este aspecto tem seus resultados demonstrados a fim de validar a importância das simulações no contexto dos Digital Twin. E terceiro, o Digital Twin proposto é submetido a uma meta análise comparativa com outros trabalhos que desenvolveram Digital Twin e avaliando quais aspectos representam vantagens e quais representam desvantagens em relação aos demais.

5.7. Digital Twin no contexto de sistema ciberfísico

Um sistema ciberfísico é constituído da integração síncrona entre um processo físico e o virtual (LEE et al., 2013), para isso, a troca de informação entre dois espaços deve ser feita de forma automática. Com a divisão em três camadas proposta por Zheng, Yang e Cheng (2018), podemos definir como integrar o Digital Twin a um processo físico de manufatura para gerar um sistema ciberfísico. O espaço virtual está inteiramente contido no ambiente virtual Unity3D onde é realizado tanto as simulações de processos quanto o espelhamento da execução de manufatura. O ambiente virtual contém todos os objetos, scripts e variáveis que geram e controlam os objetos virtuais.

A camada de processamento de informação contém os scripts que atuam e parametrizam as principais ações de controle dos objetos virtuais e controlador físico. Os dados dos objetos virtuais são processados, transformados e enviados para o controlador físico, e vice-versa. Dessa forma, as mudanças e atuações que ocorrem na planta virtual refletem na planta física, e as que ocorrem na física refletem na virtual.

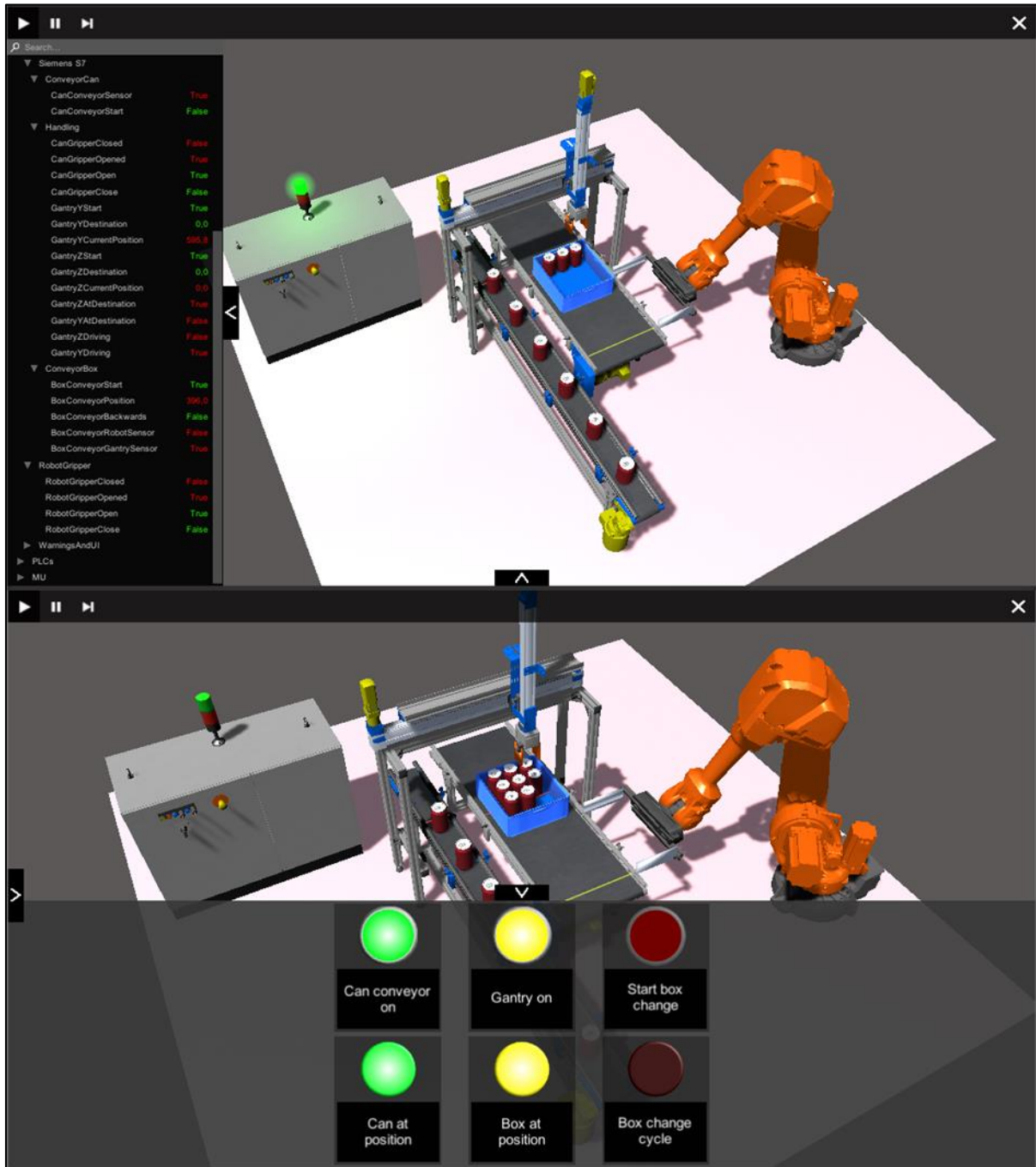
Além do espelhamento dos processos físicos, o Digital Twin proposto utilizando o ambiente virtual gerado por um motor gráfico permite interações como operador e a possibilidade de visualização de dados, proporcionando um novo tipo de experiência para o operador. Como por exemplo, a capacidade de monitorar os principais sinais de controle da planta e também as variáveis existentes somente no ambiente virtual, como a posição relativa no espaço do braço robótico. Características como essa diminuem a complexidade de modelar esses sistemas, pois não se faz necessário aplicar sensores para extrair todas as informações do objeto, ele somente simula o comportamento do objeto físico e a partir das regras de comportamento estabelecida, simula esses movimentos e exibe um resultado.

Ilustrado na figura 5.13, é apresentado uma forma de interação com ambiente virtual através de botões e alertas que representam os físicos. Os botões, assim como sua contraparte física, exercem a função de emitir um sinal para o controlador para iniciar ou interromper uma rotina. Na figura citada, temos o “Can conveyor on” que liga e desliga o motor da esteira de latas, o “Gantry on” que liga o robô cartesiano, e “Start box change” que força o processo da troca de caixa de latas feita pelo braço robótico, os três botões representam as interações que a planta virtual pode exercer sobre o controlador físico. E de modo análogo, os alertas de “Can at position” que informa se a lata está em posição para o robô cartesiano retirar, “Box at position” que a caixa foi detectada pelos sensores de presença, e “Box change cycle” que está iniciando o ciclo da troca de caixa, demonstram ações que ocorrem no controlador físico que afetam a planta virtual.

A detecção em tempo real de mudança de estado, controle dinâmico dos processos e utilizar serviços de diferentes sistemas distribuídos em diferentes âmbitos geográficos, adicionando novos recursos aos sistemas físicos usando computação e comunicação, que interagem intensamente com os processos físicos são características que definem os sistemas ciberfísicos ((LIU et al., 2017); (WANG; TÖRNGREN; ONORI, 2015)). Sendo também as características apresentadas neste Digital Twin, dessa forma, podemos afirmar que a metodologia proposta engloba as

características de sistemas ciberfísico como sua contraparte de digital.

Figura 5.13 – Digital Twin do sistema de manufatura.



Autoral

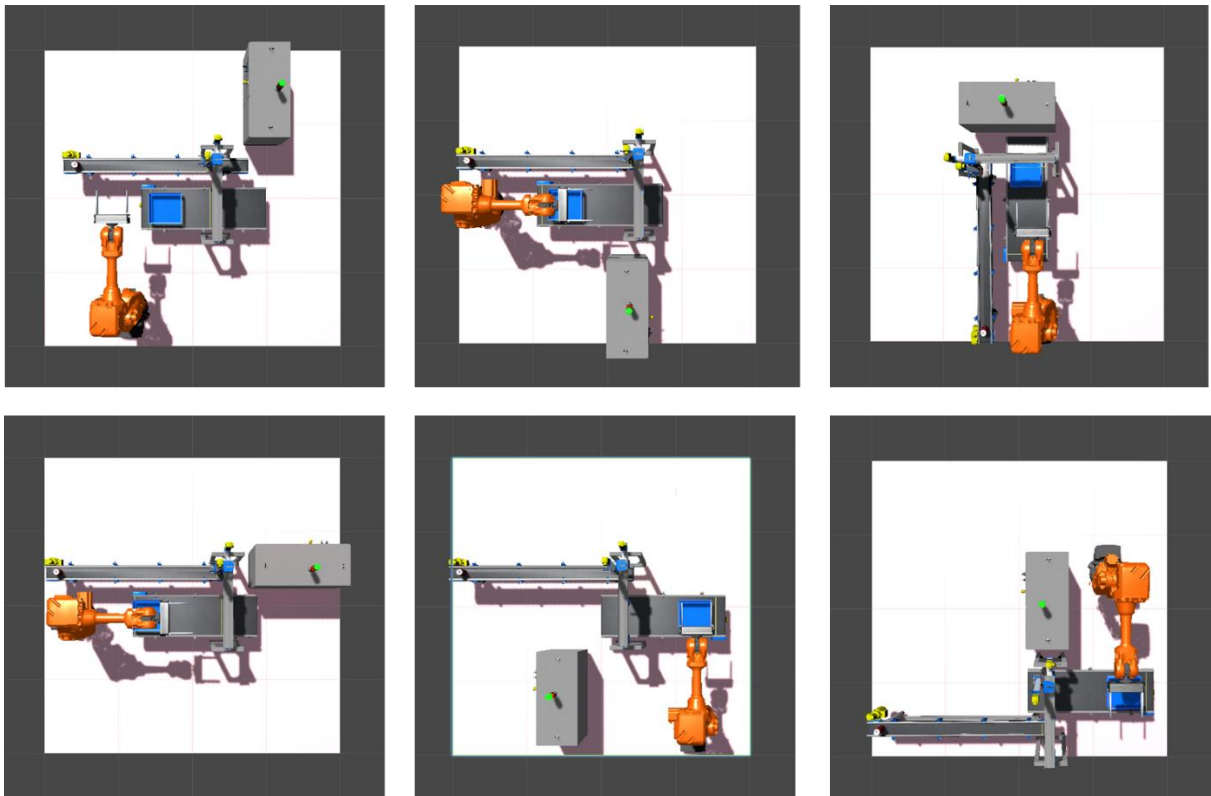
5.8. Resultados das simulações em ambiente virtual

O Digital Twin proposto neste trabalho permite algumas possibilidades de simulação em fase de criação de um sistema de manufatura, projeção e análise de

desempenho durante a produção. Os primeiros aspectos que podem vir a ser simulados são a relação de montagem e processo, característica explorada por Zhang et al (2017) em design individualizado. Com possibilidade de transferência de objetos via CAD Exchange é possível organizar e avaliar a dimensão dos objetos e como estão dispostos no espaço. Assim, simulando várias formas de organização da produção.

