

Regis de Goes Vieira

**Metodologia de Virtualização de Sistemas de Manufatura na
Indústria 4.0**

Sorocaba
2023

Regis de Goes Vieira

**Metodologia de Virtualização de Sistemas de Manufatura na
Indústria 4.0**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Interunidades, entre o Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba e a Faculdade de Engenharia de São João da Boa Vista da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Paciência
Godoy

Sorocaba
2023

V658m Vieira, Regis de Goes
Metodologia de virtualização de sistemas de manufatura na
indústria 4.0 / Regis de Goes Vieira. -- Sorocaba, 2023
81 p. : il., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista
(Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba
Orientador: Eduardo Paciência Godoy

1. Engenharia elétrica. 2. Revolução industrial. 3. Empresas
virtuais. 4. Realidade virtual. 5. Métodos de simulação. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do
Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Esta pesquisa pode fornecer ao leitor um entendimento das tecnologias que estão ganhando espaço na indústria, com foco em gêmeos digitais. Essa pesquisa aborda o desenvolvimento de um método para virtualizar equipamentos ou linhas de produção industriais.

POTENCIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research can provide the reader with an understanding of technologies that are gaining ground in industry, with a focus on digital twins. This research addresses the development of a method for virtualizing equipment or industrial production lines.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Metodologia de Virtualização de Sistemas de Manufatura na Indústria 4.0

AUTOR: REGIS DE GOES VIEIRA

ORIENTADOR: EDUARDO PACIÊNCIA GODOY

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em , área: Automação pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. EDUARDO PACIÊNCIA GODOY (Participação Presencial)

Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia UNESP Campus de Sorocaba



Assinado de forma digital por
Eduardo Paciencia
Godoy:29137583808
Dados: 2023.11.07 16:39:17
-03'00'

Prof. Dr. FELIX MAURICIO ESCALANTE ORTEGA (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Câmpus de Sorocaba



UNESP
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JULIO DE MESQUITA FILHO"
Instituto de Ciência e Tecnologia
Campus de Sorocaba

Assinado de forma digital
por Felix Mauricio
Escalante
Dados: 2023.11.08
18:29:57 -03'00'

Prof. Dr. MARCOSIRIS AMORIM DE OLIVEIRA PESSOA (Participação Virtual)

Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos / Escola Politécnica da USP



Documento assinado digitalmente
MARCOSIRIS AMORIM DE OLIVEIRA PESSOA
Data: 14/11/2023 14:54:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Sorocaba, 31 de outubro de 2023

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba por dar acesso ao aprendizado e por, ao longo desses anos, ter se tornado uma segunda casa para mim.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, pela oportunidade de ampliar meus horizontes e pelos conhecimentos adquiridos, dos quais tenho orgulho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Eduardo Paciência Godoy, pela confiança depositada, por me guiar nessa jornada e por apresentar essa vertente de trabalho que me instiga a conhecer cada vez mais.

Aos professores Fabrício Junqueira e Marcosiris Amorim de Oliveira Pessoa, da Poli-USP, pelo acesso ao software necessário para o desenvolvimento do projeto e a Festo Didactic pelos desenhos 3D das estações de manufatura.

Quero finalmente agradecer aos meus tesouros e porto seguro, minha família, Fernanda e Rafaela, pela paciência em me ouvir, pela compreensão nos meus períodos de ausência e pelo suporte e apoio em todo esse trajeto. Não teria conseguido sem vocês.

“A oportunidade é uma deusa desdenhosa que não perde tempo com os que não
estão preparados”

George S. Clason
O homem mais rico da Babilônia

RESUMO

A necessidade de aprimoramento e a crescente demanda de agregar valor aos bens levam as indústrias a buscar soluções para produzir mais, melhor e com menor custo. A Indústria 4.0 (I4.0) vem se consolidando como a solução para tais necessidades e demandas, sendo que, nos seus pilares, a modelagem necessária para a virtualização de máquinas, equipamentos e processos são primordiais para que tecnologias como a Simulação, Comissionamento Virtual e Gêmeos Digitais possam ser desenvolvidas. No entanto, existe uma carência de métodos e procedimentos para a criação organizada e padronizada desses modelos virtuais. O presente trabalho objetiva propor uma metodologia para a virtualização de sistemas de manufatura na I4.0. Essa metodologia é baseada em duas partes, sendo uma relacionada à modelagem individual e modular de estações de trabalho e a outra relacionada à integração dessas estações para compor o sistema de manufatura. A validação da metodologia é realizada através do desenvolvimento um modelo virtual de um sistema de manufatura flexível (FMS) e da interação deste modelo com um controlador e protocolo de comunicação aderentes à I4.0. Para o desenvolvimento foram utilizados um FMS da *Festo Didactic*, que consiste de uma planta fabril didática composta por estações de trabalho interligadas por uma esteira de movimentação circular, o software *Visual Components*, como ferramenta para desenvolver a virtualização do sistema e softwares de automação para desenvolvimento do controle lógico como o Codesys. Os modelos virtuais individuais que compõe o FMS foram interconectados e integrados através do protocolo OPC UA e foram realizados testes de comunicação e operação que permitiram avaliar o funcionamento do modelo virtual, validar a metodologia desenvolvida na ferramenta escolhida e verificar o potencial do modelo virtual para o desenvolvimento de simulações e comissionamento virtual.

Palavras-chave: virtualização; indústria 4.0; Visual Components; gêmeos digitais; comissionamento virtual.

ABSTRACT

The need for improvement and the growing demand to add value to goods lead industries to look for solutions to produce more, better and at a lower cost. Industry 4.0 (I4.0) has been consolidating itself as the solution to such needs and demands, and, in its pillars, the modeling necessary for the virtualization of machines, equipment and processes are essential for technologies such as Simulation, Virtual Commissioning and Digital Twins can be developed. However, there is a lack of methods and procedures for the organized and standardized creation of these virtual models. The present work aims to propose a methodology for the virtualization of manufacturing systems in I4.0. This methodology is based on two parts, one related to the individual and modular modeling of workstations and the other related to the integration of these stations to compose the manufacturing system. Validation of the methodology is carried out through the development of a virtual model of a flexible manufacturing system (FMS) and the interaction of this model with a controller and communication protocol compliant with I4.0. For the development, an FMS from Festo Didactic was used, which consists of a didactic manufacturing plant composed of workstations interconnected by a circular movement belt, the Visual Components software, as a tool to develop system virtualization and automation software for development. control logic like Codesys. The individual virtual models that make up the FMS were interconnected and integrated through the OPC UA protocol and communication and operation tests were carried out to evaluate the functioning of the virtual model, validate the methodology developed in the chosen tool and verify the potential of the virtual model for development of simulations and virtual commissioning.

Keywords: virtualization; industry 4.0; Visual Components; digital twins; virtual commissioning.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - OS NOVE PILARES FUNDAMENTAIS DA INDÚSTRIA 4.0	15
FIGURA 2 – PLATAFORMA ICPS NA INDÚSTRIA 4.0	18
FIGURA 3 - CONFIGURAÇÕES DE COMISSIONAMENTO	24
FIGURA 4 – POSSIBILIDADES DE DESENVOLVIMENTO DO COMISSIONAMENTO	24
FIGURA 5 - MODELO CONCEITUAL DE GÊMEOS DIGITAIS	26
FIGURA 6 – COMUNICAÇÃO / INTERAÇÃO ENTRE GÊMEOS DIGITAL E REAL	26
FIGURA 7 – PASSOS INICIAIS DA METODOLOGIA DE MODELAGEM	32
FIGURA 8 – ETAPAS PARA A VIRTUALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES	33
FIGURA 9 – METODOLOGIA DE INTEGRAÇÃO DAS ESTAÇÕES DE TRABALHO PARA COMPOR UM SISTEMA DE MANUFATURA	36
FIGURA 10 – SISTEMA DE MANUFATURA FESTO DIDACTIC UTILIZADO COMO REFERÊNCIA	37
FIGURA 11 – ESTAÇÃO DE PRODUÇÃO “DISTRIBUTING”	38
FIGURA 12 – ESTAÇÃO DE PRODUÇÃO “TESTING”	38
FIGURA 13 – ESTAÇÃO DE PRODUÇÃO “PROCESSING”	39
FIGURA 14 – ESTAÇÃO DE PRODUÇÃO “HANDLING”	40
FIGURA 15 – ESTAÇÃO DE PRODUÇÃO “ROBOT”	40
FIGURA 16 – ESTAÇÃO DE PRODUÇÃO “ASSEMBLY”	41
FIGURA 17 – ESTAÇÃO DE PRODUÇÃO “AS-RS”	41
FIGURA 18 – ESTAÇÃO DE PRODUÇÃO “SORTING”	42
FIGURA 19 – TELA DE INICIALIZAÇÃO DO SOFTWARE	43
FIGURA 20 – BOTÃO “IMPORT GEOMETRY”	45
FIGURA 21 – JANELA “IMPORT MODEL”	46
FIGURA 22 – MODELO 3D IMPORTADO PARA O VISUAL COMPONENTS	46
FIGURA 23 – ESTRUTURA DO COMPONENTE	47
FIGURA 24 – EXTRAINDO GEOMETRIAS EM UM NOVO LINK	48
FIGURA 25 – ESTRUTURA DO COMPONENTE (LINKS E FEATURES)	48
FIGURA 26 – PROPRIEDADES DO LINK	49
FIGURA 27 – INSERÇÃO DO BEHAVIOR “PYTHON SCRIPT”	50
FIGURA 28 – EXEMPLO DE CÓDIGO INSERIDO EM UM PYTHON SCRIPT	50
FIGURA 29 – CRIAÇÃO DE SENSORES	51
FIGURA 30 – TIPOS DE SINAIS PRESENTES NO VISUAL COMPONENTS	52
FIGURA 31 – SINAIS DE UM COMPONENTE	52
FIGURA 32 – VINCULAÇÃO DO SINAL AO SENSOR	53

FIGURA 33 – VINCULAÇÃO DO SINAL AO PYTHON SCRIPT	53
FIGURA 34 – TESTE DE FUNCIONAMENTO DOS SINAIS VINCULADOS A FUNÇÕES DE CINEMÁTICA.....	54
FIGURA 35 – VISUALIZAÇÃO DOS SINAIS PRESENTES NAS ESTAÇÕES DE MANUFATURA VIRTUAL	54
FIGURA 36 – LIGAÇÃO DOS SINAIS INPUT E OUTPUT DAS ESTAÇÕES DE MANUFATURA	55
FIGURA 37 – INSERÇÃO DO BEHAVIORS “CONTAINER”.....	56
FIGURA 38 – CARRINHO DE TRANSPORTE POSICIONADO EM UM PONTO DE PARADA.....	57
FIGURA 39 – PAREAMENTO DE SINAIS ENTRE VISUAL COMPONENTS E CODESYS.....	60
FIGURA 40 – SINAIS INPUT E OUTPUT ENTRE AS ESTAÇÕES DE MANUFATURA	60
FIGURA 41 – ESTRUTURA E VISUALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO DISTRIBUTING	62
FIGURA 42 – ESTRUTURA E VISUALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO TESTING	63
FIGURA 43 – ESTRUTURA E VISUALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO HANDLING	64
FIGURA 44 – ESTRUTURA E VISUALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO PROCESSING.....	65
FIGURA 45 – ESTRUTURA E VISUALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO SORTING	66
FIGURA 46 – SISTEMA DE MANUFATURA FLEXÍVEL VIRTUALIZADO.....	67
FIGURA 47 – DIAGRAMA DE CONEXÃO DOS SINAIS DA SIMULAÇÃO E AS VARIÁVEIS DO CLP PARA O TESTE 01	69
FIGURA 48 – QR CODE PARA O VÍDEO DO TESTE 01 DA SIMULAÇÃO DO SISTEMA FMS	69
FIGURA 49 – DIAGRAMA DE CONEXÃO DOS SINAIS DA SIMULAÇÃO E AS VARIÁVEIS DO CLP PARA O TESTE 02	70
FIGURA 50 – QR CODE PARA O VÍDEO DO TESTE 02 DA SIMULAÇÃO DO SISTEMA FMS	70
FIGURA 51 – DIAGRAMA DE CONEXÃO DOS SINAIS DA SIMULAÇÃO E AS VARIÁVEIS DO CLP PARA O TESTE 03	72
FIGURA 52 – QR CODE PARA O VÍDEO DA SIMULAÇÃO DO SISTEMA COMO UM DIGITAL SHADOW.....	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	3 Dimensões
AS-RS	Automatic Storage / Retrieval System
cloT	Consumer Internet of Things
CLP	Controlador Lógico Programável
CodeSYS	Controller Development System
CPPS	Cyber Physical Production System
CPS	Cyber-Physical System
ICPS	Industrial Cyber-Physical System
IloT	Industrial Internet of Things
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
NASA	National Aeronautics and Space Administration
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture
QoS	Quality of Service
TCP/IP	Transmission Control Protocol /Internet Protocol
TI	Tecnologia da Informação
VC	Visual Components
VDI	Verein Deutscher Ingenieure (Associação dos Engenheiros Alemães)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA.....	12
1.2	OBJETIVO.....	14
1.3	ESTRUTURA E CONTEÚDO	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	INDÚSTRIA 4.0.....	15
2.2	VIRTUALIZAÇÃO	20
2.2.1	<i>Modelagem digital.....</i>	<i>20</i>
2.2.2	<i>Simulação.....</i>	<i>21</i>
2.2.3	<i>Comissionamento virtual</i>	<i>23</i>
2.2.4	<i>Gêmeos digitais.....</i>	<i>25</i>
3	METODOLOGIA DE VIRTUALIZAÇÃO	31
3.1	METODOLOGIA DE MODELAGEM	31
3.2	METODOLOGIA DE INTEGRAÇÃO	35
4	MATERIAIS UTILIZADOS	37
4.1	SISTEMA DE MANUFATURA FLEXÍVEL	37
4.2	VISUAL COMPONENTS	42
4.3	INTERAÇÃO COM CLP'S.....	44
5	DESENVOLVIMENTO.....	45
5.1	MODELAGEM DAS ESTAÇÕES	45
5.1.1	<i>Etapa 1 – importação de desenhos 3d</i>	<i>45</i>
5.1.2	<i>Etapa 2 – separação da geometria.....</i>	<i>47</i>
5.1.3	<i>Etapa 3 – definição da cinemática</i>	<i>49</i>
5.1.4	<i>Etapa 4 – funções cinemáticas.....</i>	<i>49</i>
5.1.5	<i>Etapa 5 – sensores da estação</i>	<i>51</i>
5.1.6	<i>Etapa 6 – criação dos sinais da estação</i>	<i>51</i>
5.1.7	<i>Etapa 7 – vinculação dos sinais</i>	<i>53</i>
5.1.8	<i>Etapa 8 – comunicação externa</i>	<i>54</i>
5.2	INTEGRAÇÃO DO SISTEMA	55
5.2.1	<i>Etapa 1 e 2 - criação e conexão de sinais input/output</i>	<i>55</i>
5.2.2	<i>Etapa 3 – integração em pares de estações</i>	<i>56</i>
5.2.3	<i>Etapa 4 – integração da esteira circular</i>	<i>57</i>
5.3	TESTES COM CLP VIRTUAL.....	58
6	RESULTADOS	61
6.1	MODELAGEM DAS ESTAÇÕES	61
6.2	TESTES – DIGITAL MODEL.....	68
6.3	TESTE – DIGITAL SHADOW.....	71
6.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	73
7	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	76
7.1	TRABALHOS FUTUROS.....	77
	REFERÊNCIAS.....	78

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

O mundo há alguns anos tem buscado tornar-se *smart*, que é caracterizado por uma internet mais ubíqua e móvel, por sensores menores e mais poderosos e pela inteligência artificial (através de telefones, carros, casa, cidades, etc). Em um contexto industrial não é diferente, a necessidade de aprimoramento e a crescente demanda de agregar valor aos produtos ou serviços levam as indústrias a buscar soluções para produzir mais, melhor e com menor custo (SCHWAB, 2019).

Atualmente a Indústria se encontra na sua Quarta Revolução Industrial, também conhecida por Indústria 4.0. Desde quando o termo Indústria 4.0 se tornou público em 2011 (KAGERMANN; LUKAS; WAHLSTER, 2011) vem demonstrando ser de grande valia para tais necessidades e demandas, sendo definida como a integração de diversas tecnologias, como a Internet das Coisas (IoT – acrônimo inglês para *Internet of Things*), os Sistemas de Produção Ciber-Físicos (CPPS) (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2016) e outras tecnologias também conhecidas como tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0. A Internet das Coisas (IoT) pode ser definida como uma rede de objetos físicos (“coisas”), dotados de sensores e/ou atuadores, capaz de reunir e transmitir dados (GARTNER, 2020) através de uma conexão com ou sem fio para a Internet (HARWOOD, 2020).

Os Sistemas de produção Ciber-Físicos (CPPS) integram o ambiente físico e o virtual, conectando sensores e atuadores e gerando uma sobreposição virtual que possui todas as informações da sua versão física, sendo considerado o núcleo da Indústria 4.0 (ZHOU; LIU; ZHOU, 2015). Essas informações aliadas às do próprio sistema de produção, tais como dados dos produtos, dados operacionais e dados da cadeia de valor, quando utilizadas com técnicas de análise avançada e análise de Big Data trazem benefícios para a indústria, como a otimização de processos, redução de custos e melhoria da eficiência operacional (DRATH; HORCH, 2014).

Com a difusão da Indústria 4.0, suas tecnologias habilitadoras também puderam evoluir, como a Simulação que passou desde simular eventos discretos no contexto industrial (INGALLS, 2011), a utilização no comissionamento virtual a fim de reduzir o tempo dispendido no comissionamento real (JOHANSSON, 2017), até chegarmos aos gêmeos digitais, onde a simulação de um ambiente industrial é

realizada em tempo real, permitindo a transmissão contínua de dados entre o mundo físico e o mundo virtual (EL SADDIK, 2018).

É proposto é uma classificação de Gêmeos Digitais em três subcategorias de acordo com o seu nível de integração de dados (KRITZINGER, 2018), sendo:

- *Digital Model* (em português, Modelo Digital) - É uma representação digital de um objeto físico que não usa nenhum tipo de troca de dados automática entre o objeto físico e o objeto digital.
- *Digital Shadow* (em português, Sombra Digital) – Baseado na definição de *Digital Model*, caso haja um fluxo de dados automático entre o objeto físico e o objeto digital, podemos chama-lo de Sombra Digital.
- *Digital Twin* (em português, Gêmeo Digital) – Se o fluxo de dados entre o objeto físico e o objeto digital é totalmente integrado em ambas as direções, podemos considera-lo um Gêmeo Digital.

A virtualização desses sistemas industriais é a base para o desenvolvimento das tecnologias acima citadas. No contexto industrial, com relação à virtualização de seus sistemas e processos existe uma complexidade maior ao criar novos modelos, pois possui alguns desafios, tais como:

- A criação de métodos padronizados para criação de modelos virtuais que poderão ser usados individualmente ou em conjunto para simulação de cenários;
- A fidedignidade da representação virtual, pois para que o modelo seja uma réplica digital de seu modelo físico, tal modelo deve ser detalhadamente idêntico, e para tanto sua modelagem gráfica necessita de um conhecimento aprofundado, que em sua maioria, somente um profissional desta área possui;
- Como efetuar a comunicação da representação virtual com outros sistemas, como softwares de gerenciamento ou de inteligência de negócios, para que possam ser simulados cenários e antecipar possíveis problemas;
- Integração do modelo virtual com o sistema real, para que haja a troca de informações entre os ambientes (físico e virtual);

- Sincronismo entre o modelo virtual e o seu respectivo sistema físico, o que resulta em uma resposta em tempo real.

Através deste contexto e das necessidades apontadas, este trabalho contribui com o desenvolvimento de uma metodologia prática para virtualização de sistemas de manufatura, onde a mesma foi aplicada para o desenvolvimento de um modelo virtual de um sistema de manufatura flexível para aplicações da Indústria 4.0, composta por diversas estações de trabalho. Buscou-se também verificar a interação deste modelo com Controladores Lógicos Programáveis, vislumbrando possibilidades de utilização em outras tecnologias como Comissionamento Virtual e Gêmeos Digitais.

1.2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia prática para a virtualização de sistemas de manufatura na Indústria 4.0 e através dela desenvolver e avaliar um modelo virtual de um Sistema de Manufatura Flexível, bem como verificar a interação deste modelo com Controladores Lógicos Programáveis.

1.3 ESTRUTURA E CONTEÚDO

Este trabalho está estruturado em 6 (seis) capítulos, considerando esta introdução.

O capítulo 2 trata da revisão bibliográfica, onde são apresentados os conceitos utilizados ao longo do trabalho, bem como apresenta aplicações de tais conceitos na Indústria ou ambiente acadêmico / científico.

O capítulo 3 apresenta o material e método utilizados na elaboração deste trabalho. São descritos os detalhes da metodologia desenvolvida, bem como as ferramentas de controle de processos, modelagem, visualização 3D, simulação e o sistema industrial didático utilizado como referência.

No capítulo 4 é descrito o desenvolvimento do trabalho, a virtualização dos módulos, integração dos mesmos e os testes realizados com Controladores Lógicos Programáveis.

O capítulo 5 trata dos resultados alcançados com o desenvolvimento do trabalho.

O capítulo 6 apresenta as conclusões e perspectivas para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INDÚSTRIA 4.0

Desde que o termo “Indústria 4.0” se tornou público em 2011 (KAGERMANN; LUKAS; WAHLSTER, 2011), alguns conceitos foram estabelecidos para caracterizar o que vem a ser a Indústria 4.0. Para Rüßmann *et al.* (2015), a Indústria 4.0 é uma nova onda de avanço tecnológico impulsionada por nove pilares fundamentais, ilustrado na Figura 1. Tais pilares já são utilizados na manufatura, contudo de forma isolada ou independente. No contexto da Indústria 4.0, essas tecnologias estão totalmente integradas, automatizadas e otimizadas, promovendo uma maior eficiência e uma mudança nas relações de produção entre fornecedores, produtores e clientes, bem como na relação entre homem-máquina.

Figura 1 - Os nove pilares fundamentais da Indústria 4.0



Fonte: Adaptado de HSRC (2019)

Os nove pilares fundamentais da Indústria 4.0 são (RÜßMANN, 2015):

- **Big Data e Analytics** – consiste na análise baseada em grandes conjuntos de dados, onde no contexto da manufatura aperfeiçoa a qualidade da produção, economiza recursos e melhora o serviço do equipamento. A coleta e avaliação de dados de diversas fontes (equipamentos, sistemas de produção, sistemas corporativos e de clientes) são um importante apoio para a tomada de decisões em tempo real.

- **Robôs Autônomos** – Os robôs já são amplamente utilizados na indústria para as mais diversas tarefas, contudo eles estão se tornando mais autônomos, flexíveis, colaborativos e cooperativos, onde podem interagir uns com os outros e também trabalhar com segurança ao lado de humanos e alterar suas rotinas a partir da interação com eles.
- **Simulação** – No contexto da Indústria 4.0, as simulações aproveitam dados em tempo real para espelhar o mundo físico em um modelo virtual, que pode incluir máquinas, produtos e humanos. Isso permite que sejam testados e otimizadas configurações no mundo virtual antes de uma mudança física, reduzindo assim tempo de configuração de máquina e aumentando a qualidade do processo produtivo.
- **Integração de Sistemas Horizontal e Vertical** – A integração vertical trata da integração de sistemas de TI em vários níveis de produção e fabricação hierárquico (desde o chão de fábrica até o nível de planejamento empresarial). Enquanto que a integração horizontal é sobre sistemas de TI e fluxos em toda a cadeia de fornecimento / valor, abrangendo desde fornecedores e outros parceiros até os consumidores (ROMANO, 2017). Com isso as empresas, departamentos e funções se tornam mais coesos, pois as redes de integração de dados entre empresas evoluem, permitindo assim uma cadeia de valor automatizada.
- **Internet Industrial das Coisas** – A Internet Industrial das Coisas (IIoT – acrônimo inglês para *Industrial Internet of Things*) traz cada vez mais dispositivos com computação embarcada e conectados entre si, permitindo que os dispositivos de campo se comuniquem e interajam entre si, descentralizando a análise e tomada de decisão, permitindo respostas em tempo real.
- **Ciber Segurança** – Com o aumento da conectividade e o uso de protocolos de comunicação que acompanham a Indústria 4.0, há a necessidade inerente de proteger sistemas industriais críticos e linhas de produção contra ameaças de segurança cibernética.

- **Computação em Nuvem** – No contexto da Indústria 4.0, há uma exigência maior no compartilhamento de dados entre sites e dados da empresa, onde até mesmo sistemas que monitoram e controlam processos podem se tornar baseados em nuvem.
- **Manufatura Aditiva** – Esse método de manufatura permite a produção de pequenos lotes personalizados, com algumas vantagens como designs complexos e leves. Sistemas de manufatura aditiva descentralizados e de alto desempenho podem reduzir a distância de transporte e o estoque.
- **Realidade Aumentada** – Tecnologia que mantém o usuário em seu ambiente físico e transporta o ambiente virtual para o espaço do usuário, permitindo a interação com o ambiente virtual, de maneira mais natural e sem necessidade de treinamento ou operação (KIRNER, 2006). Os sistemas em realidade aumentada podem fornecer instruções aos trabalhadores em tempo real para melhorar a tomada de decisão e os procedimentos de trabalho.

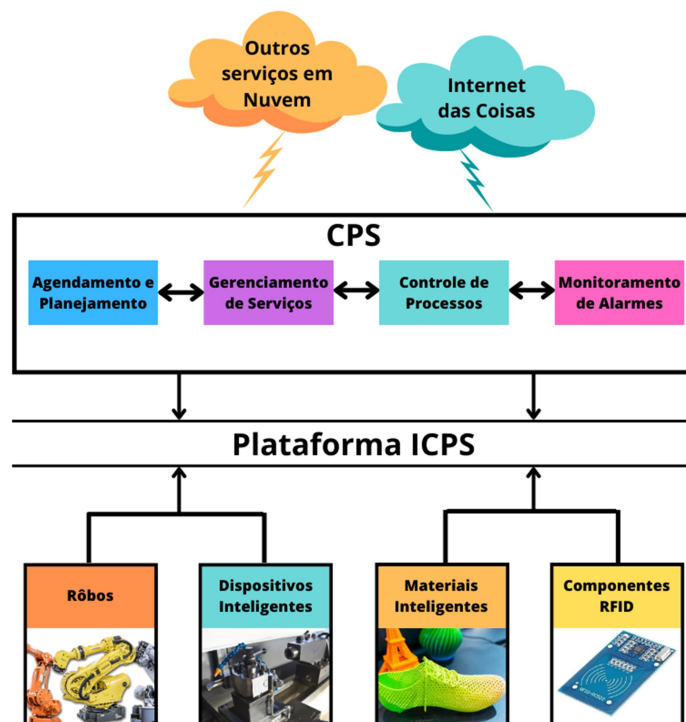
Dentre as tecnologias citadas, ressalta-se a IoT e a IIoT, sendo necessário distinguir os termos e conceitos utilizados, que embora sejam próximos, não podem ser considerados sinônimos:

- A Internet das Coisas (IoT) pode ser definida como uma rede de objetos físicos (“coisas”), dotados de sensores e/ou atuadores, capaz de reunir e transmitir dados (GARTNER, 2020) através de uma conexão com ou sem fio para a Internet (HARWOOD, 2020). Pode ser considerado como IoT do consumidor (cloT), que envolve a interconexão de dispositivos eletrônicos de consumo, assim como qualquer coisa que pertença ao ambiente do usuário, como casas, escritórios e cidades (PALATTELLA *et al.*, 2016).
- A Internet das Coisas Industrial (IIoT) visa integrar a tecnologia operacional com a tecnologia da informação. Consiste em conectar todos os ativos industriais, incluindo máquinas e sistemas de controle, com os sistemas de informação e processos de negócios (SISINNI *et al.*, 2018).

Embora tais conceitos tenham diferenças evidentes, eles compartilham alguns requisitos gerais de comunicação, como escalabilidade, necessidade de implementações de pilha de protocolo enxuta em dispositivos restritos e facilidade de uso para o ecossistema IP (*Internet Protocol*). Contudo, os requisitos específicos de comunicação podem ser muito diferentes, em termos de confiabilidade, QoS (do inglês, *Quality of Service*) e privacidade (PALATTELLA *et al.*, 2016).

Hermann, Pentek e Otto (2016), consideram a IoT e os CPS (do inglês, *Cyber-Physical System*) os componentes fundamentais para habilitar uma indústria a evoluir para a Indústria 4.0, pois a mesma faz uso da tecnologia do CPS para construir a plataforma da ICPS (do inglês, *Industrial Cyber-Physical System*), como demonstrado na Figura 2, que conecta o espaço virtual com o mundo físico, habilitando os equipamentos, materiais e componentes a serem inteligentes, pois a tomada de decisão será baseada em todos os dados do CPS (ZHOU; LIU; ZHOU, 2015).

Figura 2 – Plataforma ICPS na Indústria 4.0



Fonte: Adaptado de Zhou *et al.* (2015)

De maneira semelhante se faz necessário estabelecer a distinção dos conceitos entre CPS e ICPS:

- Os CPS são a integração da computação e de processos físicos. Sistemas computacionais monitoram e controlam processos físicos,

normalmente com feedbacks dos processos físicos que afetam os sistemas computacionais e vice versa (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2016).

- Os Sistemas Ciber-Físicos Industriais (ICPS) integram o ambiente físico e o virtual, conectando sensores e atuadores e gerando uma sobreposição virtual que possui todas as informações da sua versão física (ZHOU; LIU; ZHOU, 2015), estendendo tal integração até mesmo através do ciclo de vida da engenharia de produtos e processos, e de fornecedores e clientes ao longo da cadeia de suprimentos. A importância de um ICPS está principalmente na sua capacidade de coletar, analisar e usar efetivamente dados e informações digitalizadas em grande escala de diversas fontes diferentes para gerenciar, supervisionar e operar em ambientes industriais (COLOMBO *et al.*, 2017).

Segundo Zhou, Liu, Zhou (2015), a construção de um ICPS é um projeto complexo que envolve alguns fatores limitantes. Alguns desses desafios na construção de um ICPS são: a cooperação entre diferentes sistemas e a verificação e testes de um ICPS.

Uma planta fabril possui equipamentos com diversos fabricantes, componentes ou tecnologias e esse sistema físico deve operar em sinergia com o sistema virtual com o objetivo de estabelecer um modelo colaborativo que produza informação suficiente para se obter uma análise quantitativa e qualitativa. Na modelagem o ICPS deve considerar, o ambiente físico, os softwares e hardwares envolvidos, o atraso de rede, consumo de energia, entre outros fatores. Na integração de um ICPS o principal desafio é o desenvolvimento de uma interface flexível que possa suportar os diversos componentes, bem como suportar uma combinação entre eles. Ao combinar diversos componentes, um ICPS se torna complexo ao ser executado como um sistema completo. Se faz necessário executar diversos testes e ter uma rigorosa validação para que esse sistema se torne útil, contudo, não existe uma padronização ou especificações para verificação e testes de um ICPS (ZHOU, 2015).

2.2 VIRTUALIZAÇÃO

Movimentos como Indústria 4.0, IIoT e ICPS estão em execução pelo mundo e proporcionam à indústria condições para evoluir. Um dos resultados desses movimentos é um ambiente industrial que possui uma representação digital do mundo físico, realizam controle e tomam decisões gerenciais (GIVEHCHI *et al.*, 2017).

Overby (2008) definiu um processo virtual como um processo no qual a interação física de pessoas ou objetos pode ser removida. A condução de qualquer processo físico em um ambiente virtual é considerada como virtualização de processos. O principal facilitador da maioria dos processos virtuais é a TI (Tecnologia da Informação), sendo definida como “*hardware, software*, redes de comunicação e recursos de dados que coletam, transformam e disseminam informações” (SRIVASTAVA *et al.*, 2016).

2.2.1 Modelagem digital

A modelagem digital refere-se ao processo de criar uma representação matemática tridimensional de um objeto (VAUGHAN, 2011). Utilizando uma representação visual tridimensional, inúmeras aplicações e tecnologias podem ser desenvolvidas.

Tao *et al.* (2019) propuseram um modelo virtual dividido em quatro dimensões, sendo:

- modelo geométrico, que delinea a forma, tamanho, estrutura interna e posição. Para a construção de modelos geométricos, a fidelidade e a simplificação do modelo são pontos de atenção, pois a fidelidade do modelo sustenta a análise dos movimentos e a interação virtual.
- modelo físico, que fornece base para serviços como controle de qualidade e previsão de propriedades físicas.
- modelo comportamental, que representa os comportamentos sequenciais, simultâneos, vinculados, periódicos e aleatórios dos modelos físicos.
- modelo de regras, que revela o conhecimento implícito e retrata as tendências e padrões dos modelos físicos.

Em um contexto de Gêmeos Digitais, o modelo virtual se torna totalmente funcional quando todas as dimensões estão completamente representadas (TAO, 2022). Ao efetuar a modelagem de um sistema, podemos dividi-lo em (LEE; PARK, 2014): i) parte geométrica, que consiste das geometrias e desenhos 3D; ii) parte cinemática, que descreve os movimentos e ações que o modelo 3D possui e; iii) parte lógica, que representa o comportamento lógico do sistema.

Zhaoyun e Linjun (2022) descrevem uma arquitetura de cinco camadas da tecnologia de gêmeos digitais no campo de redes de distribuição de energia elétrica e analisa aplicações específicas em avaliação de condições, monitoramento em tempo real e previsão de carga. As camadas consistem em: rede física, detecção de dados, transmissão de dados, virtual e plataforma de aplicativo.

Em um contexto industrial, ao realizar a modelagem digital de processos industriais é possível o desenvolvimento de novas tecnologias, como a Simulação, o Comissionamento Virtual e Gêmeos Digitais, tratados a seguir.

2.2.2 Simulação

Modelagem é definida como o processo de desenvolver um modelo virtual de um sistema real e simulação é definido como a condução de experimentos com esse modelo com o propósito de entender o comportamento do sistema e/ou avaliar várias estratégias para a operação do mesmo (SHANNON, 1998). É necessário que o modelo desenvolvido tenha seu comportamento semelhante ao comportamento de resposta do sistema real aos eventos ao longo do tempo.

Segundo Shannon (1998), os termos “modelo” e “sistema” são os componentes chaves na definição de simulação. Modelo significa uma representação de um objeto ou sistema usando algum tipo de formalismo ou padrão. Sistema significa um grupo ou coleção de elementos inter-relacionados que cooperam para atingir um determinado objetivo e sobre o qual se pretende realizar algum estudo. Uma simulação é um estudo de um sistema realizado com o auxílio de um modelo.

Quando usamos simulação no contexto industrial, em sua maioria, se refere a eventos discretos, uma vez que tais eventos são capazes de espelhar a dinâmica de um sistema industrial (INGALLS, 2011). A simulação tem algumas vantagens sobre modelos matemáticos ao analisar sistemas (SHANNON, 1998), que são:

- A simulação é de fácil compreensão quando comparada a modelos matemáticos ou analíticos;
- É possível testar novas configurações sem a necessidade de gastar novos recursos para isso;
- Permite testar novas hipóteses de como e por que certos fenômenos acontecem no sistema;
- Permite identificar gargalos no fluxo de informação, material ou produtos e assim testar opções para o aumento do fluxo;

A maior vantagem da simulação é permitir testar cenários novos e desconhecidos a fim de responder questões hipotéticas a respeito desses cenários. Contudo, a modelagem necessária para a simulação é uma arte que exige um treinamento especializado e um amplo conhecimento de ferramentas para esse fim, e a dificuldade para obter o modelo virtual de um sistema físico, no contexto industrial, é considerado um desafio para a simulação (JOHANSSON, 2017).

Uma das técnicas de simulação no contexto industrial é a utilização da fábrica virtual, para verificar, analisar e visualizar as etapas de engenharia, como projeto, produção, comissionamento, operação e manutenção. As atividades podem ser categorizadas, segundo o seu foco (KIM *et al.*, 2013):

- Centrado na produção, onde o fluxo de material e de produção podem ser analisados para verificar layout da fábrica;
- Centrado no design, onde simuladores off-line são desenvolvidos e usados para projetar novos processos ou máquinas. Neste caso a fábrica virtual é utilizada para verificar arranjos, interferência, montagem e desmontagem de máquinas em uma planta industrial;
- Centrado no controle, onde os códigos de CLP's (Controlador Lógico Programável) são verificados com interações entre modelos mecânicos 3D e sistemas de controle. O conhecimento da operação também pode ser transferido para novos operadores com treinamento no ambiente virtual.

O trabalho desenvolvido por Bukantaitė (2020) apresenta alguns fatores para a modernização da produção, sendo: o custo da linha de produção, a possibilidade de produzir produtos complexos, a qualidade dos itens produzidos, a quantidade dos itens produzidos, tempo de produção, área utilizada e consumo de energia. A autora

realiza a virtualização de uma linha de produção de móveis de metal e simula com o software *Visual Components* cenários dessa linha de produção parcialmente automatizada e totalmente automatizada, avaliando assim através desses fatores por meio da simulação, a viabilidade para modernização de tal linha de produção.