Após configurado o comportamento dos objetos virtuais, podemos testar diferentes cenários de produção. Como realizar teste de fadiga, detectar anomalias, falhas de configuração ou encontrar uma configuração ideal de produção para atingir fins multiobjetivo. Ilustrado na figura 5.14, o Digital Twin proposto é possível simular diferentes configurações de modo a terminar qual melhor resultado para atender uma demanda específica.

Figura 5.14 – Possibilidade de configuração para planta de manufatura.

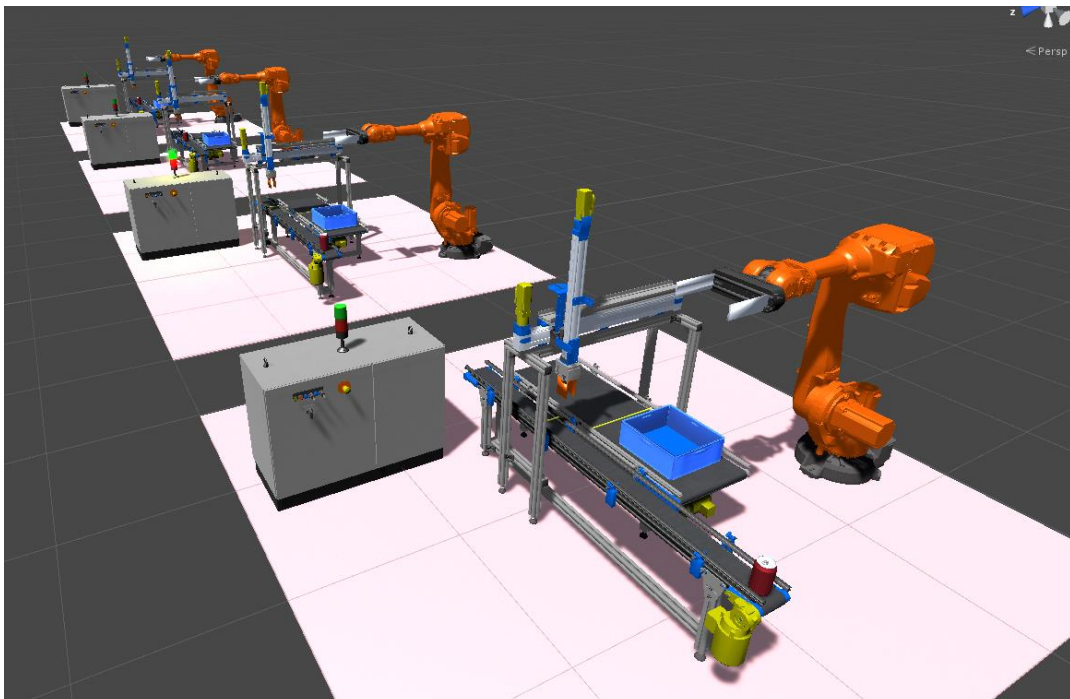


Autorial

O ambiente virtual gerado pelo Unity3D permite a manipulação dos objetos de forma prática, pois as funções de cinemática não estão ancoradas a pontos fixos no espaço. No entanto, ainda é necessário fazer ajuste na programação já que o

movimento esperado necessita ser em sentido inverso. Por exemplo, o braço robótico precisa que os movimentos para depositar a caixa na área de despacho sejam reprogramados para posicionar as caixas em um local diferente. Outro aspecto importante para simulação, além da possibilidade de múltiplas configurações dos objetos, é a capacidade de gerar réplicas. A figura 5.15 demonstra essa capacidade de serialização das linhas, porém a necessidade de configuração e conexão com os demais controladores físicos ainda é um ajuste feito manualmente, porém com menos esforço já que o sistema passou pelo processo de virtualização.

Figura 5.15 – Planta simulada em série.

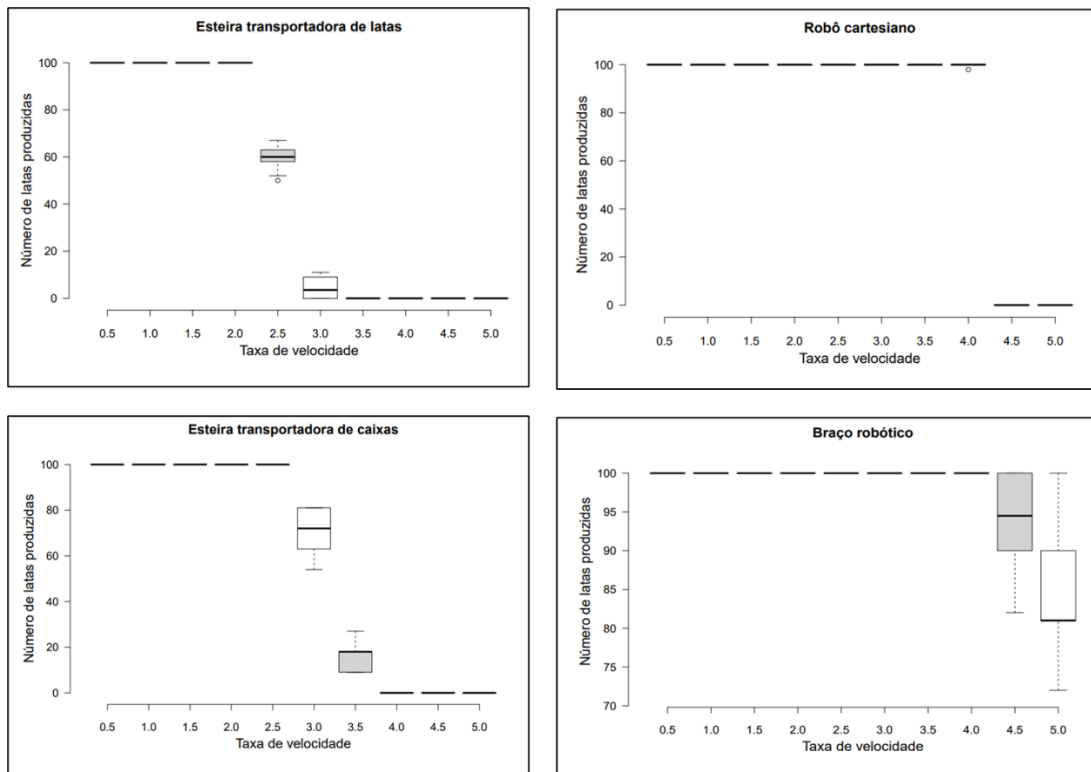


Autoral

Outra vantagem de simulações em ambientes virtuais, é determinar os limites de operação da linha de produção sem danificar o maquinário ou os produtos. Ambiente de simulação permite testar diferentes cenários a fim de atingir diferentes objetivos. Executando um banco de testes virtuais de vinte rodadas para produzir 100 latas, incrementando a velocidade por um fator multiplicador de 0,5 produzimos os resultados ilustrados na figura 5.16. A esteira transportadora de latas mantém a produção estável operando duas vezes a velocidade normal, quanto a de caixas pode operar duas vezes e meio sem perdas. E o robô cartesiano e braço robótico começam a apresentar instabilidade

na produção, operando a quatro vezes e meio a velocidade normal. Então caso o operador quisesse operar em velocidade máxima sem perdas na produção escolheria esta configuração. Muitos outros aspectos podem ser avaliados com essas simulações, como por exemplo, variação de peso dos objetos, dimensão das latas e caixa, tipo de material usado nos objetos, a depender do nível de complexidade que o ambiente virtual foi implementado.

Figura 5.16 – Variação de produção por ajuste de parâmetros.



Autoral

5.9. Meta-análise comparativa de Digital Twins

O Digital Twin proposto neste trabalho possui algumas das características apontadas como essenciais na revisão sistemática, como sistema formal e consistente para modelagem do sistema de manufatura, como os usados na metodologia proposta, o MBSE e o formalismo de DEVS. Também incorporar tecnologias de simulação, permitindo analisar diferentes resultados em cenários simulados. Dar suporte a gerenciamento e monitoramento de processos e permitir algum grau de flexibilidade. Incorporar tecnologias de comunicação, de modelagem tridimensional, e de armazenamento de dados.

No entanto, outros métodos e tecnologias incorporados em muitos dos trabalhos revisados não foram integrados a essa metodologia, pois o escopo delimitado não permitia abranger todos os aspectos de um Digital Twin. Por exemplo, a aplicação do padrão de comunicação publish-subscribe, como MQTT e OPC UA, que amplamente aplicado para os Digital Twins, mas no desenvolvimento experimental faz uso do protocolo TCP/IP para troca de dados, que para o desenvolvimento proposto tem um desempenho satisfatório.

Tabela 5.6 – Meta-análise dos Digital Twins

#	Conjunto de dados	Protocolo	Modelo	Opera na nuvem	Controla o sistema real	Monitora em tempo real	Alerta de falhas	Análise de otimização
1	-	OPC	TTS – modelo 3D			✓		✓
2	-	OPC	Unity3D – modelo 3D		✓			✓
3	UML	OPC UA	Modelo de previsão	✓		✓	✓	✓
4	XML	OPC UA	Aquisição de dados		✓	✓		✓
5	-	TCP/IP	Modelo orientado a agente	✓		✓	✓	
6	-	ISO 13399	ToolMaker – modelo 3D			✓	✓	
7	-	C+	SurfCAM / SolidWorks – modelo 3D	✓		✓	✓	
8	-	Profinet	Siemens NX – modelo 3D			✓		✓
9	-	MQTT	SimPy – SED	✓		✓		✓
10	Diagrama	TCP/IP	Android – modelo 3D			✓		✓
11	-	Protocolo IIoT	Visual Studio – modelo 3D			✓		✓
12	-	-	Tecnomatrix - SED					✓
13	-	MTConnect	Android – aquisição de dados	✓	✓	✓	✓	✓
14	-	OPC	Siemens – SED			✓		✓
15	MySQL	ODBC	Aquisição de dados					✓
16	-	OPC	Modelo 3D	✓	✓	✓		
17	-	-	Aquisição de dados			✓		✓
18	-	MTConnect	Android – aquisição de dados			✓		✓
19	UML	OPC UA	Modelo 3D			✓		✓
20	-	Modbus TCP	Aquisição de dados			✓		✓
DT proposto	XML	TCP/IP	Unity3D – modelo 3D		✓	✓		✓

Na tabela 5.6, temos a comparação entre os diferentes métodos e tecnologias aplicado em trabalhos que desenvolveram Digital Twin, descritos na tabela do apêndice D, e em seguida uma meta-análise dos resultados relatados pelos autores comparando com o Digital Twin proposto. Um dado pouco compartilhado entre os trabalhos comparados é o conjunto de dados e tipo de armazenamento escolhido para os dados do Digital Twin. O armazenamento e organização por meio de um banco de dados relacional pode garantir a integridade dos dados por conta do SGBD, porém o acesso simplificado às informações armazenadas em arquivos XML podem diminuir algumas etapas de verificação e responder de forma mais ágil. Para o Digital Twin proposto é aplicado o armazenamento em arquivos XML, pois os dados manipulados pelo Digital Twin guardam informação de estado que está em constante transição.

Sobre o protocolo de comunicação o padrão mais comum adotado são os publish-subscribe, como OPC, OPC UA, MQTT, MTConnect e IIoT. O padrão de comunicação onde a atualização de um nó publish dispara uma propagação para todos os nós subscribe proporciona autonomia ao sistema visto que é garantido a propagação da informação para os demais nós. Apesar de menos frequentes, padrões de comunicação tradicionais ainda se fazem presentes nos Digital Twins, como TCP/IP, Profinet e Modbus. O que para os cenários propostos nos trabalhos e neste Digital Twin é suficiente para estabelecer uma forma de comunicação confiável dando vazão ao volume de dados transmitido entre os modelos.

O modelo virtual mais frequente nos trabalhos analisados é a representação do espaço virtual por um modelo tridimensional, uma abordagem natural para um Digital Twin já que ele é uma réplica virtual de um modelo físico. Este aspecto é o mais diverso dentre os analisados pois em muitos dos trabalhos analisados não há um motivo ou justificativo do porquê aquela ferramenta de modelagem foi escolhida. No Digital Twin proposto faz uso da ferramenta Unity3D, mas a metodologia proposta não se limita apenas ao uso desta ferramenta, ela propõe o uso de qualquer ferramenta que gera um ambiente virtual a partir de um motor gráfico. Outra abordagem frequente é um modelo virtual por aquisição de dados ou sistema de evento discreto, que apesar de ser uma cópia virtual de processo físico pode ser menos vantajoso comparado a um modelo visual.

Outro aspecto abordado em alguns trabalhos é o de processamento de dados na nuvem, que nos modelos apresentados apesar da alta disponibilidade, os autores relatam que o atraso gerado na rede pode ser um fator crítico para sistemas de tempo

real. O Digital Twin proposto utiliza o conceito de processamento na borda, ou seja, o Digital Twin é processado próximo a planta física mitigando o atraso que possa vir a ocorrer por conta da distância geográfica entre a planta física e onde o modelo está sendo processado.

Um fator considerado crítico por Kritzinger et al (2018) é o critério obrigatório de troca de informação automática entre o modelo físico e o modelo digital, ou seja, além de refletir o estado da física para a virtual, as mudanças que ocorrem no modelo digital devem obrigatoriamente refletir no modelo físico para ser classificado como Digital Twin. Este conceito é pouco explorado nos trabalhos, visto que somente quatro dos vinte trabalhos comparados possuem essa característica. No Digital Twin proposto o espelhamento das mudanças entre os modelos é um aspecto coberto em durante o comissionamento virtual e parte da metodologia na etapa de integração, e é uma grande vantagem para o sistema de manufatura ter uma forma de controle remoto, pois elimina alguns riscos e amplia a capacidade de monitoramento.

Monitoramento em tempo real é uma das características mais presentes nos trabalhos analisados. A maior parte dos trabalhos comparados fazem a atualização automática das variáveis mapeadas para o modelo digital, atualizando constantemente a mudança de estados para refletir na contraparte virtual. O Digital Twin proposto possui uma abordagem que atua tanto como um monitor do processo como um atuador enviando sinais de controle para o controlador físico. Portanto a metodologia proposta diferente das analisadas propõe a sincronia dos dados entre o controlador físico e virtual.

Alerta de falhas apesar de ser um aspecto amplamente discutido nos trabalhos analisados é implementado em apenas cinco dos vinte trabalhos. No Digital Twin proposto não foi implementado uma forma de alerta para falhas durante o processo, o algoritmo de sincronismo de variáveis detecta inconsistência entre os dados reais e virtuais, mas não alerta essa informação no ambiente virtual, apenas interrompe o processo. Apesar do ambiente virtual gerado pelo Unity3D permitir a gerar alertas como pop-ups ou alterar as cores dos objetos para indicar falhar.

Análise de otimização é uma característica explorada na maior parte dos trabalhos, e é mais efetiva nos modelos voltados para aquisição de dados. Pois o objetivo desses trabalhos é otimizar a execução de um processo, ou desempenho de um maquinário, ou gerar novos processos a partir dos dados coletados. Como por exemplo otimização de espaço, ilustrado na figura 5.14, onde pode-se organizar a

posição dos ativos de produção a fim de aumentar ou diminuir a área que os ativos estão ocupando. Ou otimização de desempenho, ilustrado na figura 5.16, onde calcula os limites de operações de cada ativo determinando o limite de operação de cada ativo em ambiente de simulação.

5.10. Considerações finais

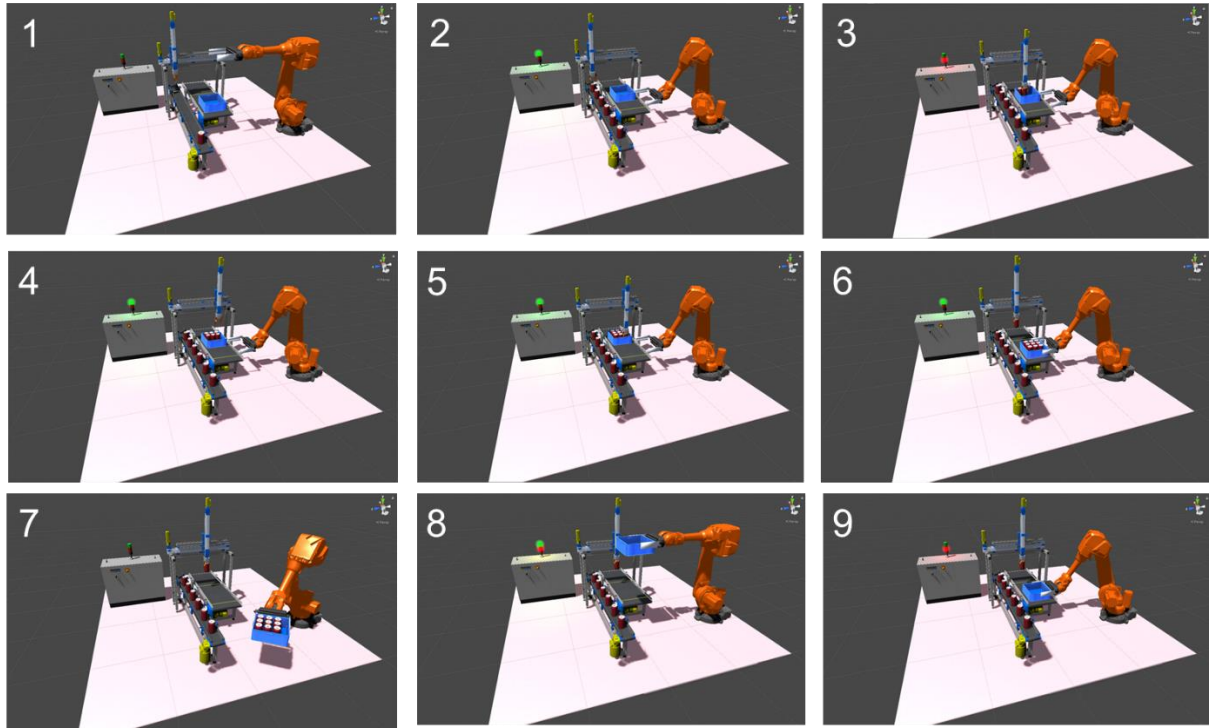
O desenvolvimento experimental propôs a criação do Digital Twin através da execução das quatro etapas da metodologia proposta: modelagem, simulação, virtualização e integração. A compreensão do processo de manufatura e a sequência de operações que ele executa são essenciais para o processo de modelagem, pois é desse entendimento do processo que os modelos de comportamento dos ativos de produção são definidos. Além de uma definição clara de quais as entradas e saídas dos controladores pois estes são os parâmetros que desencadeiam as mudanças de estados tanto na contraparte física quanto a virtual.