Existem diversas ferramentas de software para a Simulação 3D, tanto soluções proprietárias como soluções *open source*. Com a evolução das ferramentas de simulação 3D, é possível simular sistemas cada vez mais complexos e novas tecnologias podem fazer uso das mesmas, como o Comissionamento Virtual e os Gêmeos Digitais.

2.2.3 Comissionamento virtual

Comissionamento pode ser definido como todas as atividades necessárias para colocar em operação um sistema completamente montado e mecanicamente revisado (ROLLE, 2019). Comissionamento virtual é o método de utilizar uma réplica ou cópia digital de um sistema mecânico para reduzir o tempo dispendido no comissionamento real (JOHANSSON, 2017).

Estima-se que cerca de 15% do tempo total de um projeto, ou cerca de 60% do tempo do comissionamento é consumido em correções de código de controle defeituoso (REINHART; WÜNSCH, 2007). Isso demonstra a importância de um comissionamento virtual na redução do tempo de projeto e diminuição de custos, pois sem o comissionamento virtual, um sistema de manufatura terá que ser implementado somente pelo comissionamento real com plantas reais e controladores reais, o que seria muito caro e demorado (LEE; PARK, 2014). A VDI (do alemão – *Verein Deutscher Ingenieure*, em português significa Associação dos Engenheiros Alemães) propõe em suas normativas (VDI 4499, Part 2) que o comissionamento virtual deve ser utilizado após a implantação do software de automação e antes do comissionamento real (OPPELT; URBAS, 2014).

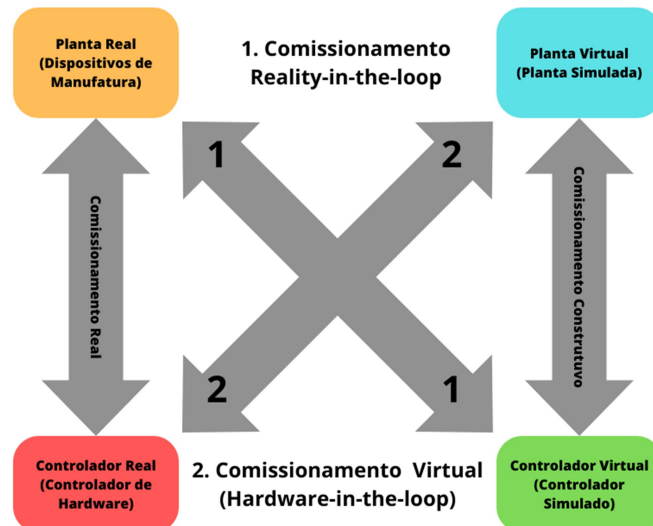
Podem existir quatro configurações para o comissionamento de sistemas (LEE; PARK, 2014):

- Comissionamento real: envolve uma planta real e um controlador real;
- Comissionamento virtual (*Hardware in the Loop*): envolve uma planta virtual e um controlador real;

- Comissionamento *Reality in the Loop*: envolve uma planta real e um controlador virtual;
- Comissionamento construtivo: envolve uma planta virtual e um controlador virtual.

Tais configurações podem ser melhor visualizadas na Figura 3:

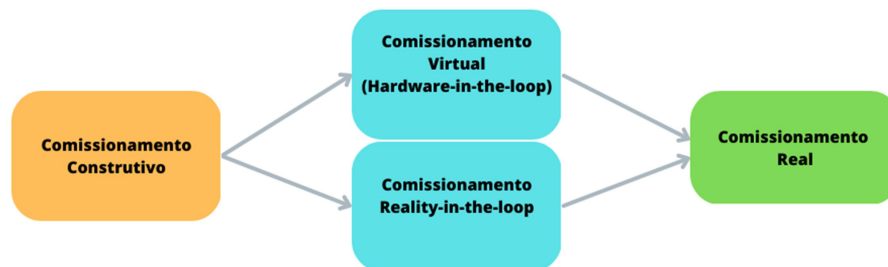
Figura 3 - Configurações de Comissionamento



Fonte: Adaptado de Lee e Park (2014)

Tais configurações, quando implementadas em conjunto fornecem um procedimento de validação do sistema, realizado em etapas (VERMAAK; NIEMANN, 2015), conforme a Figura 4:

Figura 4 – Possibilidades de desenvolvimento do comissionamento



Fonte: Elaborado pelo autor.

O comissionamento construtivo e o virtual permitem a verificação completa de um sistema de manufatura realizando uma simulação envolvendo somente um processo (planta) virtual. Para tal, requer-se um modelo virtual completo da planta com descrição detalhada ao nível de sensores e atuadores (JOHANSSON, 2017).

Laurindo *et al.* (2017) demonstra as configurações de comissionamento propostas por Lee; Park (2014) utilizando um software de simulação de eventos

discretos chamado Ururau. Os sistemas reais foram desenvolvidos em bancadas didáticas e os testes executados puderam ilustrar as diferentes possibilidades de comissionamento, bem como demonstrar a viabilidade do software, contudo os autores recomendam o uso do software para estudantes e empresas de pequeno porte, pois o mesmo possui um mecanismo interno, responsável pela comunicação do modelo de simulação e apenas um Controlador Digital, inviabilizando assim a simulação de sistemas complexos com diversos controladores.

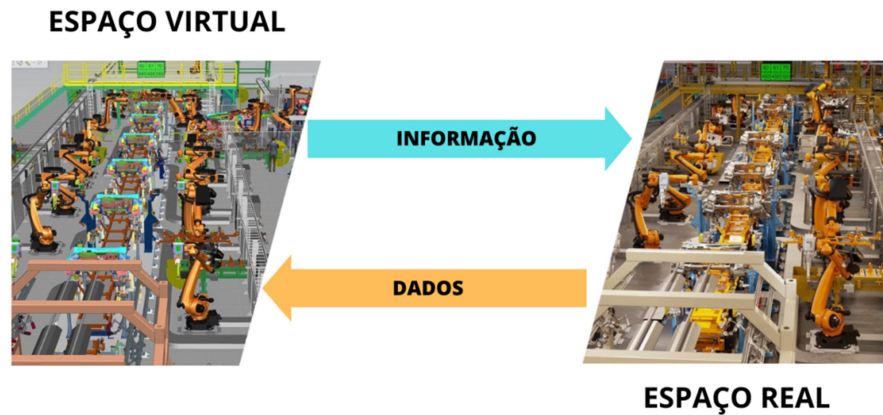
Schamp (2019) propõe uma abordagem de comissionamento virtual utilizando um modelo 3D. O autor combina o uso de um modelo digital com técnicas formais de verificação para reduzir as atividades manuais durante a fase de comissionamento de sistemas de controle industriais, Isto permite automatizar a verificação do sistema de controle e ainda entrega uma representação visual do comportamento do sistema. O autor utiliza uma estação didática da Festo e demonstra a abordagem de duas formas, ao utilizar dois softwares: *Mechatronics Concept Designer* (MCD) e o *Visual Components*. Ao utilizar as técnicas formais de verificação na fase de comissionamento juntamente com um modelo 3D, o autor conclui que há uma diminuição de esforços manuais, tendo em vista a utilização da representação virtual do sistema.

2.2.4 Gêmeos digitais

O uso de gêmeos digitais tornou-se popular durante a digitalização de máquinas e sistemas de produção na indústria no início dos anos 2000 (EL SADDIK, 2018). Provavelmente, a primeira definição de gêmeo digital foi feita pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) no seu *roadmap* de Tecnologias Integradas (SHAFTO *et al.*, 2010), e foi ligeiramente adaptado por Glaessgen (2012), que o definiu como uma simulação probabilística integrada de um produto complexo, utilizando uma réplica digital fidedigna de forma a espelhar a vida do seu gêmeo correspondente.

Grieves (2014) introduziu o conceito de gêmeos digitais na indústria, sendo constituído de três partes principais: o produto físico no espaço real, o produto virtual no espaço virtual e a conexão de dados e informações que conecta o produto físico e o produto real, conforme pode ser verificado na Figura 5.

Figura 5 - Modelo Conceitual de Gêmeos Digitais

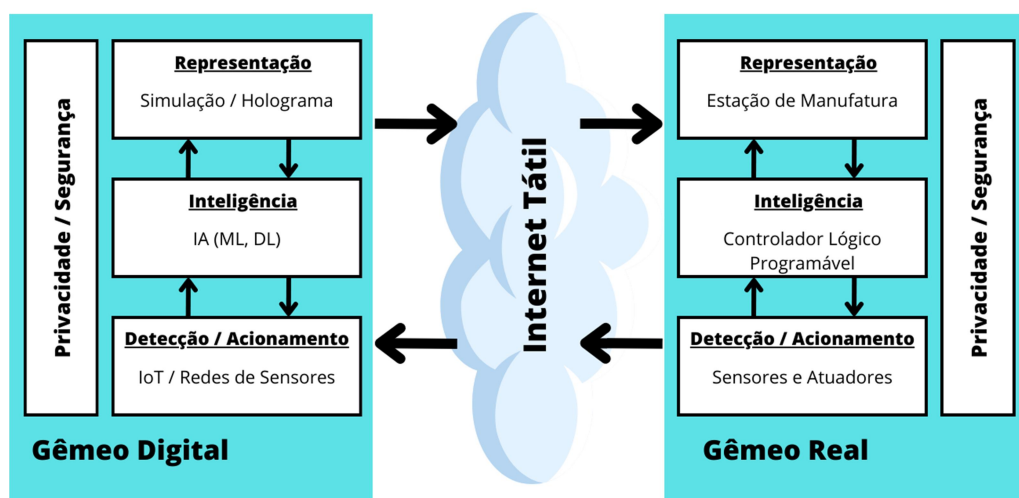


Fonte: Adaptado de Grieves (2014).

Com o surgimento da Indústria 4.0, o foco dos gêmeos digitais mudou para a fabricação e produtos inteligentes. Nesse contexto, ele pode ajudar a garantir a continuidade das informações durante todo o ciclo de vida do produto, comissionamento virtual, e suporte à decisão e previsões de comportamento do sistema na fase de desenvolvimento do produto, bem como em todas as fases subsequentes do ciclo de vida com base em simulações auxiliadas por computador (HAAG, 2018).

El Saddik (2018) relaciona algumas características do gêmeo digital, ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Comunicação / interação entre gêmeos digital e real



Fonte: Adaptado de El Saddik (2018)

- Identificador único – Cada gêmeo digital possui um identificador exclusivo para se comunicar com seu gêmeo real.

- Sensores e Atuadores – Gêmeos reais podem ser equipados com sensores para que o gêmeo digital possa replicar seus sentidos, usando os atuadores apropriados, dependendo das necessidades da aplicação.
- Inteligência Artificial – O gêmeo digital pode ser equipado com um controlador com inteligência artificial para tomar decisões rápidas e inteligentes em nome do seu gêmeo real.
- Comunicação – Os gêmeos digitais devem ser capazes de interagir quase em tempo real com o ambiente, gêmeo real e/ou outros gêmeos digitais.
- Representação – Os gêmeos digitais podem ter uma representação virtual como um avatar 3D, um holograma ou serem componentes de software sem uma representação tangível.
- Confiabilidade – O gêmeo digital deve possuir confiabilidade, para que o gêmeo real possa efetuar a interação com segurança.
- Privacidade e Segurança – O gêmeo digital deve ser capaz de proteger a identidade e privacidade do seu gêmeo real.

O conceito de gêmeos digitais definido por Grieves (2014), ao permitir a transmissão contínua de dados entre o mundo físico e o mundo virtual, facilita os meios para monitorar, entender e otimizar as funções de todas as entidades físicas, vivas e não vivas, ampliando assim seu conceito a outras tecnologias, afetando setores além da manufatura (EL SADDIK, 2018).

Contudo, Boschert e Rosen (2016) argumentam que apenas as informações e dados relevantes compõem o gêmeo digital; assim os modelos que o compõem são projetados especificamente para a finalidade a que foram destinados. Tal argumento possibilita a criação de versões mais leves do modelo virtual de forma a selecionar somente os aspectos mais relevantes do sistema e desprezar aspectos desnecessários, reduzindo o tamanho dos modelos e permitindo um processamento mais rápido.

Dentro das definições de Gêmeos Digitais, alguns termos são frequentemente tratados como sinônimos: *Digital Model*, *Digital Shadow* e *Digital Twin*, sendo que o proposto é uma classificação de Gêmeos Digitais em três

subcategorias de acordo com o seu nível de integração de dados (KRITZINGER, 2018), sendo:

- *Digital Model* (em português, Modelo Digital) - É uma representação digital de um objeto físico que não usa nenhum tipo de troca de dados automática entre o objeto físico e o objeto digital. Toda a troca de dados é feita de forma manual. Uma mudança no estado do objeto físico não tem efeito direto no objeto digital e vice-versa.
- *Digital Shadow* (em português, Sombra Digital) – Baseado na definição de *Digital Model*, caso haja um fluxo de dados automático entre o objeto físico e o objeto digital, podemos chama-lo de Sombra Digital. Portanto uma mudança de estado do objeto físico leva a uma mudança no estado do objeto digital, mas o sentido inverso continua sem a troca de dados automática.
- *Digital Twin* (em português, Gêmeo Digital) – Se o fluxo de dados entre o objeto físico e o objeto digital é totalmente integrado em ambas as direções, podemos considera-lo um Gêmeo Digital. Uma mudança no estado do objeto físico leva a uma mudança direta no objeto digital e vice-versa.

Algumas características são mais relevantes para a criação de um gêmeo digital, as quais são citadas a seguir (SCHROEDER, 2021):

- Identificação: os produtos precisam ter identificação global única para vincular cada componente físico à sua representação digital.
- Gerenciamento de dados: os dados e informações dos produtos são criados e evoluem ao longo do ciclo de vida.
- Modelos de gêmeos digitais: diferentes tipos de modelos de produto são criados ao longo do ciclo de vida. Tais modelos são, por vezes, interoperáveis entre si, e isto se torna um problema crítico; portanto, é necessário ter uma forma de integrar todos esses modelos.
- Análise de dados de gêmeos digitais: a análise de informações é extraída de grandes quantidades de dados e gerada ao longo de toda a vida do produto real, às vezes com restrições de tempo real.
- Interface homem-máquina: ressalta a dificuldade em recuperar e mostrar as informações aos usuários certos.

- Arquitetura e comunicação: o gêmeo digital armazena suas informações em diferentes bases de dados. Assim, é necessário ter uma forma de recuperar informações dessas bases de dados de qualquer lugar e a qualquer momento. Além disso, os dados devem ser recuperados dos sensores (colocados no dispositivo físico) e enviados ao banco de dados por meio de protocolos de comunicação.
- Simulação: ressalta a importância da simulação no uso de gêmeos digitais.

Schroeder (2021) apresenta uma arquitetura de referência de gêmeo digital, levando em consideração as características citadas acima. A arquitetura possui os seguintes componentes:

- Modelo físico – Todo gêmeo digital deve estar associado a pelo menos um modelo físico, que é a representação virtual do dispositivo físico. A representação virtual pode ser desde um vetor que contém os estados do dispositivo até um modelo complexo que permita simulações.
- API (application–programming interface) – A arquitetura de referência especifica que um gêmeo digital deve possuir pelo menos uma API, que é um conjunto de especificações que permite o acesso externo às funcionalidades disponibilizadas, como por exemplo, consultar o estado atual do modelo virtual ou acionar o início de uma simulação.

Opcionalmente, o gêmeo digital pode possuir outros componentes, como: armazenamento, gerar eventos, executar métodos, controlar o acesso aos seus recursos e fornecer interfaces homem-máquina para os usuários. Esses componentes podem suportar a implementação da maioria das funcionalidades de um gêmeo digital.

Wu *et al.* (2021) propõe uma modelagem conceitual de um gêmeo digital, baseado em uma estrutura de gêmeo digital pentadimensional proposta por Tao *et al.* (2019) para orientação no processo de modelagem, a fim de representar o relacionamento entre objetos gêmeos digitais e seus atributos. O processo e as etapas para a construção do modelo conceitual são:

1. Análise funcional do gêmeo digital para identificar e decompor a função total em sub-funções através das entradas e saídas;

2. Classificação das funções em módulos correspondentes com as seguintes dimensões: entidade física, entidade virtual, interação, dados e ambiente;
3. Modelagem inicial baseado na entidade física e verificação da interação entre os componentes do gêmeo digital;
4. Melhoria do modelo virtual, identificando o modelo de decisão e os componentes que interagem com o modelo;
5. Incorporação dos usuários no modelo conceitual. É analisado a interação entre o modelo e o usuário e vice-versa;
6. Aprimoramento do modelo conceitual baseado nos dados que os componentes fornecem.

Arnarson *et al.* (2022) propõe um sistema de manufatura reconfigurável (RMS, acrônimo inglês para reconfigurable manufacturing system), altamente flexível, onde um robô móvel é integrado ao sistema e monitora e reconfigura o sistema físico através do gêmeo digital do RMS. Os autores utilizam o gêmeo digital como uma ferramenta visual para planejar o layout do sistema e simular o fluxo de montagem e produção para diferentes layouts. O software utilizado para esse fim é o Visual Components, onde a simulação pega as posições das estações de trabalho e envia para o servidor OPC UA. O robô móvel obtém automaticamente essas novas coordenadas das estações físicas e começa a movimentá-las.

Soori *et al.* (2023) afirma que embora a produção virtual e seus benefícios tem sido amplamente estudados, há uma notável lacuna na compreensão abrangente de uma implementação prática. Os atuais estudos estagnaram na construção de modelos e a investigação existente sobre tecnologias e ferramentas é discreta (TAO, 2022).

3 METODOLOGIA DE VIRTUALIZAÇÃO

A proposta deste trabalho foi desenvolver uma metodologia prática para a virtualização de sistemas de manufatura e através dessa criar um modelo virtual de um sistema de manufatura flexível, utilizando como referência as estações didáticas da *Festo Didactic* presentes na UNESP – Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba. Buscou-se também verificar a interação deste modelo virtual com Controladores Lógicos Programáveis utilizando protocolos de comunicação aceitos no contexto da Indústria 4.0, como o OPC UA.

Considerando que na literatura pesquisada não foi encontrada uma metodologia prática de virtualização de processos industriais que pudesse ser utilizado, a metodologia desenvolvida e aplicada no desenvolvimento do trabalho foi dividida em duas partes: a primeira parte refere-se à metodologia de modelagem individual das estações de trabalho virtuais. A segunda parte refere-se à metodologia de integração dessas estações de trabalho virtuais de forma a compor um Sistema de Manufatura.