A geração dos modelos de dispositivos lógicos através dos modelos de DEVS facilitam na definição das simulações por meio do EDTs. Pois são definidos todas as entradas e saídas da planta de manufatura, bem como, suas funções de transição interna e externa. E assim, na etapa de simulação, esse modelo de comportamento é descrito em scripts de linguagem de alto nível para gerar as simulações.

Gerada as simulações, na etapa de virtualização são integradas a um ambiente virtual gerado por um motor gráfico. No ambiente virtual é onde o Digital Twin tem todos os seus ativos e comportamentos criados e representados em objetos virtuais tridimensionais. O ambiente virtual proporciona além de ferramentas que simulam o mundo físico, a capacidade de integrar e interagir com outros sistemas. Possibilitando por exemplo a troca de informação com controlador físico. O que conclui as etapas da metodologia proposta, a etapa de integração.

O objetivo a ser alcançado no desenvolvimento experimental é gerar um Digital Twin a partir da metodologia proposta. Na figura 5.17 temos ilustrado o processo de manufatura completo no modelo digital gerado pelo Unity3D, o conjunto de ações programadas para cada um dos ativos de manufatura funcionando em conjunto resulta no processo de produção definido no apêndice B. A metodologia de quatro etapas proposta neste trabalho cumpre com o objetivo de gerar um modelo digital a partir de uma planta física.

Figura 5.17 – Processo completo de manufatura executado em ambiente virtual.



Autorial

Além de gerar o modelo virtual, a proposta é gerar um modelo que incorpore as técnicas de comissionamento virtual e comissionamento de realidade em loop para atender os requisitos do conceito de sistemas ciberfísicos, como a troca automática de dados entre o modelo físico e o virtual, a adição de novos recursos aos sistemas físicos usando computação e comunicação, que interagem intensamente com os processos físicos, e a detecção em tempo real de mudança de estado, controle dinâmico dos processos e utilizar serviços de diferentes sistemas distribuídos em diferentes âmbitos geográficos.

Capítulo 6 - Conclusão e trabalhos futuros

Um dos principais aspectos levantados em muitos trabalhos sobre Digital Twin são discussões a respeito dos tipos de tecnologias (CIMINO; NEGRI; FUMAGALLI, 2019), protocolos de comunicação (LU et al., 2019a) e padrões de organização de dados (DAMJANOVIC- BEHRENDT; BEHRENDT, 2019) a serem aplicadas para desenvolvimento de um Digital Twin. São características essenciais para discutir pontos como escalabilidade, atender requisitos de tempo, e outros aspectos importantes para sistemas de manufatura. No entanto, pela variedade de serviços possíveis para esse tipo de aplicação (TAO et al., 2018) este trabalho não se propôs a limitar o uso de tecnologias específicas para atingir o objetivo, assim o ambiente virtual gerado poderia ser alcançado com outro motor gráfico, caso a finalidade que se deseja atender fosse diferente. De forma análoga, o protocolo de comunicação ao invés de padrão TCP/IP e S7 poderia ser padrão publish-subscribe como MQTT ou OPC, para atender outros objetivos. Dessa forma, a metodologia proposta neste trabalho se limita a mostrar as etapas necessárias para o desenvolver de um Digital Twin, usando ferramentas disponíveis para gerar um experimento prático de modo a demonstrar a aplicabilidade do método, não delimitando o uso de ferramentas.

O ambiente virtual gerado por motores gráficos tridimensionais é outro aspecto importante na metodologia proposta. Na seção de mapeamento sistemático, vimos que 45% dos trabalhos analisados não apresentaram uma variedade de cenários a serem examinados. Uma questão semelhante é apresentada por Lu et al (2019a) no qual cita o problema de capturar, armazenar e integrar diferentes versões de um Digital Twin conforme a contraparte física evolui ao longo do tempo. Um modelo digital gerado em um ambiente virtual gerado por motores gráficos facilita o processo de modificar e gerar diferentes cenários, tanto para simulações quanto para reconfigurar o espaço virtual para espelhar as mudanças físicas. Porém, essas alterações necessitam de prática do uso dessas ferramentas de motor gráfico, apesar de algumas funções serem automatizadas, o processo de criação dos ambientes virtuais possui pouca automação se comparada ao trabalho manual.

Este trabalho propôs a geração de um método de desenvolvimento de

Digital Twin condensando conceitos e metodologia explorados em trabalhos na área da Indústria 4.0 e sistemas ciberfísico. Sobretudo, investigando a aplicação de comissionamento virtual e ambientes virtuais para gerar simulações e espelhamento por meio de modelos tridimensionais. As ferramentas de software e tecnologias de comunicação não geram grande impacto para o processo de desenvolvimento de um Digital Twin. Visto que, Cimino, Negri e Fumagalli (2019) exploram a hipótese que a quantidade de serviços oferecidos por um Digital Twin é diversa, que é necessária uma variedade de soluções distintas para suprir a demanda.

Baseado nisso, a metodologia se propôs a gerar de um modelo digital a partir de um processo físico existente, aplicando o processo de comissionamento virtual proposto por Ko, An e Park (2013). Essa abordagem simplificou o processo de digitalização, já que o comportamento da planta virtual é mapeado conforme o comportamento do controlador físico. A partir desse processo de modelar as características e comportamentos dos objetos virtuais, gerar as simulações em ambiente virtual por meio dos Digital Twin Experimentáveis. Ao mapearmos o comportamento dos objetos virtuais e reproduzi-lo em ambiente virtual, temos um controlador virtual replicando o físico. Fechando o ciclo de comissionamento proposto por Lee e Park (2014).

A estrutura de comunicação entre os espaços físicos e virtuais proposto por Zheng, Yang e Cheng (2018) é um modelo frequentemente usado e adaptado em diversos trabalhos (SOUZA et al., 2019; ZHUANG; LIU; XIONG, 2018a; CAI et al., 2017). No entanto, a metodologia proposta utiliza desse modelo por conta da organização interna do espaço virtual que separa o ambiente virtual e subsistemas de gerenciamento de ciclo de vida. O ambiente virtual produzido por um motor gráfico possui um papel fundamental na simulação e espelhamento do processo de manufatura, pois, as dinâmicas de interação e cinemática são geradas dentro do ambiente. Por esse motivo, nesta metodologia proposta todas as etapas anteriores do processo de virtualização e simulação ocorrem dentro de um ambiente virtual. Conectando com a contraparte parte física através de variáveis compartilhadas entre os modelos físico e digital.

Por fim, temos um Digital Twin gerado em ambiente virtual desenvolvido por meio do motor gráfico Unity3D, construído a partir da metodologia proposta, que simula as execuções de um processo físico e espelha os movimentos da sua

contraparte física como um sistema ciberfísico. Contudo, esta metodologia para o desenvolvimento deste Digital Twin não pode ser aplicada de forma genérica a todo processo de manufatura existente, mas demonstra resultados positivos para uso em sistemas de legado como CLP e processos controlados em estados, por conta do sincronismo através do compartilhamento de dados.

6.1. Trabalhos futuros

Melhorias na metodologia proposta a fim integrar outras formas de sincronia de mudança de estados além das variáveis compartilhadas pelos controladores. Esse é um fator limitante para o Digital Twin proposto, pois as ações que o modelo digital tem sobre o físico estão relacionadas aos controladores da planta. Conexões em paralelo diretamente com os ativos, ou equipamentos no ambiente, podem gerar novos tipos de interações com a planta física.

Expandir a capacidade de controle da planta virtual na nuvem. Atualmente a interação com o ambiente virtual é feita em uma rede local com o controlador físico. Um dos problemas discutidos em modelos que são processados na nuvem é o atraso gerado pela rede, porém função que não possui critérios de tempo real, como monitoramento, simulações, alertas podem ser implementados para ser acessados em locais geograficamente mais distantes da planta.

Alertar falhas que ocorrem no processo de forma visual. O ambiente virtual gerado por motores gráficos permite diferentes formas de interação com ambiente incluindo gerar pop-ups, alertas sonoros, alterar cor de objetos, entre outras para alertar o usuário de que uma falha está acontecendo ou pode vir a acontecer.

Aplicar a metodologia proposta em outros tipos de sistemas de manufatura. A planta física escolhida é um modelo discreto de manufatura com etapas de execução bem definidas e controladas. Mas nem todos os sistemas de manufatura atuam dessa forma, pois temos sistemas que não trabalham somente com sistemas elétricos, como também hidráulicos e pneumáticos, sistemas que possuem interação com fluidos, equipamentos de aquecimento ou resfriamento, e sistemas onde pessoas atuam na produção. Estes são cenários ainda a serem explorados se o modelo é capaz de incorporar.