3.1 METODOLOGIA DE MODELAGEM

A metodologia de modelagem de estações de trabalho individuais seguem inicialmente cinco etapas (Figura 7), que tem o intuito de facilitar o desenvolvimento da linha de raciocínio para a modelagem, onde posteriormente é demonstrada de uma forma mais detalhada (Figura 8). Cada estação de trabalho é considerada de forma individual e não como um sistema de manufatura completo, para que posteriormente o sistema completo seja modular, facilitando assim alterações de layout ou possíveis adequações.

As cinco etapas da metodologia de modelagem das estações de trabalho são:

1. **Estudo da Estação Física** – É necessário o entendimento de como a estação de trabalho física opera, quais são os sensores e atuadores presentes na mesma e quais os tipos de movimentos estão presentes na estação de trabalho que se deseja virtualizar, pois muito dos conhecimentos sobre o mesmo poderá ser obtidos através desta etapa.

2. **Geometrias 3D** – Através da representação virtual (desenho 3D) da estação de trabalho, é possível estabelecer quais geometrias ou partes do desenho terão algum tipo de cinemática ou que são sensores da estação.
3. **Cinemática** – Através da análise do sistema real é possível determinar e estabelecer que tipos de cinemática as partes separadas nas geometrias 3D possuem (movimentos lineares ou rotacionais).
4. **Sensores e Sinais** – faz-se necessária a criação dos sensores que a estação de trabalho possui e os sinais que servem tanto para serem acionados pelos sensores como para servirem de gatilho para executar a cinemática da estação.
5. **Comunicação externa** – é realizado testes de comunicação das cinemáticas e sensores da estação de trabalho por meio de conexão do modelo virtual com algum dispositivo externo.

Figura 7 – Passos Iniciais da metodologia de modelagem



Fonte: Elaborado pelo autor.

Baseado nessas cinco etapas (Figura 7) foi formulado a metodologia de modelagem das estações de trabalho de forma mais detalhada e direcionada para

sistemas de manufatura, demonstrada na Figura 8, onde os passos são sinalizados da mesma cor que as etapas anteriormente elencadas.

Figura 8 – Etapas para a virtualização das estações



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tal método foi proposto para ser genérico, pois cada estação de manufatura pode possuir uma particularidade dentro de determinada etapa que exige então uma especificidade ou tratativa apropriada e propicia que posteriormente o sistema seja modular. As etapas para a virtualização das estações de manufatura são:

- **Estudo da Estação Física** – como mencionado anteriormente, é necessário o total entendimento de como a estação de manufatura opera. Sensores e atuadores existentes, movimentos que estação de manufatura executa e os tipos de sinais necessários no seu funcionamento são apenas alguns aspectos a serem considerados. Quanto maior o conhecimento do funcionamento da estação, maior será a facilidade no momento da virtualização.
- **Importação de desenhos 3D** – Nessa etapa partimos do pressuposto que já se tem disponível os desenhos 3D das estações de manufatura. Nessa etapa é definida a ferramenta de modelagem a ser utilizada, onde é necessário realizar a importação do desenho 3D da estação. Dependendo do software escolhido pode ser necessário algum tipo de conversão desse desenho 3D para que seja possível a manipulação no software.
- **Separação das geometrias** – As partes do desenho 3D podem executar movimentos ou desempenhar funções na estação de manufatura, sendo necessário que essas geometrias sejam separadas. Essa etapa é importante para trazer maior similaridade do modelo virtual com a sua respectiva estação de manufatura física.

- **Definição da Cinemática** – Através do estudo da estação de manufatura física é possível determinar os movimentos ou alterações de estado que a mesma irá executar. Movimentos lineares ou rotacionais e alterações em indicadores luminosos são exemplos considerados nessa etapa. Juntamente com a etapa anterior, essa etapa traz o realismo para a simulação da estação de manufatura.
- **Criação de Funções Cinemáticas** – Cada movimento ou alteração de estado é definido na ferramenta de modelagem como uma rotina ou uma função, caso seja possível a programação dos mesmos. A criação de funções para cada movimento ou alteração de estado traz uma maior organização da estação de manufatura virtual, facilitando o uso dessas movimentações ou alterações no decorrer da virtualização.
- **Criação dos Sensores** – Assim como a estação de manufatura possui sensores que detectam partes ou peças, o modelo virtual também deve ter sensores ou de alguma forma detectar as respectivas peças virtuais. Assim como os sensores físicos da estação de manufatura são de suma importância para o funcionamento da mesma, os sensores virtuais são necessários para que as peças de trabalho possam ser reconhecidas na simulação.
- **Criação dos Sinais** – É necessária a criação de todos os sinais que a estação de manufatura possui, bem como sinais que serão utilizados como gatilhos para executar as funções cinemáticas (por exemplo, um sinal que é utilizado para acionar um atuador na esteira de manufatura física pode servir de gatilho na estação de manufatura virtual, desde que o mesmo esteja devidamente definido na ferramenta de modelagem).
- **Vinculação de Sinais** – Os sinais criados devem estar vinculados no modelo virtual. Eles podem estar vinculados aos sensores ou às funções cinemáticas. Se considerarmos um cenário de comunicação entre os espaços físico e virtual, os sinais que forem vinculados aos sensores da estação de manufatura virtual poderão realizar comunicação no sentido virtual-físico, e os sinais que forem vinculados às funções cinemáticas poderão realizar comunicação no

sentido físico-virtual. A criação dos sinais juntamente com a vinculação dos mesmos é o que habilita a simulação a realizar a troca de informações entre os ambientes físico e virtual.

- **Comunicação Externa** – Realização de testes de comunicação do modelo virtual com dispositivos externos (onde pode ser um CLP ou mesmo a estação de manufatura física). Nessa etapa são necessários que sejam relacionados os sinais de entrada e saída da estação de manufatura física com os sinais da estação virtual. É possível verificar o funcionamento dos movimentos ou alterações de estado da estação de manufatura virtual através desses testes. Tal etapa tem a importância de validar o funcionamento da estação de manufatura e a comunicação entre os ambientes físico e virtual.

A metodologia de modelagem proposta não considera variáveis dinâmicas presentes em um sistema de manufatura, bem como o sincronismo em tempo real, tendo em vista que a mesma foi desenvolvida com o propósito de servir como um *Digital Model*.

3.2 METODOLOGIA DE INTEGRAÇÃO

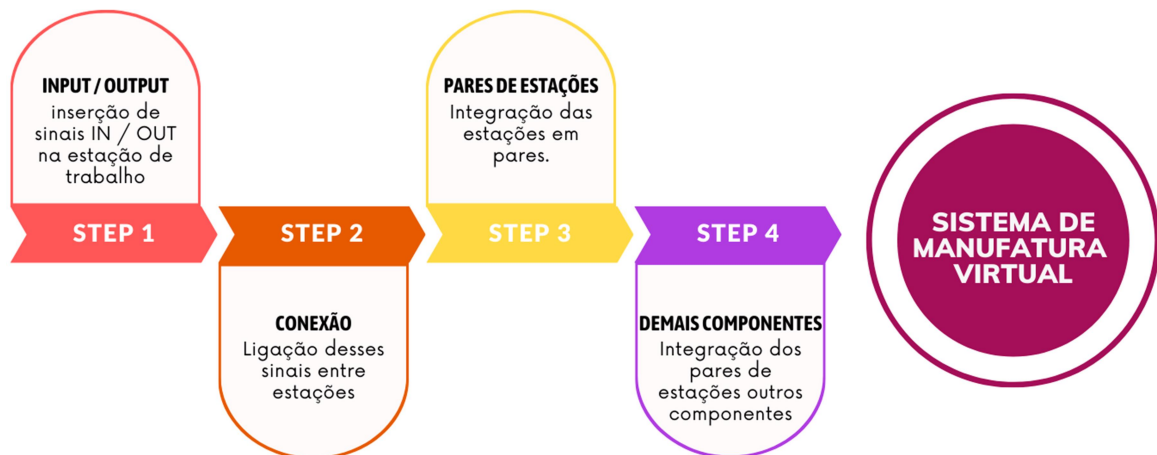
Tendo em vista que a modelagem das estações de manufatura ocorre de forma individual, é necessário que haja a integração dessas estações virtuais para compor um Sistema de Manufatura, sendo proposta a seguinte metodologia composta das etapas (Figura 9):

- **Input / Output** – É necessária a criação de sinais de Input / Output nas estações de trabalho, para que haja troca de sinais, e consequentemente comunicação, nas estações predecessoras ou antecessoras. Tal etapa é importante, pois no sistema de manufatura físico tal comunicação ocorre entre as estações de trabalho.
- **Conexão** – Ligação desses sinais (Input/Output), das estações de trabalho que são posicionadas uma ao lado da outra no layout do sistema de manufatura. Nesse cenário, o sinal de Output de uma estação, será ligado no sinal de Input da estação subsequente e vice-versa. Apesar de as estações virtuais estarem uma ao lado da outra,

essa etapa ressalta a importância dessa conexão dos sinais, para que o sistema de manufatura seja funcional.

- **Pares de Estações** – Ao realizar a integração das estações de manufatura em pares é possível fracionar a integração do sistema de manufatura e mitigar a ocorrência de erros, sanando-os com maior agilidade. Nessa etapa também são realizados testes de funcionamento em pares de estações de manufatura. Essa etapa é importante, pois já é possível verificar o funcionamento do modelo virtual como um sistema e não somente como uma estação de trabalho individual.
- **Integração de Componentes** – Em alguns casos, pode ser necessária a integração dos pares de estações de trabalho a outros componentes a fim de formar um sistema de manufatura. Essa etapa reservada para realizar essa integração de outros componentes, pode necessitar de sinais de Input/Output.

Figura 9 – Metodologia de integração das estações de trabalho para compor um Sistema de Manufatura



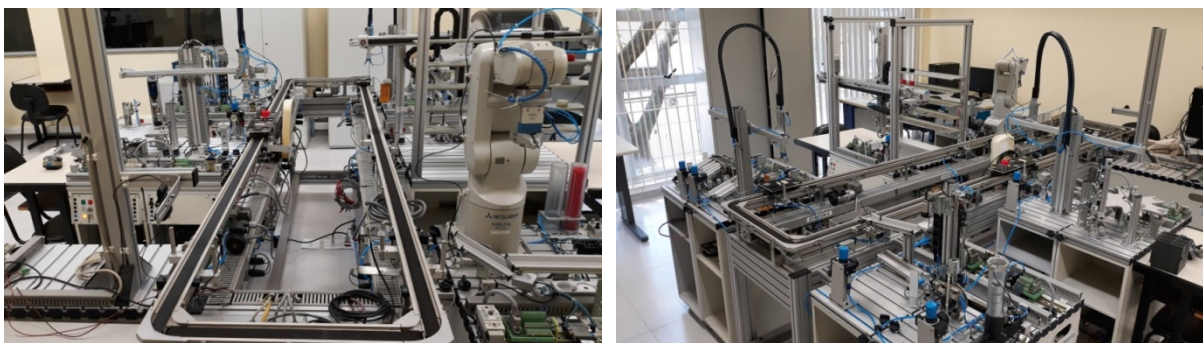
Fonte: Elaborado pelo autor.

4 MATERIAIS UTILIZADOS

4.1 SISTEMA DE MANUFATURA FLEXÍVEL

Para aplicação da metodologia proposta, foi virtualizado o sistema de manufatura flexível (FMS) presente no Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba (UNESP), que possui estações didáticas da *Festo Didactic*. Todo o sistema de manufatura conta com dez estações de produção, algumas agrupadas em pares, conforme a Figura 10, e essas estações são interligadas por uma esteira circular com pontos de parada nas respectivas estações.

Figura 10 – Sistema de Manufatura Festo Didactic utilizado como referência

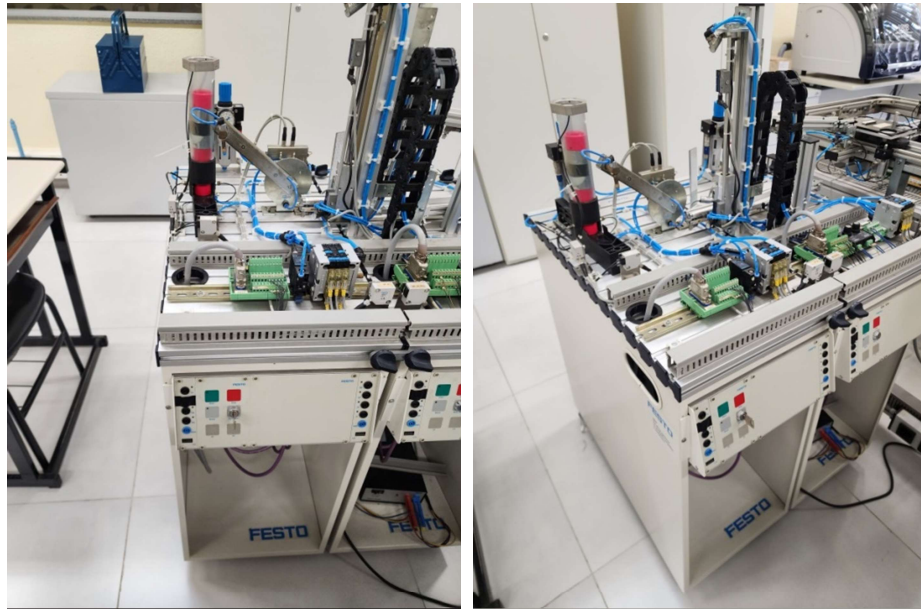


Fonte: Elaborado pelo autor.

As estações que compõem o sistema são:

1) *Distribution Station* – É o início do sistema de manufatura. Distribui as peças de trabalho de um magazine, que pode armazenar até oito unidades. O preenchimento do magazine é monitorado por um sensor e um atuador empurra as peças individualmente. Em seguida, as peças são transportadas através de um braço giratório que utiliza uma ventosa de sucção para a próxima estação (Figura 11).

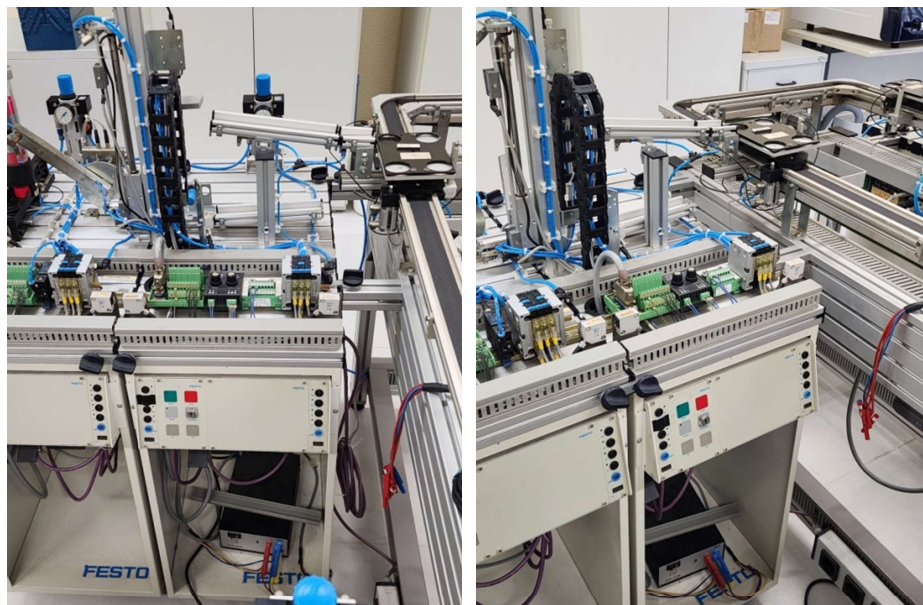
Figura 11 – Estação de produção “Distributing”



Fonte: Elaborado pelo autor.

2) Testing Station – Responsável por determinar as características de material das peças de trabalho. Um sensor identifica a cor da peça, um sensor capacitivo detecta a peça, independente de cor e um sensor difuso identifica peças metálicas e vermelhas. Peças pretas não são detectadas pelo sensor difuso. Ao levantar a peça, checa sua altura, através de um sensor e um atuador linear guia a peça de trabalho através de uma calha acolchoada de ar para a próxima estação ou pode descartar a peça guiando-a para a calha inferior (Figura 12).

Figura 12 – Estação de produção “Testing”



Fonte: Elaborado pelo autor.

3) Processing Station – As peças de trabalho são processadas e testadas em uma mesa giratória. A posição da mesa é detectada por um sensor indutivo. Na mesa giratória as peças são testadas e perfuradas em dois processos paralelos. Um atuador solenoide com um sensor indutivo checa se as peças estão inseridas na posição correta. Durante a perfuração a peça é presa por outro solenoide atuador. Ao finalizar os processos a peça é retirada através de um ejeter elétrico (Figura 13).

Figura 13 – Estação de produção “Processing”



Fonte: Elaborado pelo autor.

4) Handling Station – Essa estação possui uma garra de dois eixos. As peças são detectadas na garra por um sensor ótico que pode diferenciar se as peças são ou não pretas. Vários critérios podem ser definidos para o dispositivo deixar a peça e também é possível transferir as peças para uma estação subsequente (Figura 14).

Figura 14 – Estação de produção “Handling”



Fonte: Elaborado pelo autor.

5) Vision Station – Estação com uma câmera que detecta as peças de trabalho, podendo ser utilizada como controle de qualidade ou inspeção.

6) Robot Station – As peças são transportadas pelo braço robótico que é equipado com uma garra pneumática que possui um sensor ótico, que diferencia se a peça é preta ou não. As peças de trabalho podem então ser colocadas em diferentes locais baseado nesses critérios e é possível que o braço robótico transfira as peças para uma estação subsequente (Figura 15).

Figura 15 – Estação de produção “Robot”



Fonte: Elaborado pelo autor.

7) Assembly Station – O robô ao pegar a peça de trabalho estabelece a orientação da peça e coloca na orientação certa para a montagem. Podem ser colocados pistões pretos ou metálicos na montagem dessas peças, onde o braço robótico vai colocar esses componentes. Após colocar o pistão dentro do corpo da peça, uma tampa é coletada pelo braço robótico que verifica a correta orientação para encaixe no corpo da peça de trabalho. Após tais processos a peça pode ser transferida para as estações subsequentes (Figura 16).

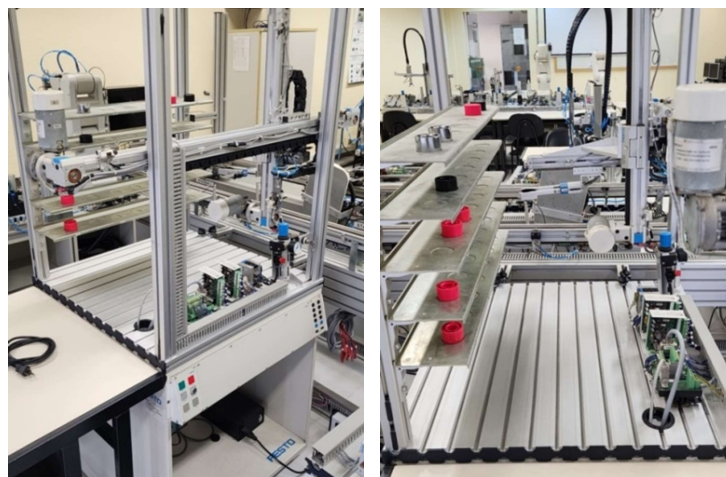
Figura 16 – Estação de produção “Assembly”



Fonte: Elaborado pelo autor.

8) AS-RS Station – A AS-RS (*Automatic Storage / Retrieval System*) é uma estação que pode armazenar, reter ou realocar peças de trabalho (Figura 17).

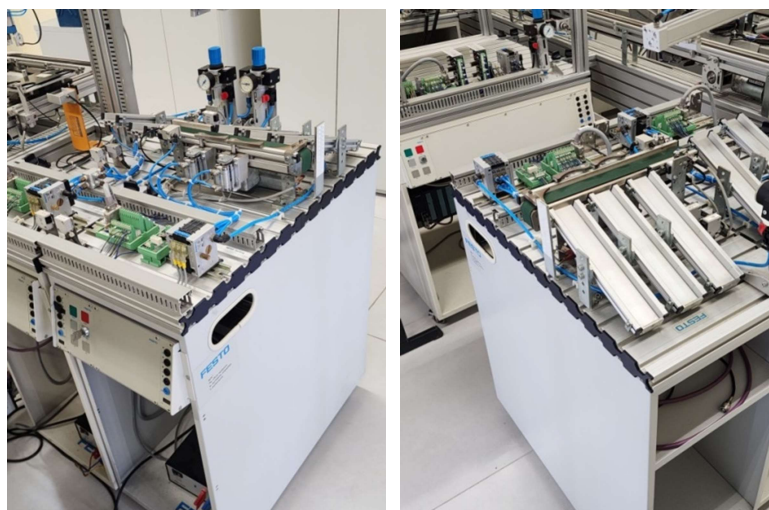
Figura 17 – Estação de produção “AS-RS”



Fonte: Elaborado pelo autor.

10) Sorting Station – A estação separa as peças de trabalho em três calhas diferentes. Um sensor difuso detecta a peça de trabalho no início da esteira. As características das peças (preta, vermelha ou metálica) são identificadas por sensores na frente do pistão que retém as peças por um momento e as mesmas são direcionadas para sua respectiva calha através de um braço que é acionado quando houver correspondência da calha com a peça de trabalho. A estação também possui um sensor reflexivo para monitorar se as calhas já estão cheias (Figura 18).

Figura 18 – Estação de produção “Sorting”



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a aplicação da metodologia proposta, as estações que foram objeto de estudo neste trabalho foram: *Distribution*, *Testing*, *Handling*, *Processing* e *Sorting*. Além das estações a esteira circular que conecta todas as estações, também foi modelada.

4.2 VISUAL COMPONENTS

O trabalho utiliza o software *Visual Components* (VC) como ferramenta para modelagem do sistema virtual, onde foi utilizada a versão Premium 4.4.

Figura 19 – Tela de inicialização do software



Fonte: Elaborado pelo autor, utilizando o software Visual Components Premium 4.4

O *Visual Components* (VC) é um dos softwares pioneiros na simulação de manufatura 3D. O software permite criar modelos virtuais de sistemas de manufatura. Esses modelos podem ser usados para testar e otimizar processos de produção, criar protótipos virtuais de sistemas e treinar operadores de máquinas. Algumas das principais aplicações do *Visual Components* são:

1. **Simulação de Fábricas:** amplamente utilizado na simulação de fábricas, permitindo que os usuários criem modelos virtuais de linhas de produção e sistemas de manufatura. Esses modelos podem ser usados para avaliar o desempenho dos sistemas de manufatura, testar diferentes cenários e fazer previsões sobre o desempenho futuro.
2. **Projeto de Sistemas de Manufatura:** também pode ser usado para projetar sistemas de manufatura, permitindo que os usuários criem protótipos virtuais de sistemas e testem diferentes configurações. Isso ajuda a reduzir os custos de desenvolvimento, uma vez que os sistemas podem ser testados virtualmente antes de serem construídos.
3. **Treinamento de Operadores de Máquinas:** o *Visual Components* pode ser usado para treinar operadores de máquinas em um ambiente virtual, permitindo que eles se familiarizem com os sistemas de manufatura antes de trabalharem com máquinas reais. Isso ajuda a reduzir o tempo de treinamento e melhora a segurança no local de trabalho.
4. **Análise de Layout de Fábricas:** pode ser usado para analisar o layout de fábricas, permitindo que os usuários avaliem diferentes configurações e encontrem a melhor solução para maximizar a

eficiência da produção. Isso ajuda a reduzir o tempo de produção e aumentar a produtividade geral.

5. **Planejamento de Produção:** também pode ser usado para planejar a produção, permitindo que os usuários simulem diferentes cenários e encontrem a melhor configuração para a produção. Isso ajuda a reduzir os custos de produção e melhorar a eficiência geral da fábrica.

O software é proprietário e possui três versões: *Essenciais*, *Professional* e *Premium*. Para a virtualização das estações (no software VC são tratados como componentes) é necessário que inicialmente: seja construído o desenho 3D dos componentes no próprio software ou que tais desenhos existam em algum outro formato. No presente trabalho os desenhos 3D foram fornecidos pela *Festo Didactic* no formato “.STP”. Para esse formato de arquivo, não foi necessário nenhum tipo de conversão, pois o VC já reconhece o formato.

4.3 INTERAÇÃO COM CLP'S

Para verificação da interação dos modelos virtuais das estações de trabalho do FMS com CLP foram utilizados os softwares:

- Simatic Manager, da Siemens, que possui o PLCSim (simulador de CLP). A versão utilizada é a 5.6. Por utilizar o Simatic Manager, é necessário também a utilização de um software que atue como server para o PLCSim. O software utilizado foi o NettoPLCSim, na sua versão 1.2.
- CodeSYS (Controller Development System), versão 3.5 SP16 patch 4. É um software de código aberto utilizado como ferramenta de programação de sistemas de automação, que possui um simulador de CLP integrado e server, onde padrões industriais como OPC UA e MQTT podem ser conectados ao sistema.

5 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo é apresentada a aplicação da metodologia proposta. São apresentados de que forma se deu a modelagem e virtualização das estações no *Visual Components* (VC), a integração dos pares de estações e posteriormente a integração das estações com a esteira circular e finalmente a comunicação com CLP's virtuais.

5.1 MODELAGEM DAS ESTAÇÕES

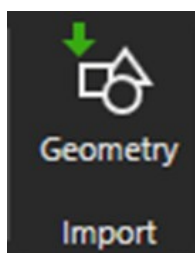
Para a aplicação da metodologia proposta no Capítulo 3, foi utilizado o software *Visual Components* para modelagem das estações de manufatura e a esteira circular que conecta todas as estações. A seguir, é apresentada a modelagem seguindo a metodologia de modelagem (Figura 08).

5.1.1 Etapa 1 – importação de desenhos 3d

Para obter um objeto virtual que represente fielmente o seu objeto físico, inicialmente foi necessário ter um desenho 3D desse objeto. Quanto mais detalhado for esse desenho 3D, mais próximo o objeto virtual será do real. Neste trabalho, todos os desenhos 3D foram fornecidos pela Festo Didactic. No *Visual Components* também é possível desenhar 3D, através da construção de formas geométricas.

No *Visual Components*, existe o botão “*Import Geometry*”, localizado na barra de ferramentas da aba “*MODELING*” (Figura 20).

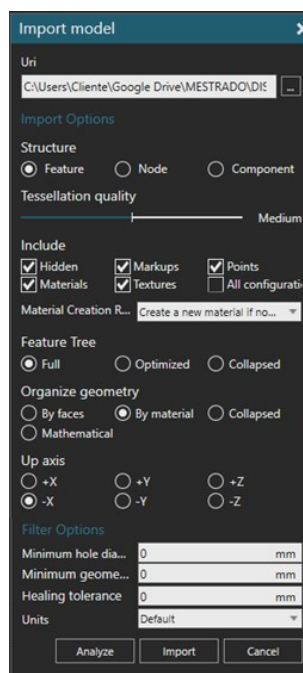
Figura 20 – botão “Import Geometry”



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao selecionar o desenho 3D (o software aceita diversos formatos de arquivo), aparecem várias opções de importação do modelo 3D (Figura 21). É possível também analisar o modelo 3D antes de efetuar a importação propriamente dita.

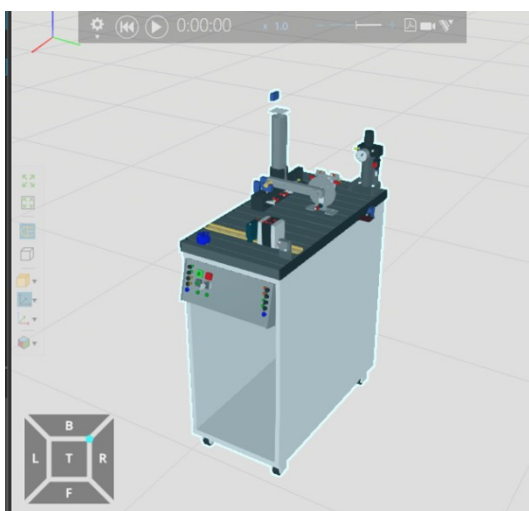
Figura 21 – Janela “Import Model”



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a importação, o modelo 3D é convertido em um componente do software, contudo sem nenhum tipo de movimentação ou acionamento (Figura 22).

Figura 22 – Modelo 3D importado para o Visual Components

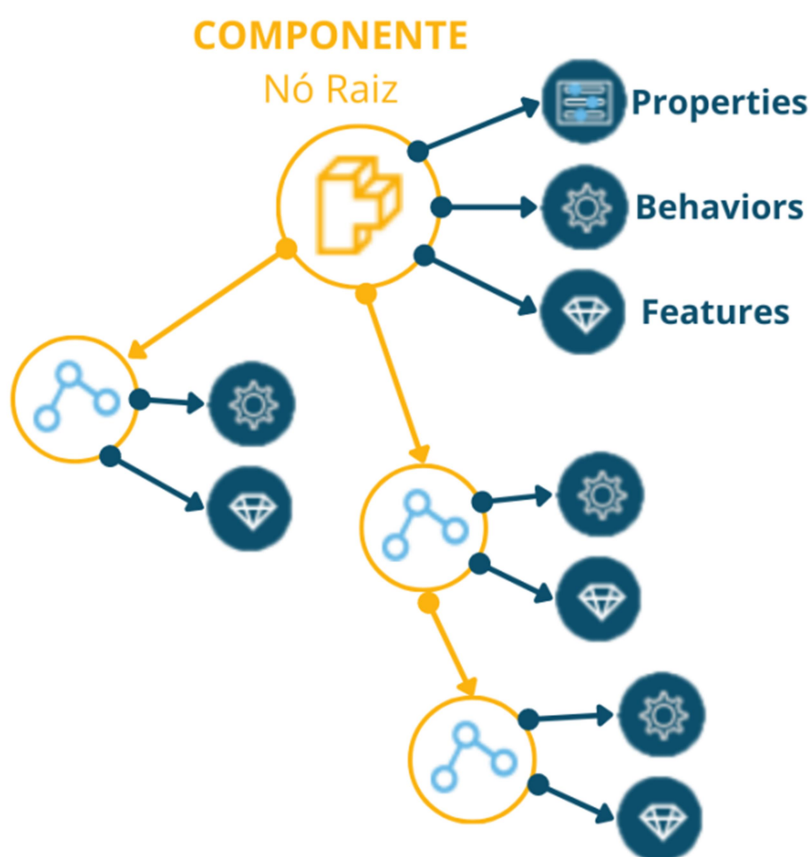


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1.2 Etapa 2 – separação da geometria

Após o desenho 3D se tornar um componente do software, foi necessário separar as geometrias, pois existem partes desse componente que executam algum tipo de movimento ou ação. Um componente apresenta sua estrutura da seguinte forma: o componente é o nó raiz. Dentro dele existem as “*Properties*”, “*Features*”, “*Behaviors*” e “*Links*”. Os *links* se comportam como sub-nós do componente e dentro dos *links* existem “*Behaviors*” e “*Features*” (Figura 23).

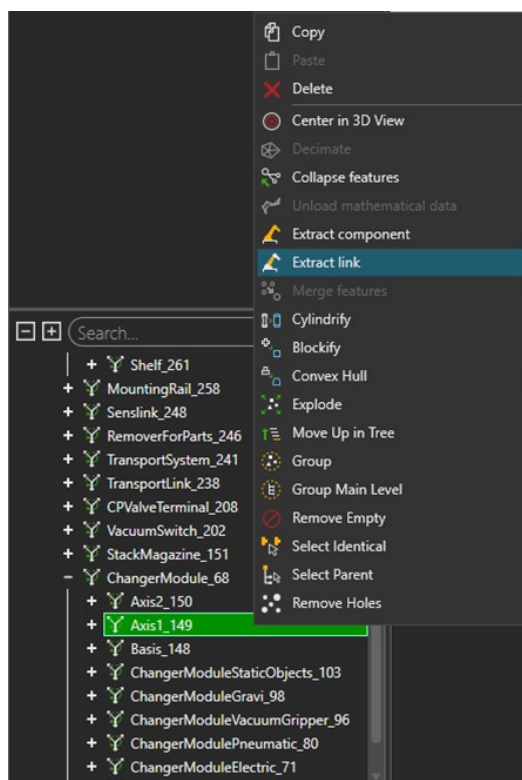
Figura 23 – Estrutura do componente



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a modelagem das estações foram separadas as geometrias em “*links*” do componente, selecionando as geometrias de cada “*link*” na Janela “*Feature*” e ao clicar com o botão direito, escolhendo a opção “*Extract link*” (Figura 24).

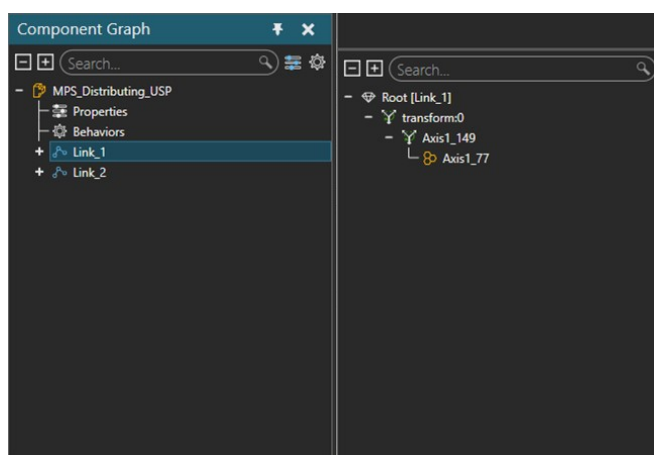
Figura 24 – Extraíndo geometrias em um novo link



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após essa ação, os “links” passam a ser sub-nós do componente e as geometrias selecionadas, passam a ser “Features” do Link criado, onde podem ser vistos na barra lateral esquerda do software (*Component Graph*)(Figura 25).

Figura 25 – Estrutura do componente (Links e Features)

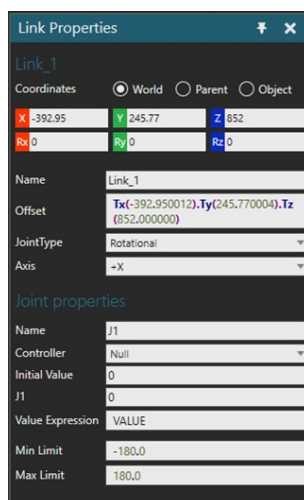


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1.3 Etapa 3 – definição da cinemática

Os movimentos de um componente podem ser translacionais ou rotacionais (Propriedade “*JointType*”). Outras opções como qual o eixo ele toma como referência para o movimento (Propriedade “*Axis*”) e o ponto que serve de pivô para o movimento (Propriedade “*Offset*”) estão disponíveis na barra lateral direita (Figura 26).

Figura 26 – Propriedades do Link



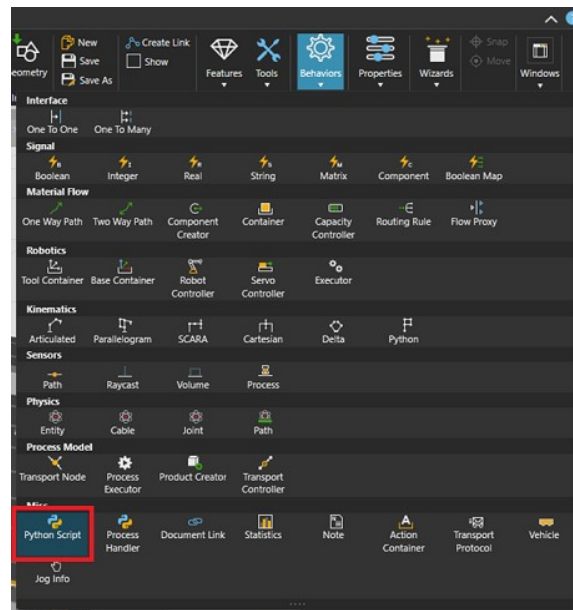
Fonte: Elaborado pelo autor.

As “*Joint Properties*” são exibidas após definir o tipo de movimentação que o link irá executar. Para que o Link consiga realizar algum movimento, o componente necessita ter em seu “*Behavior*” um “*Servo Controller*”. O movimento do link pode ser verificado através do botão Interact, que se encontra na barra de ferramentas da aba “*MODELING*”, em seguida, clicando e arrastando a parte da geometria que irá realizar o movimento.

5.1.4 Etapa 4 – funções cinemáticas

Foi necessária a programação do código responsável pela movimentação das partes do componente. Esse código é programado em um “*Python Script*” que pode ser inserido através do botão “*Behavior*”, “*Python Script*”, da barra de ferramentas da aba *HOME* (Figura 27).

Figura 27 – Inserção do Behavior “Python Script”



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi criado um *Python Script* no *Behaviors* do componente e programado as funções de movimentação na janela de código que se abre ao clicar nele. Foram criadas funções para cada movimento que a estação realiza, para então chamar tais funções quando necessário.

Na figura 28 é possível verificar uma parte do código de uma das estações.