Referências

- ADERIANI, A. R. et al. Developing a selective assembly technique for sheet metal assemblies. **International Journal of Production Research**, p. 1 – 15, Fevereiro 2019.
- ADRIAN FERNANDEZ; INSFRAN, E.; ABRAHÃO, S. Usability evaluation methods for the web: A systematic mapping study. **Information and Software Technology**, v. 53, p. 789 – 817, Agosto 2011.
- AITOR MORENO et al. Virtualisation process of a sheet metal punching machine within the Industry 4.0 vision. **International Journal for Interactive Design and Manufacturing**, v. 11, p. 365 – 373, Maio 2017.
- BARBOSA, A. da S. et al. Virtual Assistant to Real Time Training on Industrial Environment. In: **Transdisciplinary Engineering Methods for Social Innovation of Industry 4.0**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 33 – 42.
- BARNI, A. et al. Exploiting the Digital Twin in the Assessment and Optimization of Sustainability Performances. In: **2018 International Conference on Intelligent Systems**. [S.l.: s.n.], 2018.
- BATHELT, J.; MEILE, J. Computer Aided Methods Supporting Concurrent Engineering when designing Mechatronic Systems Controlled by a PLC. In: **Proceedings of International Conference on Manufacturing Automation**. [S.l.: s.n.], 2007.
- BLAGA, A.; TAMAS, L. Augmented Reality for Digital Manufacturing. In: **26th Mediterranean Conference on Control and Automation**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 173 – 178.
- BORTOLINI, M. et al. Assembly system design in the Industry 4.0 era: a general framework. **IFAC PapersOnLine**, v. 50, p. 5700 – 5705, Julho 2017.
- BOSCHERT, S.; ROSEN, R. **Digital Twin: The Simulation Aspect**. [S.l.]: Springer, 2016.

CAI, Y. et al. Sensor data and information fusion to construct digital-twins virtual machine tools for cyber-physical manufacturing. In: **45th SME North American Manufacturing Research Conference**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1031 — 1042.

CHENG, J. et al. DT-II: Digital twin enhanced Industrial Internet reference framework towards smart manufacturing. **Robotics and Computer Integrated Manufacturing**, v. 62, Abril 2020.

CIMINO, C.; NEGRI, E.; FUMAGALLI, L. Review of digital twin applications in manufacturing. **Computers in Industry**, v. 113, Dezembro 2019.

DAMJANOVIC-BEHRENDT, V.; BEHRENDT, W. An open-source approach to the design and implementation of Digital Twins for Smart Manufacturing. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 32, p. 1 — 19, Abril 2019.

DELBRÜGGER, T.; ROSSMANN, J. Representing adaptation options in experimentable digital twins of production systems. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, Abril 2019.

DILLON, T. S. et al. Web-of-things framework for cyber-physical systems. **Currency and Computation**, v. 23, p. 905 – 923, Junho 2011.

DRATH, R.; WEBER, P.; MAUSER, N. An evolutionary approach for the industrial introduction of virtual commissioning. In: **2008 IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation**. [S.l.: s.n.], 2008. p. 5 — 8.

EISENTRÄGER, M. et al. Changeability in Engineering. In: **2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1 – 8.

GRIEVES, M. **Virtually Perfect**: Driving Innovative and Lean Products through Product Lifecycle Management. [S.l.]: Space Coast Press, 2011.

HAN, Y. et al. 3D CAD data extraction and conversion for application of augmented/virtual reality to the construction of ships and offshore structures. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 32, p. 1 — 11, Abril 2019.

HAUF, D. et al. Multifunctional use of functional mock-up units for application in production engineering. In: **2017 IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1090 – 1095.

HAVARD, V. et al. Digital twin and virtual reality: a co-simulation environment for design and assessment of industrial workstations. **Production & Manufacturing Research**, v. 7, p. 472 – 489, Janeiro 2019.

HOFFMANN, P. et al. Virtual Commissioning Of Manufacturing Systems - A Review And New Approaches For Simplification. In: **24th European Conference on Modelling and Simulation**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 175 – 181.

KITCHENHAM, B.; CHARTERS, S. **Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering**. [S.l.], 2007.

KO, M.; AHN, E.; PARK, S. C. A concurrent design methodology of a production system for virtual commissioning. **Concurrent Engineering**, v. 21, p. 129 – 140, Junho 2013.

KRITZINGER, W. et al. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. **IFAC PapersOnLine**, v. 51, p. 1016 – 1022, Janeiro 2018.

KUTS, V. et al. Digital twin based synchronised control and simulation of the industrial robotic cell using virtual reality. **Journal of Machine Engineering**, v. 19, p. 128 – 144, Fevereiro 2019.

LA, H. J.; KIM, S. D. A Service-Based Approach to Designing Cyber Physical Systems. In: **2010 IEEE/ACIS 9th International Conference on Computer and Information Science**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 895 – 900.

LANDOLFI, G. et al. Intelligent value chain management framework for customized assistive healthcare devices. **Procedia CIRP**, v. 67, p. 583 – 588, Janeiro 2018.

LEE, C. G.; PARK, S. C. Survey on the virtual commissioning of manufacturing systems. **Journal of Computational Design and Engineering**, v. 3, p. 213 – 222, Junho 2014.

LEE, J. et al. Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment. **Manufacturing Letters**, p. 38 – 41, Outubro 2013.

LI, S.; XU, L. D.; ZHAO, S. The internet of things: a survey. **Information Systems Frontiers**, v. 17, p. 243 – 259, Dezembro 2015.

LIU, Y. et al. Review on cyber-physical systems. **IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica**, v. 4, n. 16585190, p. 27 – 40, Janeiro 2017.

LU, Y. et al. Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 61, Agosto 2019a. 69.

LU, Y. et al. An IoT-enabled simulation approach for process planning and analysis: a case from engine re-manufacturing industry. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 32, p. 1 – 17, Fevereiro 2019b.

LU, Y.; XU, X. Resource virtualization: A core technology for developing cyber-physical production systems. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 47, p. 128 – 140, Abril 2018.

MARTIN, G. et al. Luminaire Digital Design Flow with Multi-Domain Digital Twins of LEDs. **Energies**, Junho 2019.

NEGRI, E.; FUMAGALLI, L.; MACCHI, M. A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. In: **PROCEDIA MANUFACTURING**, 2017. **27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing**. [S.l.], 2017. p. 939 – 948.

OYEKAN, J. et al. The effectiveness of virtual environments in developing collaborative strategies between industrial robots and humans. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 55, p. 41 – 54, Fevereiro 2019.

PARK, S. C.; KO, M.; CHANG, M. A reverse engineering approach to generate a virtual plant model for PLC simulation. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 69, p. 9 – 12, Dezembro 2013.

PREUVENEERS, D.; JOOSEN, W.; ILIE-ZUDOR, E. Robust digital twin compositions for Industry 4.0 smart manufacturing systems. In: **22nd International Enterprise Distributed Object Computing Workshop**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 69 – 78.

QAMSANE, Y. et al. A Unified Digital Twin Framework for Real-time Monitoring and Evaluation of Smart Manufacturing Systems. In: **15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1394 – 1401.

RASHEED, A.; SAN, O.; KVAMSDAL, T. Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective. **IEEE Access**, v. 8, p. 21980 – 22012, Janeiro 2020.

RAUCH, L.; PIETRZYK, M. Digital twins as a modern approach to design of industrial processes. **Journal of Machine Engineering**, v. 19, p. 86 – 97, Março 2019.

ROSEN, R. et al. About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. **IFAC-PapersOnLine**, v. 48, p. 567 – 572, Dezembro 2015.

ROSSMANN, J.; SCHLUSE, M. Virtual Robotic Testbeds: A foundation for eRobotics in Space, in Industry—and in the woods. **Developments in E-systems Engineering**, p. 496 – 501, Dezembro 2011, DOI: 10.1109/DeSE.2011.101.

ROSSMANN, J. et al. Control by 3D Simulation—A New eRobotics Approach to Control Design in Automation. **Proceedings of the 5th international conference on Intelligent Robotics and Applications**, v. 2, p. 186 – 197, Outubro 2012.

SCHLUSE, M. et al. Experimentable Digital Twins—Streamlining Simulation-Based Systems Engineering for Industry 4.0. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 14, p. 1722 – 1731, Abril 2018.

SCHLUSE, M.; ROSSMANN, J. From simulation to experimentable digital twins: Simulation-based development and operation of complex technical systems. **2016 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)**, n. 16486928, p. 1 — 6, Novembro 2016.

SHAFTO, M. et al. **NASA Modeling, Simulation, Information Technology & Processing Roadmap**. [S.l.]: National Aeronautics and Space Administration, 2010.

SHORT, M.; TWIDDLE, J. An Industrial Digitalization Platform for Condition Monitoring and Predictive Maintenance of Pumping Equipment. **Sensors**, Agosto 2019.

SOUZA, V. et al. A Digital Twin Architecture Based on the Industrial Internet of Things Technologies. In: **2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1 — 2.

STAASMEYER, J.; LIU, G.; DAMBON, O. Digitalized glass optics production. In: **Optical Manufacturing and Testing XII**. [S.l.: s.n.], 2018.

TAO, F. et al. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Fevereiro 2018.

TAO, F. et al. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 15, n. 18579910, p. 2405 — 2415, Abril 2019.

TAO, F.; ZHANG, M. Digital Twin Shop-Floor: A New Shop-Floor Paradigm Towards Smart Manufacturing. **IEEE Access**, v. 5, p. 20418 — 20427, Outubro 2017.

TUEGEL, E. J. The Airframe Digital Twin: Some Challenges to Realization. In: **53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference**. [S.l.: s.n.], 2012.

UHLEMANN, T. H.; LEHMANN, C.; STEINHILPER, R. The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0. In: **The 24th CIRP Conference on Life Cycle Engineering**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 335 — 340.

UM, J.; WEYER, S.; QUINT, F. Plug-and-Simulate within Modular Assembly Line enabled by Digital Twins and the use of AutomationML. **IFAC-PapersOnLine**, v. 50, p. 15904 – 15909, Julho 2017.