Figura 28 – Exemplo de código inserido em um Python Script

```

MPS Handling:PythonScript
84
85 def GarraDesce():
86     global esquerda, direita, desce, sobe
87     if esquerda == True:
88         servo_valDGarra = 82
89     elif direita == True:
90         servo_valDGarra = 167
91     servo.setJointTarget(1, servo_valDGarra)
92     servo.move()
93     sobe = False
94     desce = True
95
96 def CatchPiece():
97     AbreGarra()
98     FechaGarra()
99     PegaPeca()
100
101 def DropPiece():
102     FechaGarra()
103     AbreGarra()
104     SoltaPeca()
105
106 def OnSignal( signal ):
107     global kiwi, piece
108     val = signal.Value
109     kiwi.append( val )
110     if signal.Name == 'InSignalEsteira':
111         piece = True
112     elif signal.Name == 'InSignalProcessing':
113         piece = True
114         print piece
115
116 def OnRun():
117     global kiwi, part, esquerda, direita, sobe, desce, piece
118     kiwi = []
119
120     while sim.IsRunning == True:
121         delay(0.1)
122         triggerCondition(lambda:kiwi)
123         if HandLeft.Value==True:
124             GarraEsquerda()
125         elif HandRight.Value==True:
126             GarraDireita()
127         elif HandDown.Value==True:
128             GarraDesce()
129         elif HandUp.Value==True:
130             GarraSobe()
131         elif HandCatch.Value==True:
132             if direita == True:
133                 part = SensorSignalEsteira.Value
134                 print part
135             elif esquerda == True:
136                 part = SensorSignalProcess.Value
137                 print part
138             CatchPiece()
139         elif HandDrop.Value==True:
140             DropPiece()

```

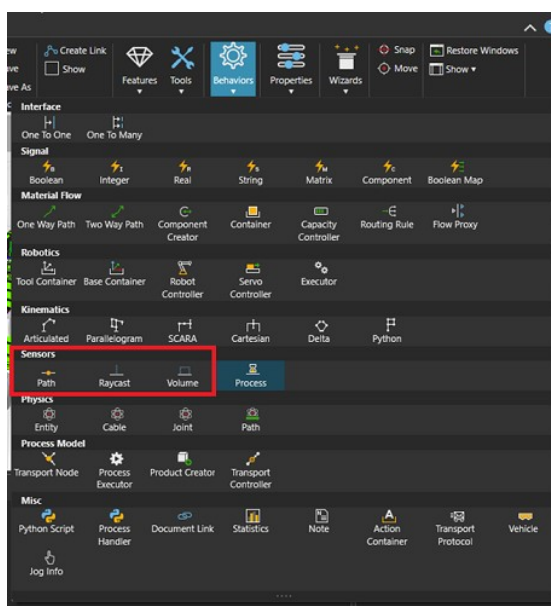
Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao executar a simulação do layout, o software sempre irá rodar primeiramente a função “OnRun ():” e a partir dela chamar outras funções.

5.1.5 Etapa 5 – sensores da estação

Na virtualização da estação de manufatura, foi necessário também modelar os sensores existentes. Os sensores foram inseridos em “links” do componente para facilitar a organização. Os sensores são considerados como “*Behavior*” no software. Foram utilizados sensores do tipo “*Raycast*”, “*Volume*” e “*Path*” (Figura 29). Após a inserção dos sensores, foi necessário configurá-los, para que os mesmos funcionem apropriadamente.

Figura 29 – Criação de sensores



Fonte: Elaborado pelo autor.

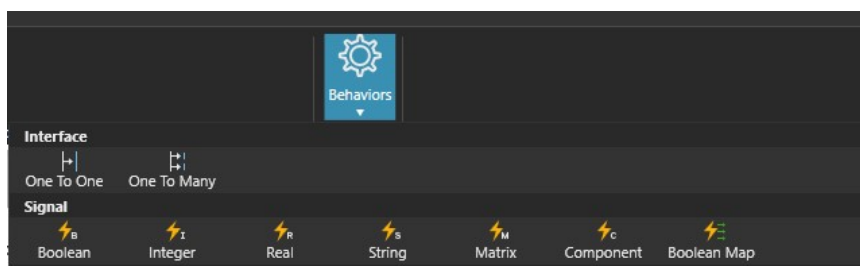
É possível utilizar também a ferramenta Wizards para criação de sensores, que se encontra na barra de ferramentas da aba *MODELING*, contudo neste trabalho optou-se pela criação manual dos sensores, tendo em vista as especificidades que cada estação de manufatura possui.

5.1.6 Etapa 6 – criação dos sinais da estação

Ao acionar um sensor, é acionado também um sinal a este atrelado. Foi necessário criar os sinais que foram usados nos sensores da estação de manufatura. Os sinais utilizados no presente trabalho foram do tipo “*Boolean*” que são sinais booleanos, representando o estado de ligado e desligado; e os do tipo “*Component*”,

que são sinais que podem armazenar o nome do que o sensor está detectando (Figura 30). Os sinais são criados ao clicar no tipo de sinal, que estão no botão *Behaviors* da barra de ferramentas da aba *MODELING*.

Figura 30 – Tipos de Sinais presentes no Visual Components

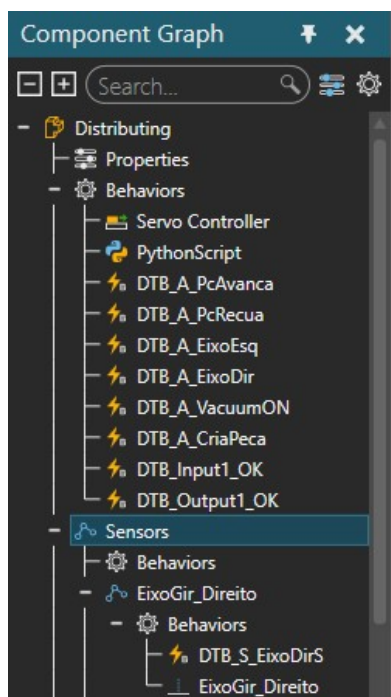


Fonte: Elaborado pelo autor.

A utilização deste último tipo de sinal se fez necessária, pois na estação de manufatura virtual, quando a peça de trabalho passa de uma parte para outra ou de um componente para outro, o software precisa ter uma identificação do que está sendo passado (neste caso a peça de trabalho ou produto).

Foram criados também sinais, do tipo “*Boolean*”, para servir de gatilho para acionar as funções de cinemática da estação de manufatura. Esses sinais foram criados no *Behaviors* do componente (Figura 31).

Figura 31 – Sinais de um Componente

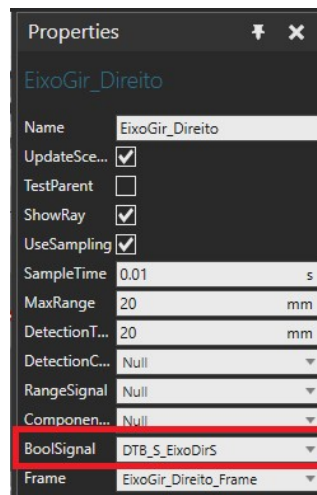


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1.7 Etapa 7 – vinculação dos sinais

Ao criar os sinais necessários é preciso efetuar a vinculação destes no software. Para os sinais vinculados aos sensores – é necessária a vinculação desse sinal nas propriedades do sensor (Figura 32).

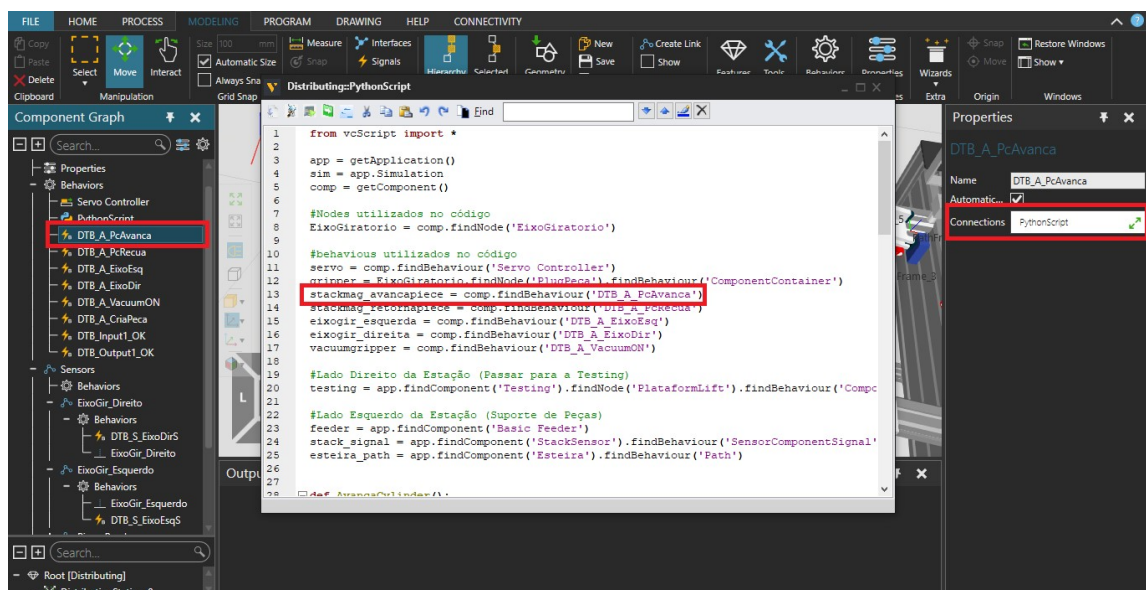
Figura 32 – Vinculação do Sinal ao sensor



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os sinais vinculados a funções de cinemática – é necessária a vinculação desse sinal ao *Python Script*, além de declarar esse sinal no código e associá-lo a uma variável (Figura 33).

Figura 33 – Vinculação do Sinal ao Python Script



Fonte: Elaborado pelo autor.

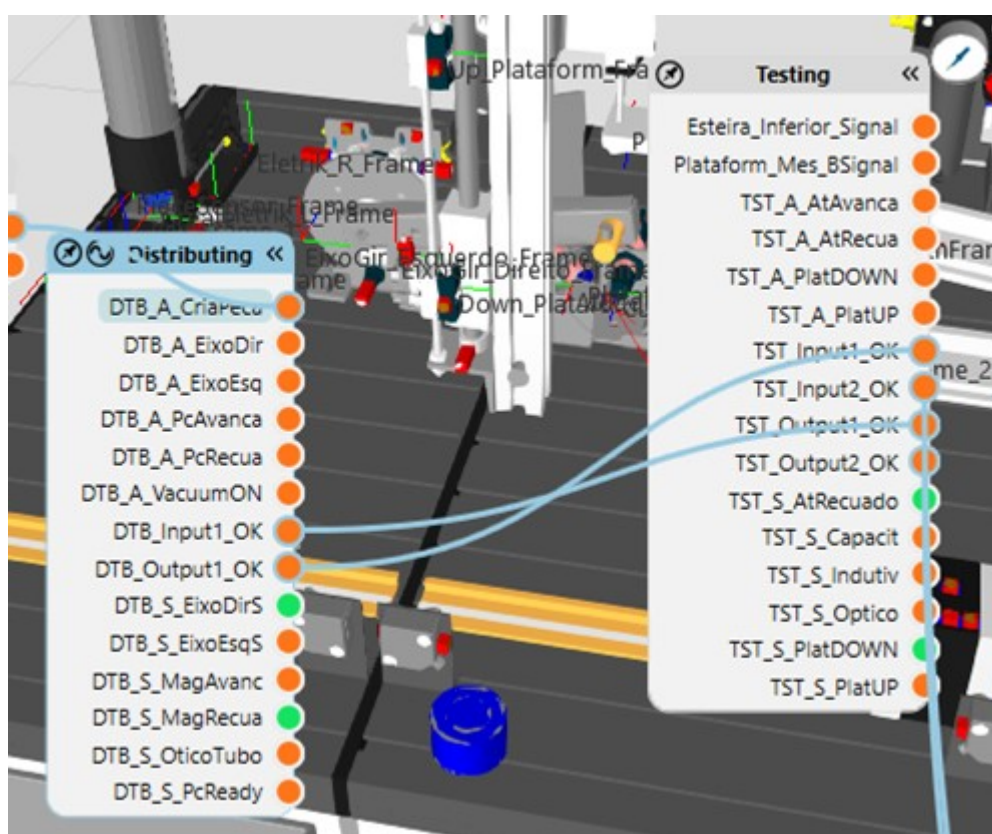
5.2 INTEGRAÇÃO DO SISTEMA

Após a modelagem das estações de manufatura virtuais, foi aplicada a metodologia de integração proposta (Figura 09) a fim de compor o Sistema de Manufatura Flexível.

5.2.1 Etapa 1 e 2 - criação e conexão de sinais input/output

Foi inserido em cada estação um par de sinais do tipo “*Boolean*”, chamados de *INPUT* e *OUTPUT*, para comunicação de uma estação para outra. Em algumas estações foi necessária a criação de um par de sinais adicional, para realizar a comunicação com a esteira circular. O sinal *Input* de uma estação é ligado no sinal *Output* da estação ou componente vizinho (Figura 36).

Figura 36 – Ligação dos Sinais Input e Output das estações de manufatura



Fonte: Elaborado pelo autor.

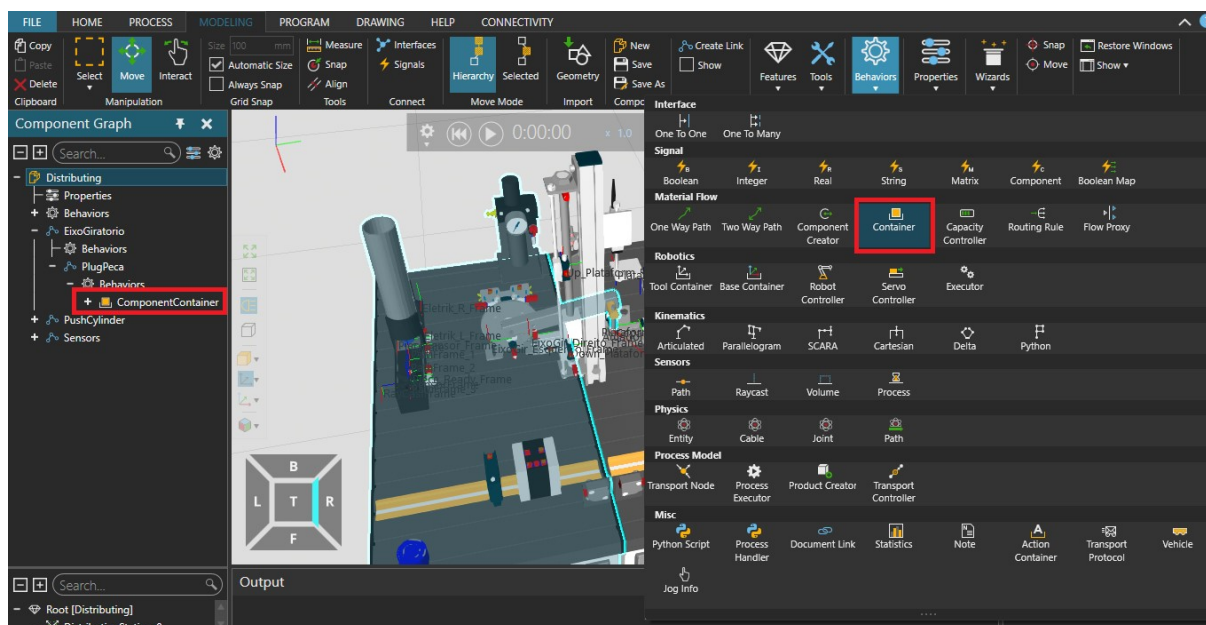
5.2.2 Etapa 3 – integração em pares de estações

Foi realizada a integração das estações em pares. Os pares de estações que foram integrados (Figura 10) seguiram a configuração da planta fabril didática utilizada como modelo, a saber:

- *Distributing e Testing*;
- *Processing e Handling*;
- *Sorting e Handling*.

Para a peça de trabalho ir de uma parte para outra da estação ou de uma estação para outra, foi necessária a inserção de um “*Behaviors*” chamado de “*Container*”. Um “*container*” pode armazenar outro componente do *Visual Components* (Figura 37). Foi utilizado esse “*behavior*” para armazenar a peça de trabalho. Passar de uma estação para outra, no *Visual Components* equivale passar um componente (peça de trabalho) de um “*container*” para outro. Portanto quando um “*Link*” executa alguma cinemática, se esse “*link*” possuir um “*container*” e nele houver um componente, esse componente se movimenta junto com o “*link*”.

Figura 37 – Inserção do Behaviors “Container”



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para que a transição de uma estação para outra da peça de trabalho ocorresse, foi necessário utilizar sensores do tipo “*Raycast*” e sinais do tipo “*Component*”. Esses sensores só existem na estação de manufatura virtual e para fins de visualização eles foram configurados para ficarem invisíveis na simulação. No

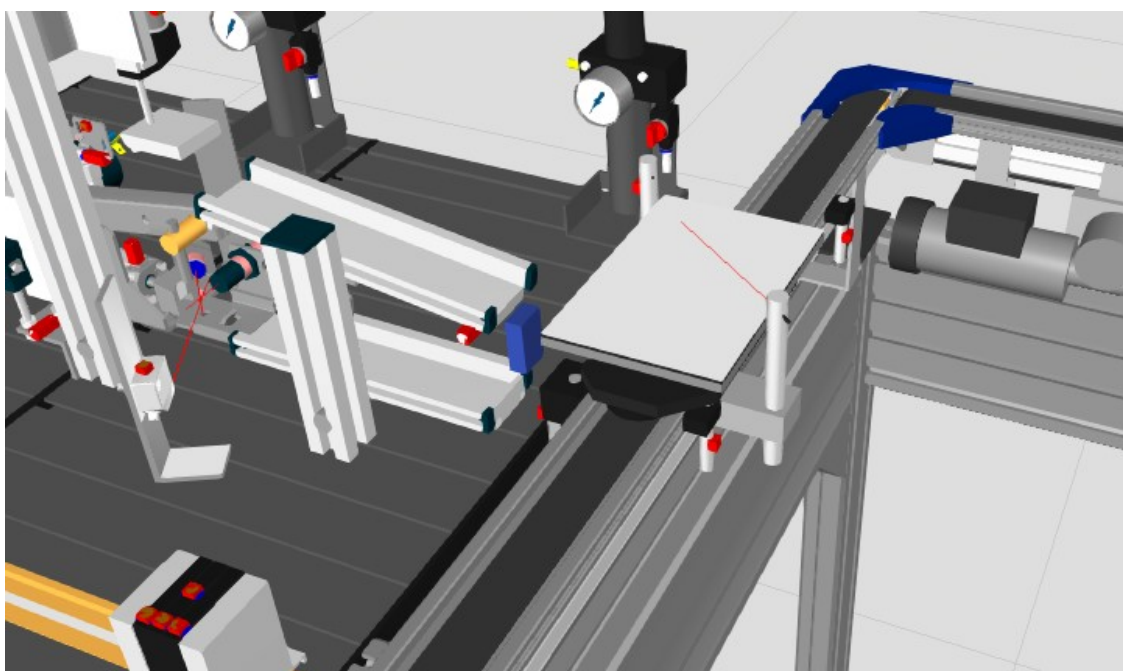
momento que a peça de trabalho chega ao final da estação, o sensor virtual é acionado e o nome da peça de trabalho é armazenado no sinal “*Component*”. Esse nome então é utilizado no código do *Python Script* para “capturar” a peça e transferir de um “*container*” para outro (próxima estação).