URBINA, P. et al. Part data integration in the Shop Floor Digital Twin: Mobile and cloud technologies to enable a manufacturing execution system. **Journal of Manufacturing Systems**, Fevereiro 2018.

WANG, L.; TÖRNGREN, M.; ONORI, M. Current status and advancement of cyber- physical systems in manufacturing. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 37, n. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.04.008>, p. 517 – 527, Outubro 2015.

ZHANG, C. et al. A Reconfigurable Modeling Approach for Digital Twin-based Manufacturing System. **Procedia CIRP**, v. 83, p. 118 – 125, Janeiro 2019.

ZHANG, H. et al. A Digital Twin-Based Approach for Designing and Multi-Objective Optimization of Hollow Glass Production Line. **IEEE Access**, p. 26901 – 26911, Outubro 2017.

ZHENG, P. et al. A systematic design approach for service innovation of smart product-service systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 201, p. 657 – 667, Agosto 2018.

ZHENG, Y.; YANG, S.; CHENG, H. An application framework of digital twin and its case study. **Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing**, v. 10, p. 1141 – 1153, Junho 2018.

ZHU, Q.; RIEGER, C.; BASAR, T. A hierarchical security architecture for cyber-physical systems. In: **4th International Symposium on Resilient Control Systems**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 15 – 20.

ZHUANG, C.; LIU, J.; XIONG, H. Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 96, p. 1149 – 1163, Fevereiro 2018a.

ZHUANG, C.; LIU, J.; XIONG, H. Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Abril 2018b.

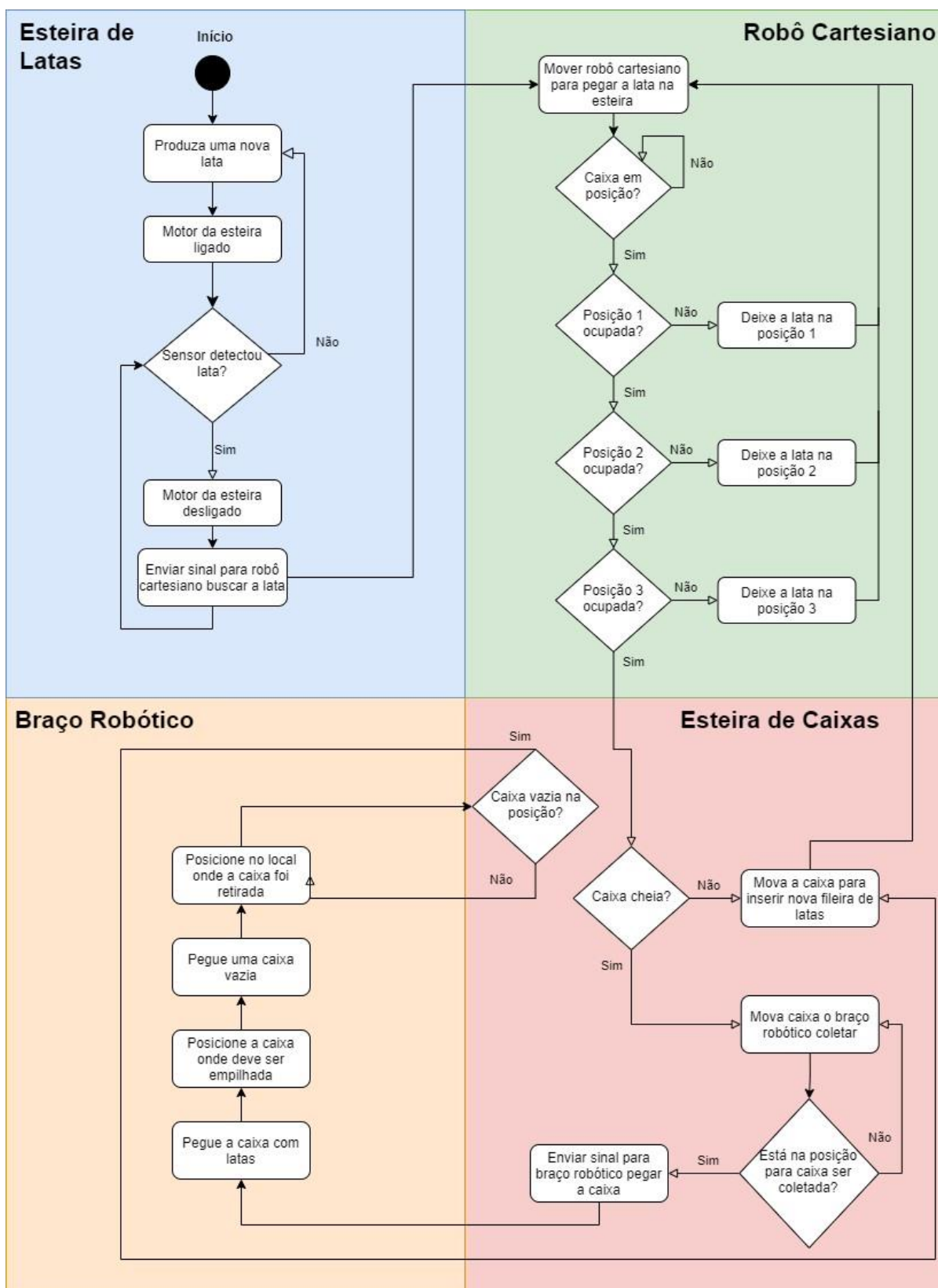
APÊNDICE A – Classificação das publicações de estudo primário e secundário

#	Título	Autores
1	Sensor data and information fusion to construct digital-twins virtual machine tools for cyber-physical manufacturing	CAI, Y. et al
2	Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor	ZHUANG, C.; LIU, J.; XIONG, H.
3	Plug-and-Simulate within Modular Assembly Line enabled by Digital Twins and the use of AutomationML	UM, J.; WEYER, S.; QUINT, F.
4	Towards digital twins through object-oriented modelling: a machine tool case study	SCAGLIONI, B; FERRETTI, G.
5	A Digital Twin Architecture Based on the Industrial Internet of Things Technologies	SOUZA, V. et al
6	Changeability in Engineering	EISENTRÄGER, M. et al
7	Digital Twin Based Synchronised Control And Simulation Of The Industrial Robotic Cell Using Virtual Reality	KUTS, V. et al
8	An IoT-enabled simulation approach for process planning and analysis: a case from engine remanufacturing industry	LU, Y. et al
9	Digital twin and virtual reality: a co-simulation environment for design and assessment of industrial workstations	HAVARD, V. et al
10	Luminaire Digital Design Flow with Multi-Domain Digital Twins of LEDs	MARTIN, G. et al
11	Digital twin driven human–robot collaborative assembly	BILBERG, A.; MALIK, A. A.
12	Augmented Reality for Digital Manufacturing	BLAGA, A.; TAMAS, L.
13	An Industrial Digitalization Platform for Condition Monitoring and Predictive Maintenance of Pumping Equipment	SHORT, M.; TWIDDLE, J.
14	Digitalization of Manufacturing Processes: Proposal and Experimental Results	ROLLE, R.; MARTUCCI, V.; GODOY, E.
15	Representing adaptation options in experimentable digital twins of production systems	DELBRÜGGER, T.; ROSSMANN, J.
16	Developing a selective assembly technique for sheet metal assemblies	ADERIANI, A. R. et al
17	Multifunctional Use of Functional Mock-up Units for Application in Production Engineering	HAUF, D. et al
18	Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data	TAO, F. et al
19	Virtual Assistant to Real Time Training on Industrial Environment	BARBOSA, A. da S. et al

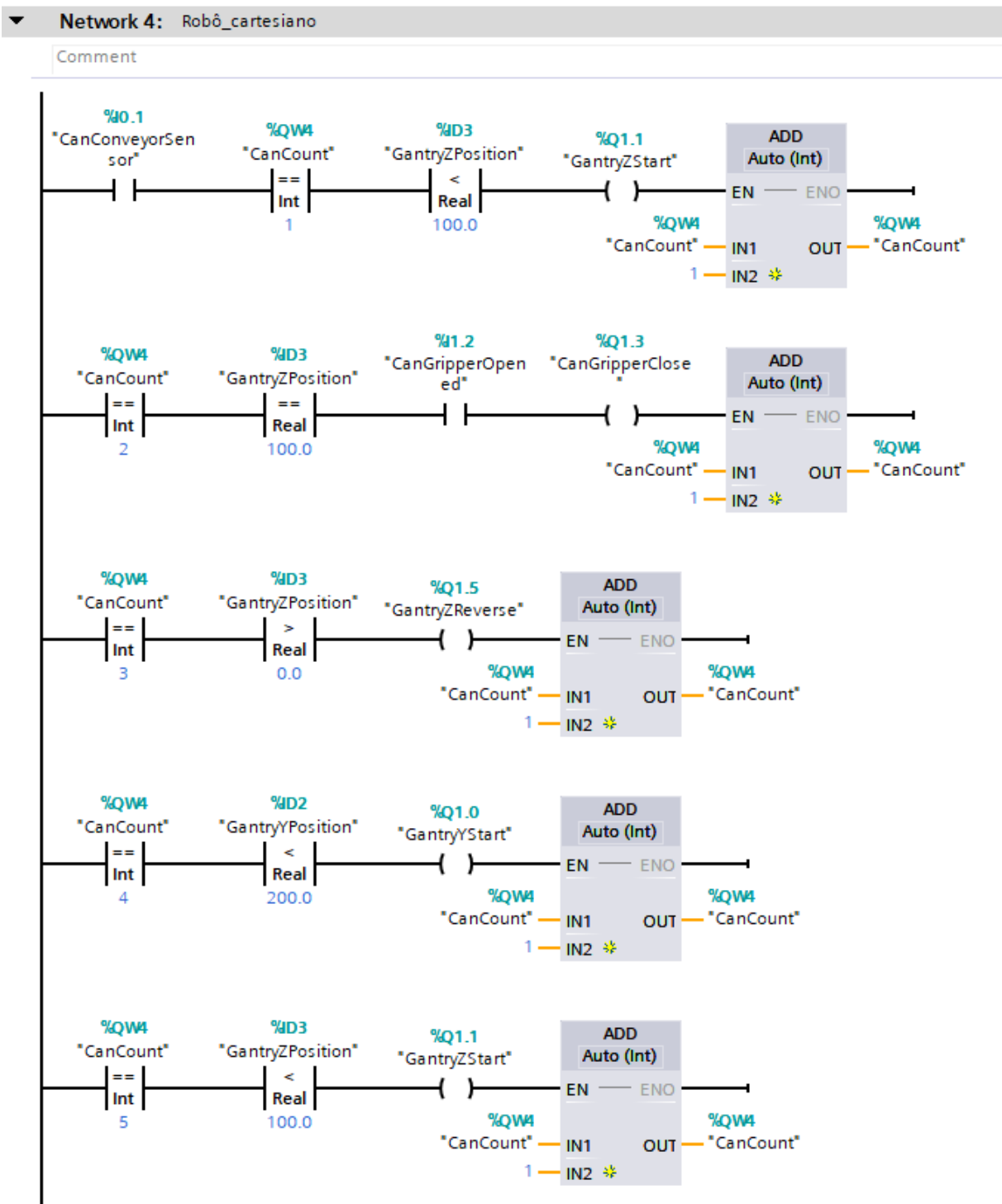
#	Título	Autores
20	Intelligent value chain management framework for customized assistive healthcare devices	LANDOLFI, G. et al
21	Digital Twin Shop-Floor: A New Shop-Floor Paradigm Towards Smart Manufacturing	TAO, F.; ZHANG, M.
22	An application framework of digital twin and its case study	ZHENG, Y.; YANG, S.; CHENG, H.
23	The effectiveness of virtual environments in developing collaborative strategies between industrial robots and humans	OYEKAN, J. et al
24	DT-II: Digital twin enhanced Industrial Internet reference framework towards smart manufacturing	CHENG, J. et al
25	3D CAD data extraction and conversion for application of augmented/virtual reality to the construction of ships and offshore structures	HAN, Y. et al
26	Digital Twins As A Modern Approach To Design Of Industrial Processes	RAUCH, L.; PIETRZYK, M.
27	Robust digital twin compositions for Industry 4.0 smart manufacturing systems	PREUVENEERS, D.; JOOSEN, W.; ILIE-ZUDOR, E.
28	Experimentable Digital Twins - Streamlining Simulation-Based Systems Engineering for Industry 4.0	SCHLUSE, M. et al
29	A Digital Twin-Based Approach for Designing and Multi-Objective Optimization of Hollow Glass Production Line	ZHANG, H. et al
30	A systematic design approach for service innovation of smart product-service systems	ZHENG, P. et al
31	From Simulation to Experimentable Digital Twins	SCHLUSE, M.; ROSSMANN, J.
32	Virtualisation process of a sheet metal punching machine within the Industry 4.0 vision	AITOR MORENO et al
33	Exploiting the Digital Twin in the Assessment and Optimization of Sustainability Performances	BARNI, A. et al
34	Application of imitation modelling means to create digital twins of the Industry 4.0 company technological equipment	ZAKOLDAEV, D. et al
35	A Reconfigurable Modeling Approach for Digital Twin-based Manufacturing System	ZHANG, C. et al
36	From Surveillance to Digital Twin: Challenges and Recent Advances of Signal Processing for Industrial Internet of Things	HE, Y.; GUO, J.; ZHENG, X.
37	Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues	LU, Y. et al
38	Review of digital twin applications in manufacturing	CIMINO, C.; NEGRI, E.; FUMAGALLI, L

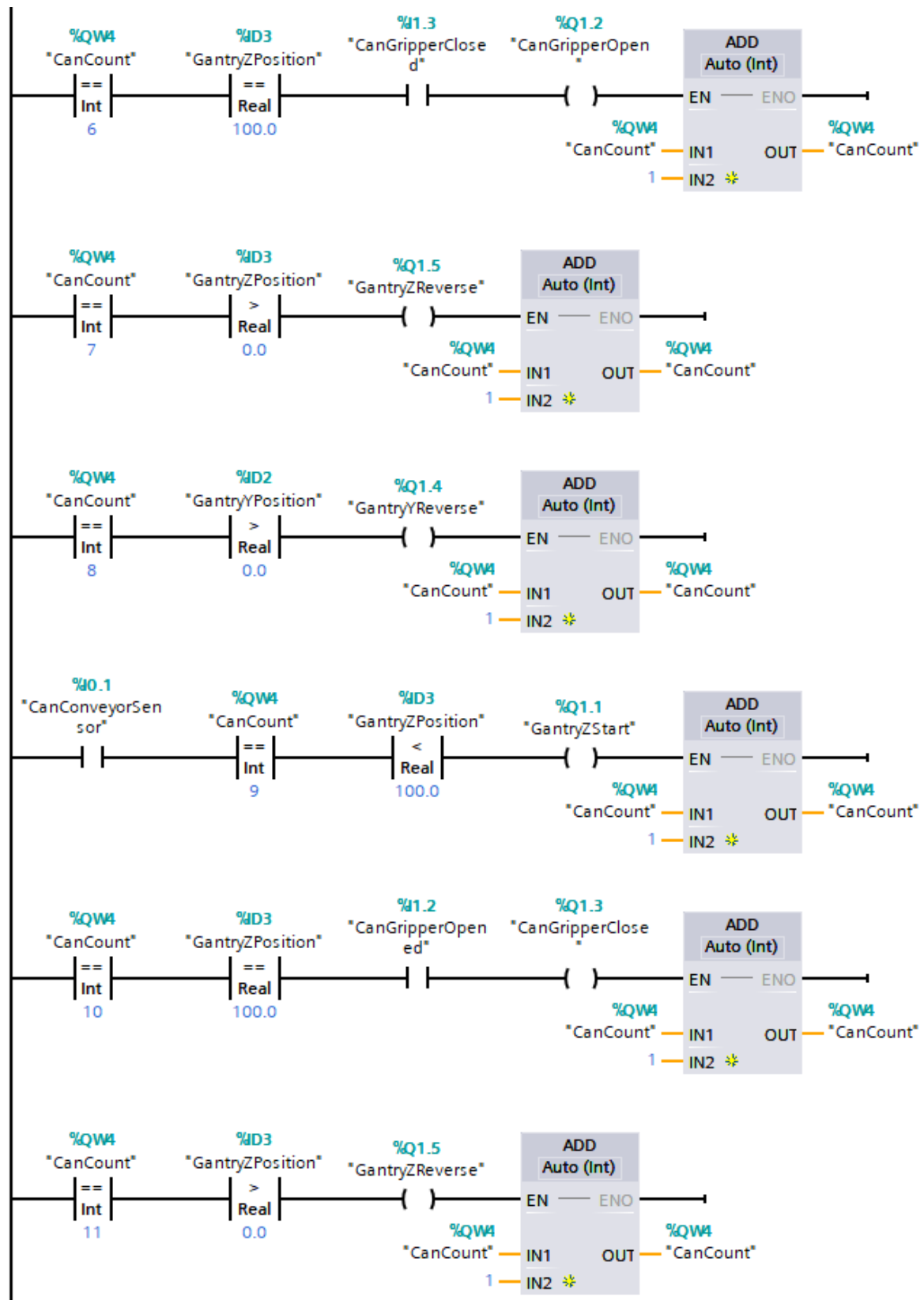
#	Título	Autores
39	Resource virtualization: A core technology for developing cyber-physical production systems	LU, Y.; XU, X.
40	Part data integration in the Shop Floor Digital Twin: Mobile and cloud technologies to enable a manufacturing execution system	URBINA, P. et al
41	Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison	TAO, F. et al
42	A review of the roles of Digital Twin in CPS-based production systems	NEGRI, E.; FUMAGALLI, L.; MACCHI, M.
43	An open source approach to the design and implementation of Digital Twins for Smart Manufacturing	DAMJANOVIC-BEHRENDT, V.; BEHRENDT, W
44	Digital Twin in Industry: State-of-the-Art	TAO, F. et al