5.2.3 Etapa 4 – integração da esteira circular

A modelagem da esteira circular não seguiu exatamente os passos de modelagem das estações de manufatura citados anteriormente, tendo em vista que a esteira circular difere bastante das estações.

Na modelagem da esteira circular, foi necessário inserir pontos de parada para o carrinho de transporte das peças de trabalho (Figura 38), sendo pontos de entrada e saída das peças nas estações de manufatura. Esse carrinho de transporte é criado no início do fluxo de processo das peças de trabalho.

Figura 38 – Carrinho de transporte posicionado em um ponto de parada



Fonte: Elaborado pelo autor.

A esteira circular é considerado um componente na simulação e o carrinho de transporte é um componente transitando pela esteira, portanto um componente em outro componente. Para isso foi utilizado no sensor em cada ponto de parada um sinal do tipo “*Component*”, para que fosse possível identificar o carrinho de transporte e fazer com que ele transite por toda esteira. Além disso, foi inserido um “*Container*” na modelagem do carrinho de transporte, para “capturar” as peças de

trabalho para o carrinho de transporte e assim possibilitar que as peças de trabalho se movimentem juntamente com o carrinho de transporte. Resumindo, a esteira virtual contém o carrinho de transporte, que por sua vez contém a peça de trabalho.

5.3 TESTES COM CLP VIRTUAL

O *Visual Components* permite comunicação com Controladores Lógicos Programáveis, sendo que a integração da simulação com CLPs é possível em todas as suas versões, através de conexão OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture), e a conectividade de CLPs Siemens S7 só é possível na versão Premium. Os testes iniciais de conectividade com CLP foram feitos com essa conexão, utilizando o Simatic Step 7 e o NettoPLCSim. Após tais testes iniciais foi utilizado o software CodeSYS, com conexão via OPC UA. O Visual Components permite efetuar a comunicação de duas formas, ou sentidos: *Server to Simulation* e *Simulation to Server*.

Para realizar a conexão via Siemens S7 foram necessários algumas configurações, tanto no Step 7 e NettoPLCSim quanto no Visual Components, elencadas abaixo:

No Simatic Step 7:

- Após criar o programa na linguagem escolhida, no *Simatic Manager* é necessário ligar o simulador (PLCSIM) e descarregar o programa no CLP virtual;
- no PLCSIM é necessário configurar a Interface PG/PC em TCP/IP, na barra de ferramentas “Standard” e ligar o CLP virtual (colocar o CLP em RUN);
- no *Symbol Editor*, deve-se exportar a tabela de símbolos do CLP para uma planilha no formato “.xlsx”

No NettoPLCSim:

- É necessário interromper o uso da porta 102 do computador, caso não esteja disponível, para que a comunicação do CLP possa utilizar essa porta. Essa verificação é feita ao inicializar o software;
- deve-se adicionar uma nova estação que servirá de server do CLP Virtual, onde é inserido o IP (*Internet Protocol*) da máquina que está

rodando o software e o IP do PLCSim, sendo exibido pelo NettoPLCSim os IP's disponíveis para cada campo;

- estando tudo configurado, clicar em *Start Server*.

No *Visual Components*:

- Inicialmente é necessário habilitar a aba “*Connectivity*”;
- Nesta aba, adicionar um novo servidor Siemens S7, configurando os campos necessários, após configuração pode-se clicar no botão “*Test Connection*” e caso haja comunicação, será exibido mensagem de que a conexão funciona;
- Após configurar o server, é necessário importar os símbolos do CLP. Para isso é utilizada a planilha gerada Simatic Step 7. Tal planilha deve ter um padrão específico nos campos para que o *Visual Components* possa compreender e realizar a importação;
- deve-se adicionar as variáveis de comunicação, que podem ser da simulação para o servidor e do servidor para a simulação. Tais variáveis são criadas selecionando variáveis do CLP e da simulação e criando pares.

Com a conexão via Siemens S7 foi utilizado somente a comunicação *Server to Simulation*, onde os sinais de entrada eram acionados no simulador do CLP e as os sinais de saída foram pareadas aos sinais vinculados às funções de cinemática.

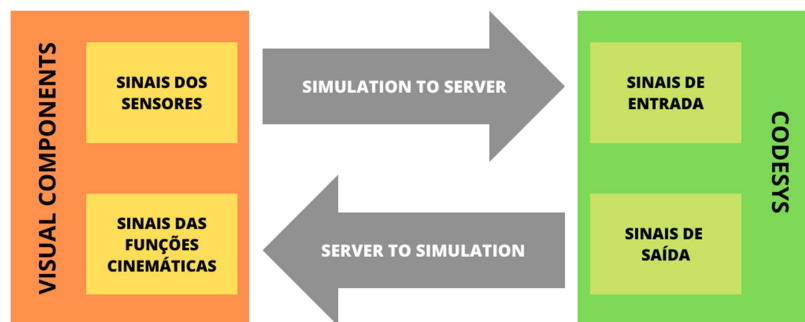
Para a conexão via CodeSYS e comunicação OPC UA, o procedimento de configuração é mais simples, pois:

- Não há a necessidade de um terceiro software, pois o próprio CodeSYS tem um server que é instalado junto com o software;
- ao utilizar a comunicação OPC UA, não há a necessidade de importar uma tabela de símbolos do CLP. Ao efetuar a conexão com o server, a tabela de símbolos já é acessada diretamente do CLP, facilitando o pareamento dos sinais.

Para esse tipo de conexão, foi utilizada tanto a comunicação “*Server to Simulation*” quanto “*Simulation to Server*” (Figura 39), onde:

- Na comunicação “*Simulation to Server*” foram pareados os sinais oriundos dos sensores das estações de manufatura com sinais de entrada do CLP e;
- Na comunicação “*Server to Simulation*” foram pareados os sinais vinculados às funções de cinemática da Simulação com os sinais de saída do CLP.

Figura 39 – Pareamento de Sinais entre Visual Components e CodeSYS

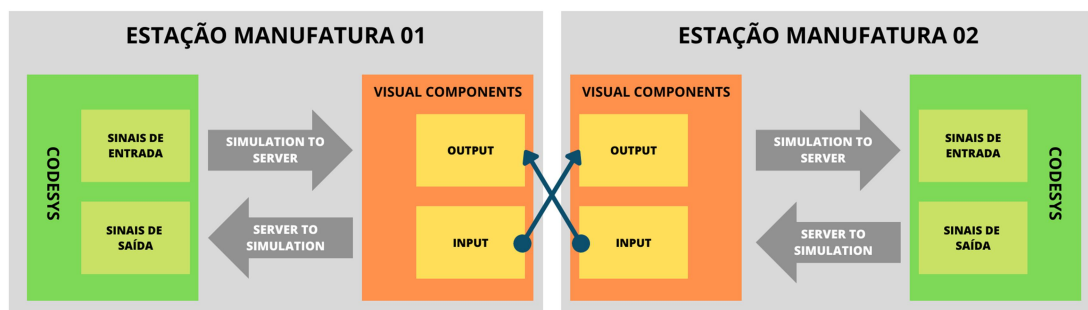


Fonte: Elaborado pelo autor.

Há também os sinais de *Input* e *Output* de cada estação de manufatura (Figura 40), sendo que:

- O sinal de *Input* é pareado como uma comunicação “*Server to Simulation*”, pois a partir da lógica do CLP que esse sinal é acionado;
- O sinal de *Output* é pareado como uma comunicação “*Simulation to Server*”, pois a partir de um sinal recebido na simulação é que o CLP pode fazer uso na sua lógica.

Figura 40 – Sinais Input e Output entre as estações de manufatura



Fonte: Elaborado pelo autor.

O sinal de *Input* de uma estação de manufatura é o sinal de *Output* da estação vizinha. Essa ligação é realizada na própria simulação, conforme pode ser verificado através da Figura 38.

6 RESULTADOS

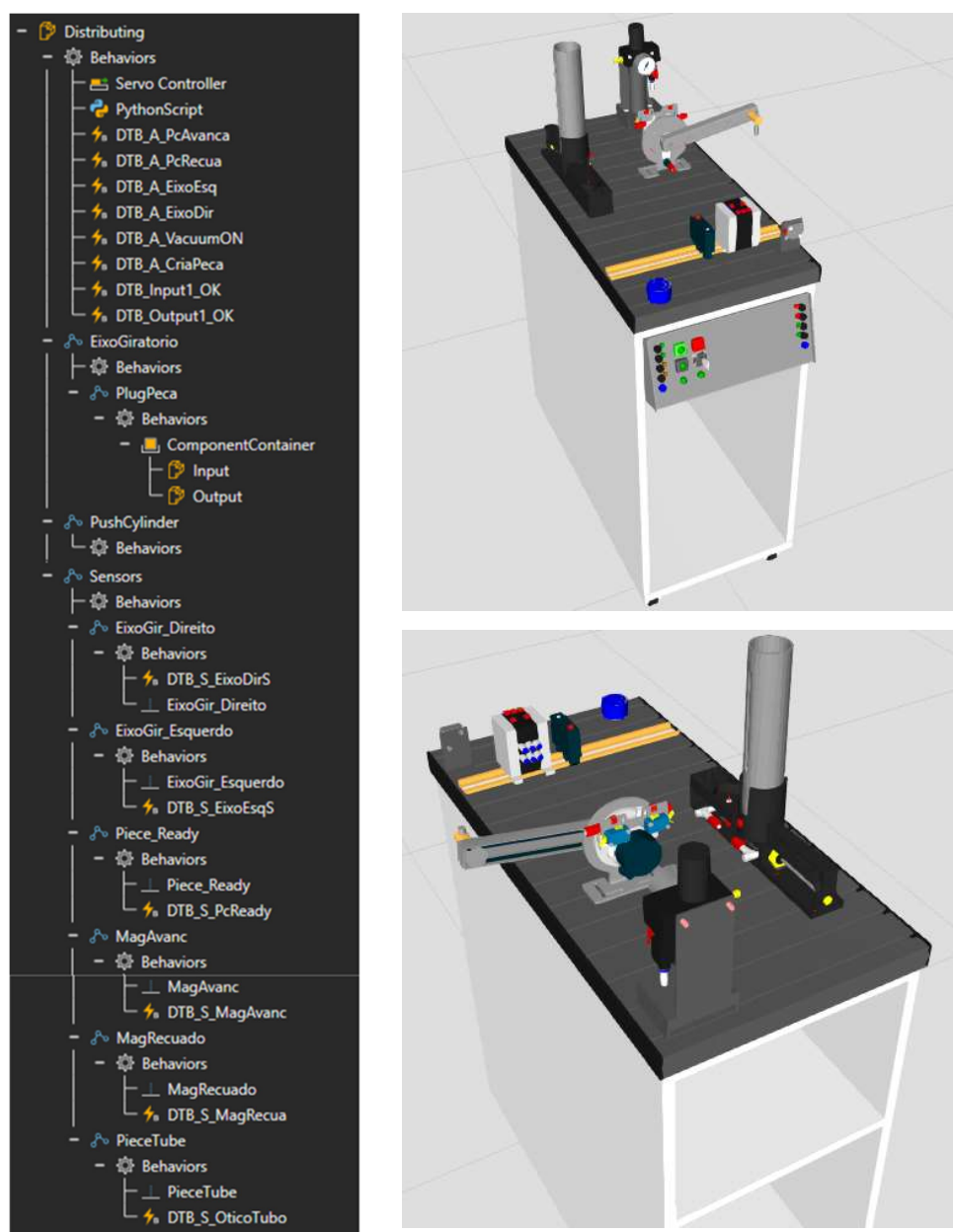
Ao aplicar a metodologia proposta no presente trabalho para realizar a modelagem das estações de manufatura e sua posterior integração, foram realizados alguns testes para validar o funcionamento do modelo virtual. A seguir são apresentados os resultados obtidos com a modelagem das estações de manufatura e suas respectivas considerações, os resultados do teste do modelo virtual como ferramenta para comissionamento virtual (*Digital Model*) e os resultados do teste do modelo virtual como ferramenta para Sombra Digital (*Digital Shadow*).

6.1 MODELAGEM DAS ESTAÇÕES

Ao realizar a modelagem das estações de trabalho de forma individual, foram utilizados componentes da biblioteca do Visual Components, para criação e encaminhamento das peças de trabalho de uma estação para outra, estabelecendo assim, a transferência das peças de trabalho de uma estação para outra. Tais componentes não ficaram visíveis na simulação, pois não fazem parte das estações de trabalho e foram utilizados de forma a possibilitar a visualização e funcionamento de forma mais realista. As estações de trabalho que foram modeladas individualmente e respectivas considerações são:

Distributing – essa estação é o início da linha de produção e foi inserido um componente da biblioteca do *Visual Components* que cria as peças de trabalho. Tal componente pode criar peças pretas, vermelhas ou prateadas, de acordo com a configuração estabelecida no mesmo. Para que a peça de trabalho fosse transportada para as outras partes da estação foi necessária a inserção de um sinal do tipo “*Component*” e um sensor associado a esse sinal (sensor da biblioteca do software também), para identificar a peça de trabalho. Tais componentes foram deixados invisíveis na visualização. Na Figura 41 podemos ver a estrutura da estação de trabalho com todos os elementos que foram criados para que a estação seja operacional. É possível ver também algumas perspectivas da mesma.

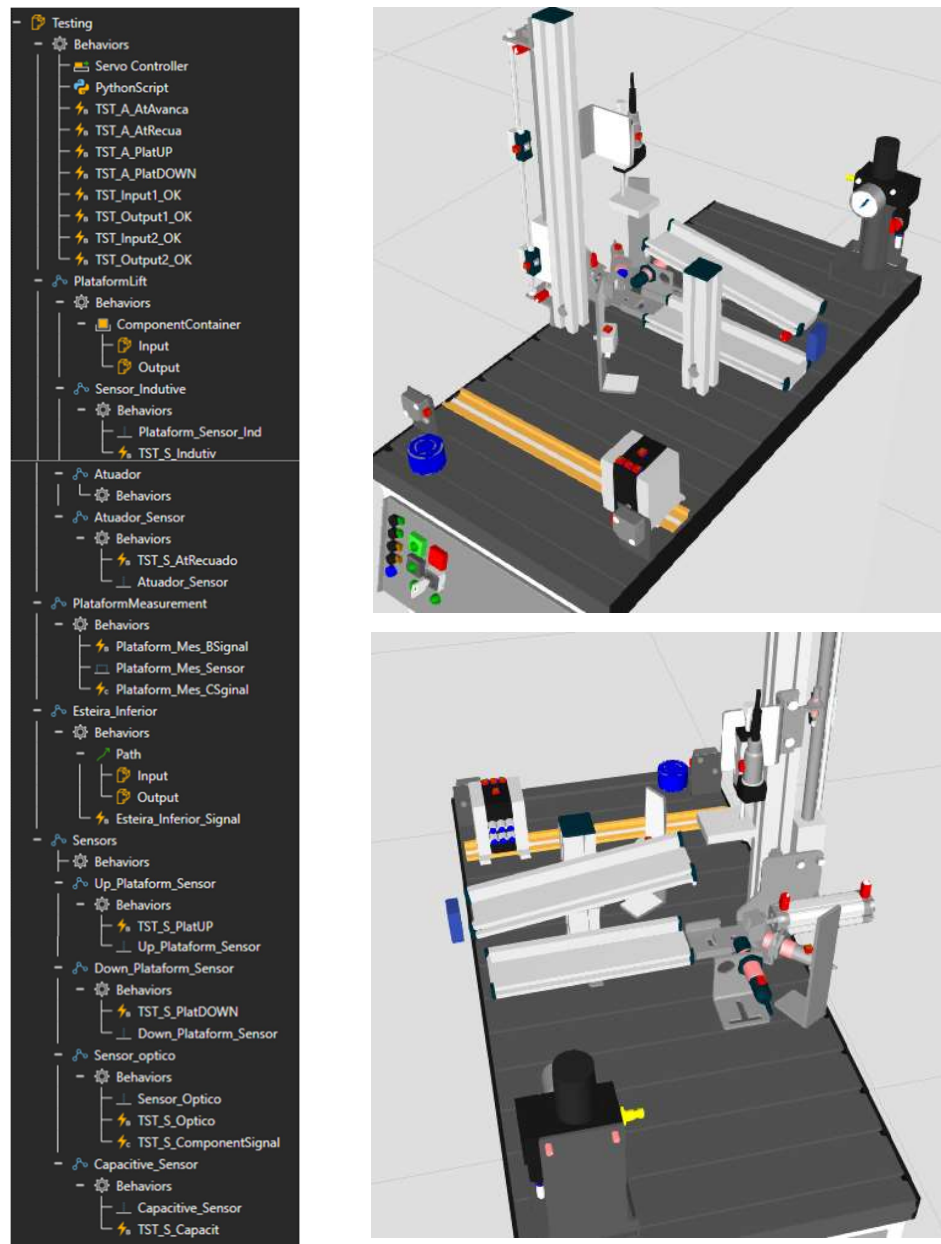
Figura 41 – Estrutura e visualização da Estação Distributing



Fonte: Elaborado pelo autor.

Testing – Nesta estação foram modelados os dois trajetos que a peça de trabalho pode seguir, tanto na canaleta inferior (peças rejeitadas) como na canaleta superior (peças aprovadas). Para efeito de demonstração da simulação foram criadas somente peças aprovadas, contudo a modelagem já contempla também a cinemática com peças rejeitadas. Na Figura 42 podemos ver a estrutura da estação de trabalho com todos os elementos que foram criados para que a estação seja operacional. É possível ver também algumas perspectivas da mesma.