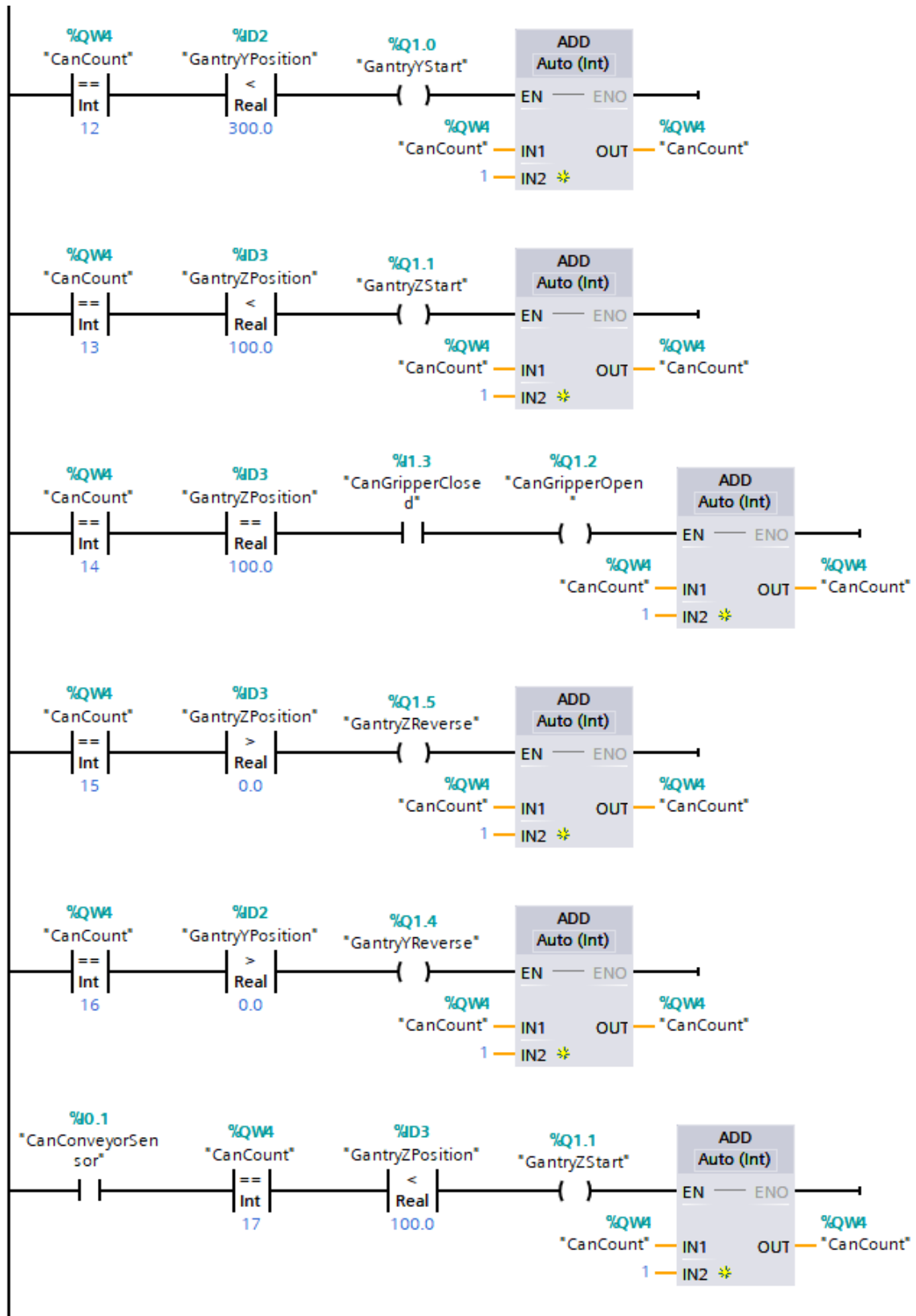
APÊNDICE B – Fluxograma de execução do sistema de manufatura experimental

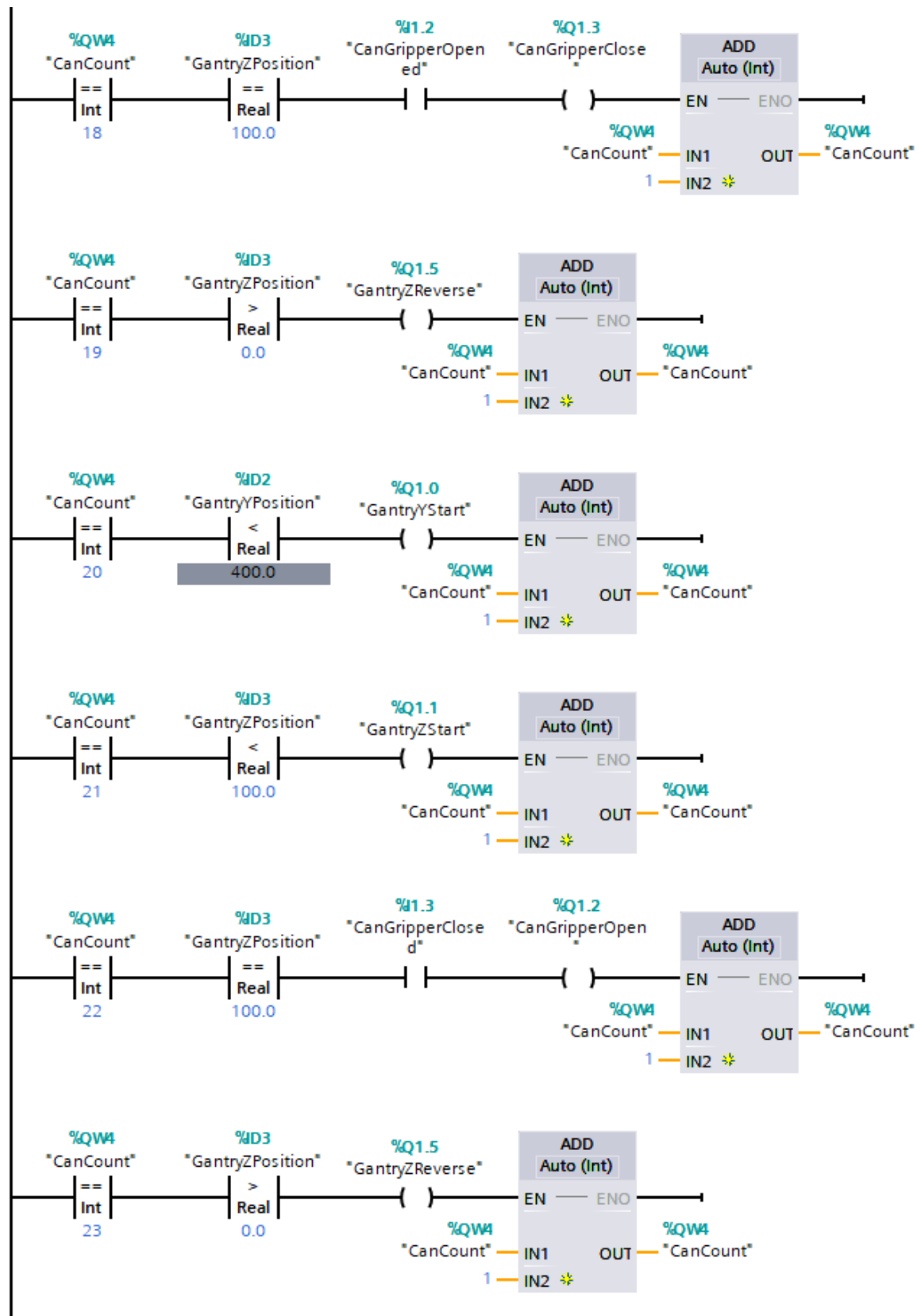


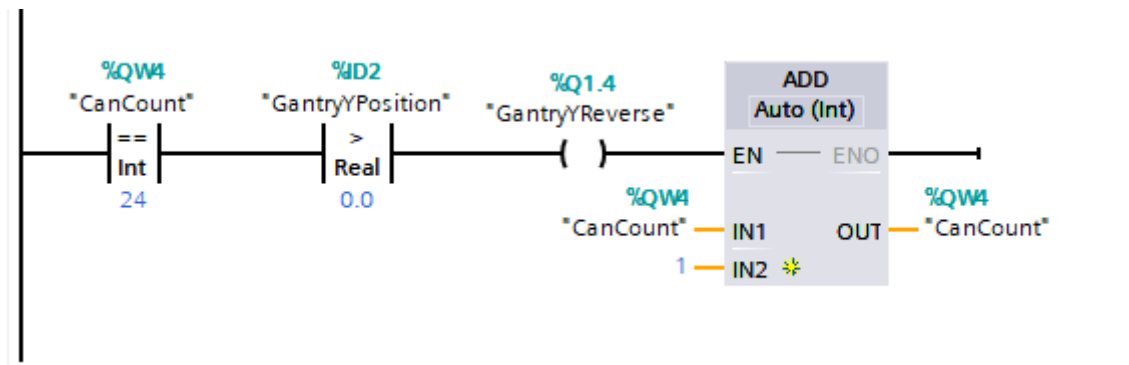
APÊNDICE C – Diagrama Ladder para controlador do robô cartesiano











APÊNDICE D – Trabalhos usados na meta-análise comparativa

#	Título	Autores
1	Role of ontologies for cps implementation in manufacturing	GARETTI, M., FUMAGALLI, L., NEGRI, E.
2	A methodology for manufacturing execution systems (MES) implementation	GOVINDARAJU, R., PUTRA, K.
3	Working mode in aircraft manufacturing based on digital coordination model	GUO, F. et al
4	Digital twin – proof of concept	HAAG, S., ANDERL, R.
5	Cyber-physical systems for Open-knowledge-driven manufacturing execution systems	IAROVYI, S. et al
6	Mechatronic Concept of Heavy Machine Tools	JANDA, P.
7	Digital twin for energy optimization in an SMT-PCB assembly line	KARANJKAR, N. et al
8	Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification	KRITZINGER, W. et al
9	Smart manufacturing	KUSIAK, A.
10	A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems	LEE, J., BAGHERI, B., KAO, H.A.
11	Digital twin-driven rapid individualised designing of automated flow-shop manufacturing system	LIU, Q. et al
12	Digital twin-based process reuse and evaluation approach for smart process planning	LIU, J. et al
13	Ubiquitous knowledge empowers the smart factory: The impacts of a service-oriented digital twin on enterprises' performance	LONGO, F., NICOLETTI, L., PADOVANO, A.
14	Digital Twin for CNC Machine Tool	LUO, W. et al
15	Exploring the role of digital twin for asset lifecycle management	MACCHI, M. et al
16	MES Explained: A High Level Vision - MESA White Paper Number 6	MESA
17	Virtualisation process of a sheet metal punching machine within the industry 4.0 vision	MORENO, A. et al
18	An integrated approach for improving energy efficiency of manufacturing process chains	MOUSAVI, S. et al
19	Requirements and languages for the semantic representation of manufacturing systems	NEGRI, E. et al
20	A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems	NEGRI, E., FUMAGALLI, L., MACCHI, M.