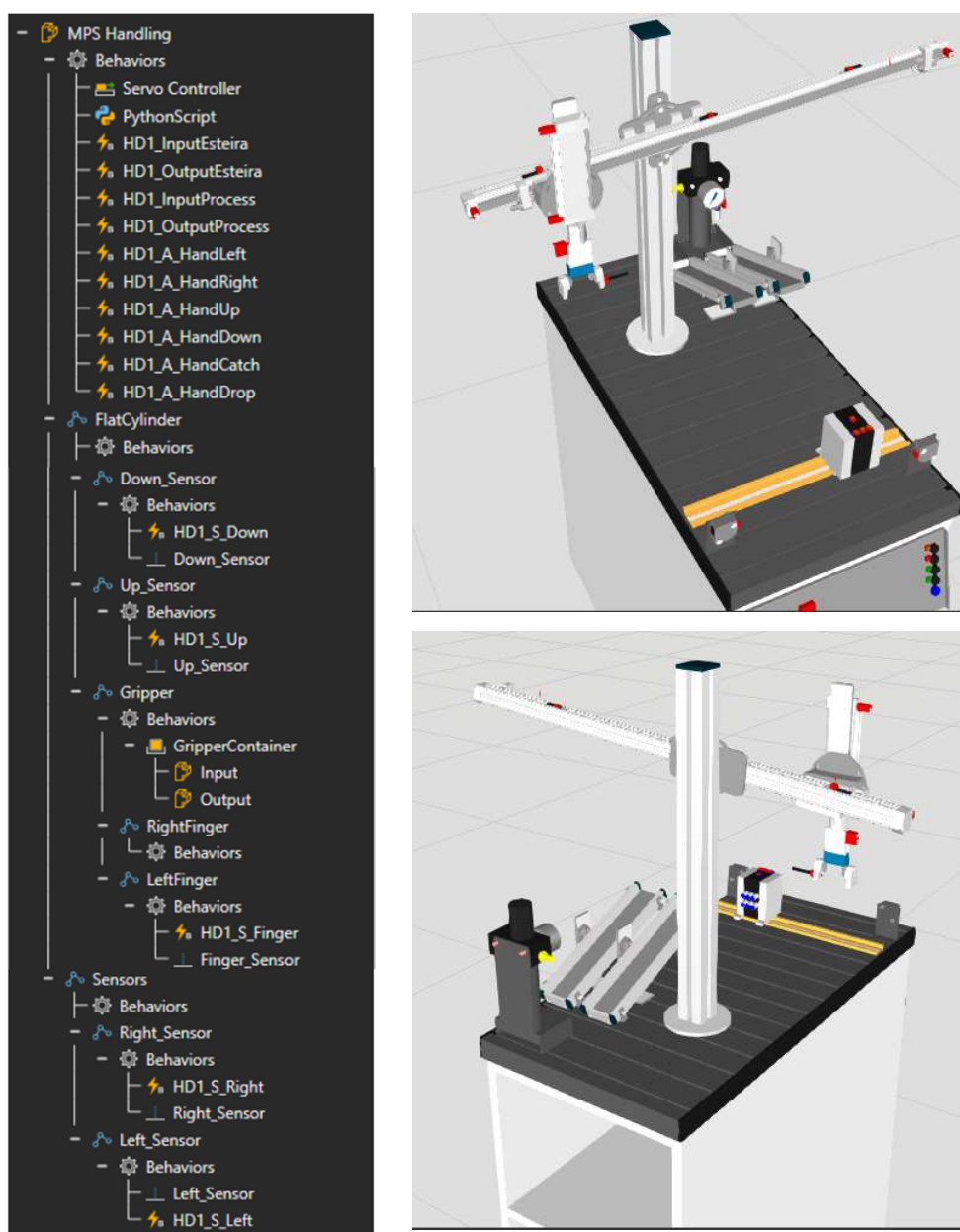
Figura 42 – Estrutura e visualização da Estação Testing



Fonte: Elaborado pelo autor.

Handling – O sistema de manufatura flexível possui duas estações desse tipo, onde a modelagem é análoga, mas não idêntica, tendo em vista o posicionamento do braço que captura as peças, onde foi necessário efetuar ajustes de posicionamento para cada uma das estações. Na Figura 43 podemos ver a estrutura da estação de trabalho com todos os elementos que foram criados para que a estação seja operacional. É possível ver também algumas perspectivas da mesma.

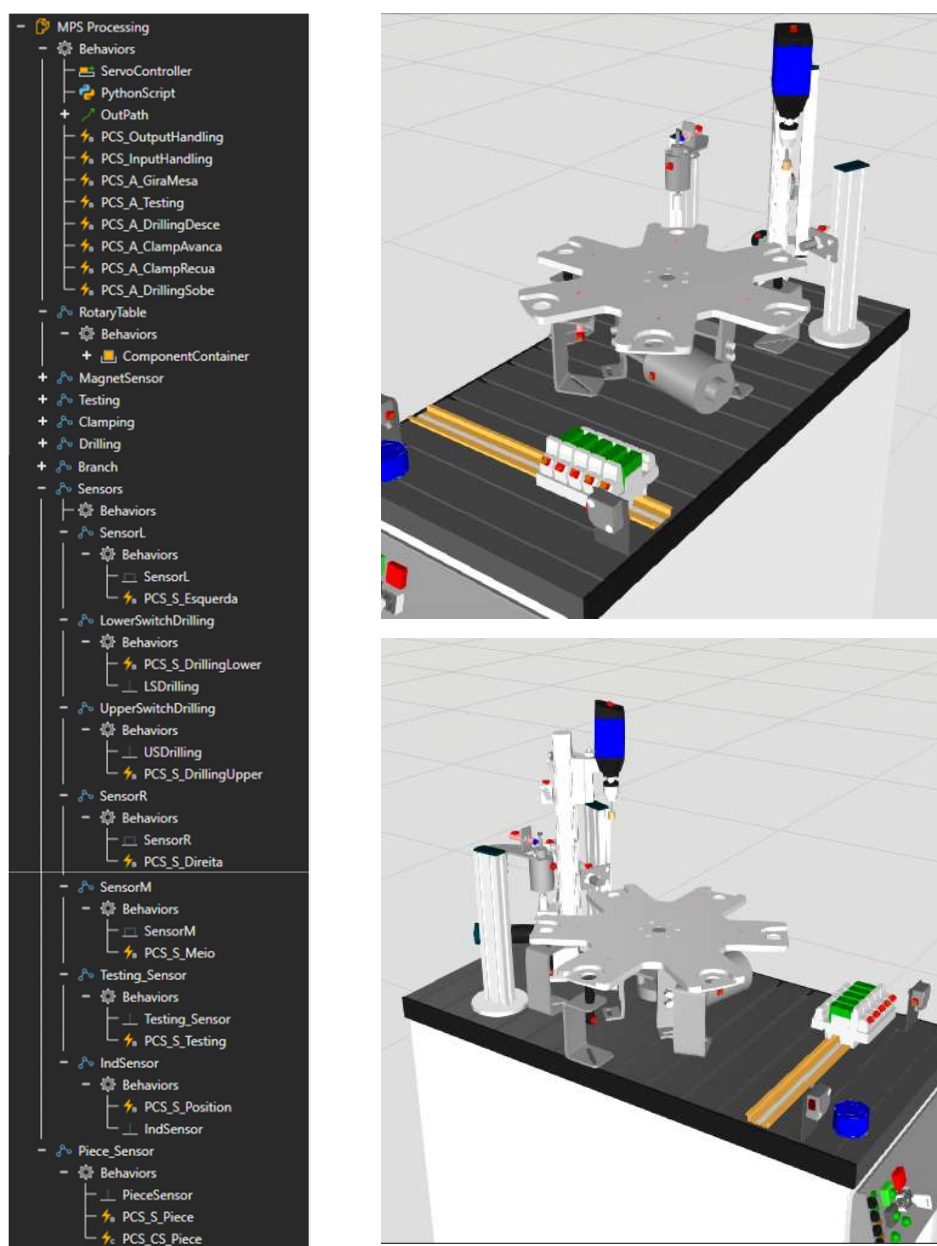
Figura 43 – Estrutura e visualização da Estação Handling



Fonte: Elaborado pelo autor.

Processing – Nessa estação foram necessários a modelagem de vários elementos, pois a estação executa vários tipos de movimentos. Foi necessária também a modelagem de um elemento específico, uma mesa giratória, onde a programação da cinemática faz com que a movimentação ocorra em partes, sendo que em cada parte a estação executa uma ação. Na Figura 44 podemos ver a estrutura da estação de trabalho com todos os elementos que foram criados para que a estação seja operacional. É possível ver também algumas perspectivas da mesma.

Figura 44 – Estrutura e visualização da Estação Processing

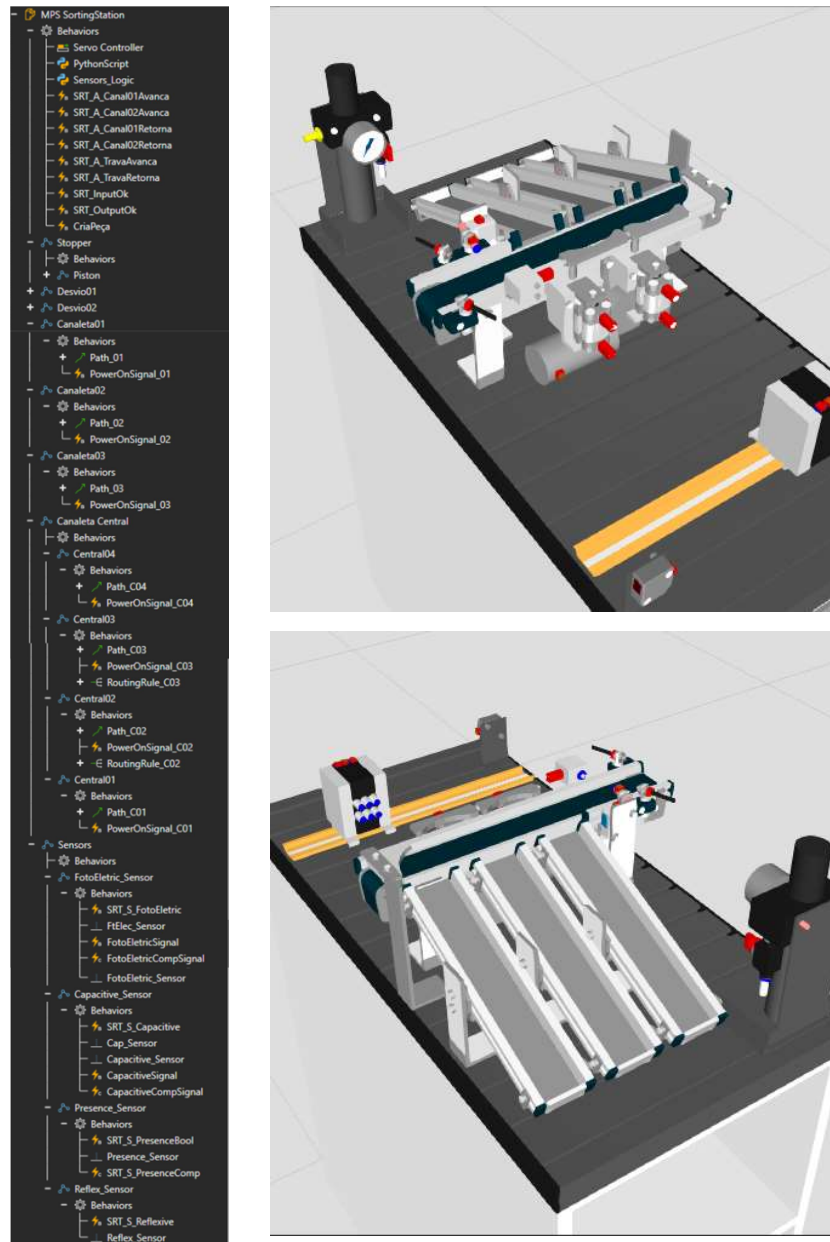


Fonte: Elaborado pelo autor.

Sorting – Essa estação de trabalho foi modelada com as três canaletas por onde as peças de cores diferentes podem passar. A programação das cores e em qual canaleta a peça deve ser direcionada é definida pela programação do CLP, que é externo ao modelo virtual, possibilitando diversas programações. Essa estação de trabalho é o final da linha de produção. A identificação das cores se deu através da identificação da propriedade “Material” da peça de trabalho, e foi criado outro Script Python com a lógica de funcionamento dos sensores. O script habilita ou desabilita os sensores de acordo com a cor (propriedade “material”) da peça de trabalho. Na

Figura 45 podemos ver a estrutura da estação de trabalho com todos os elementos que foram criados para que a estação seja operacional. É possível ver também algumas perspectivas da mesma.

Figura 45 – Estrutura e visualização da Estação Sorting



Fonte: Elaborado pelo autor.

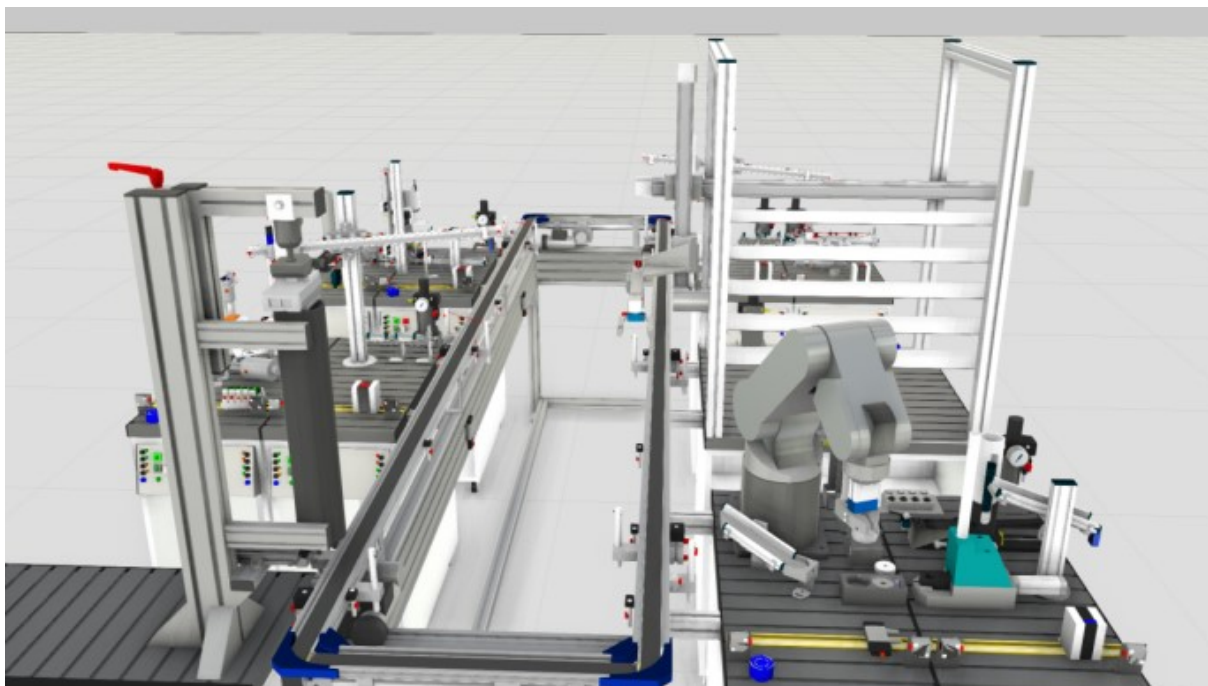
Ao integrar os pares de estações de trabalho com a esteira circular, foi necessária a inserção de mais um par de sinais *Input / Output* nas estações que estão junto a esteira, sendo que essas estações ficaram com dois pares de sinais

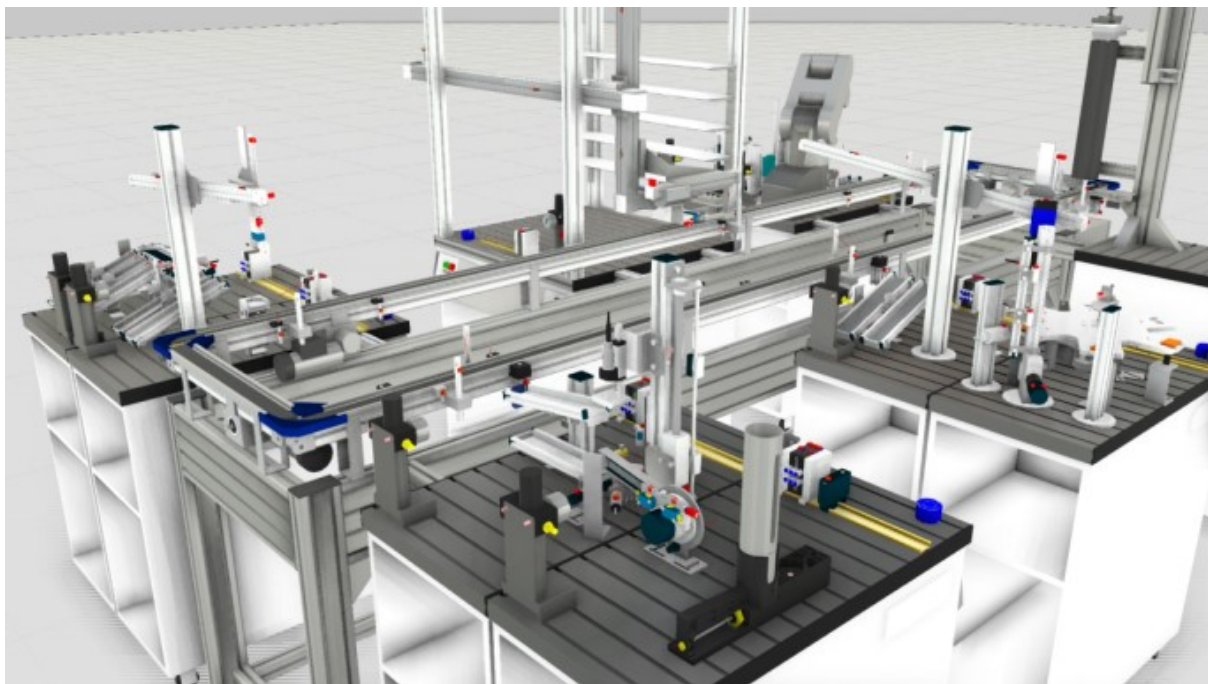
Input / Output, um para comunicação com a estação de trabalho de um lado, e outro par de sinais para comunicação com a esteira circular.

Considerando a quantidade de sinais presentes no Sistema de Manufatura todo, foi necessário adotar uma padronização para nomenclatura dos mesmos que consistia de: {Nome da estação (3 letras)}_{Se o sinal é de um atuador ou sensor (A ou S)}_{Nome do sinal (8 letras)}.

Após a modelagem de cada estação de trabalho de forma individualizada, a integração das estações em pares e sua posterior integração com a esteira circular, o sistema de manufatura flexível resultou em um único arquivo do *Visual Components* contendo todos os componentes (Figura 46).

Figura 46 – Sistema de Manufatura Flexível Virtualizado





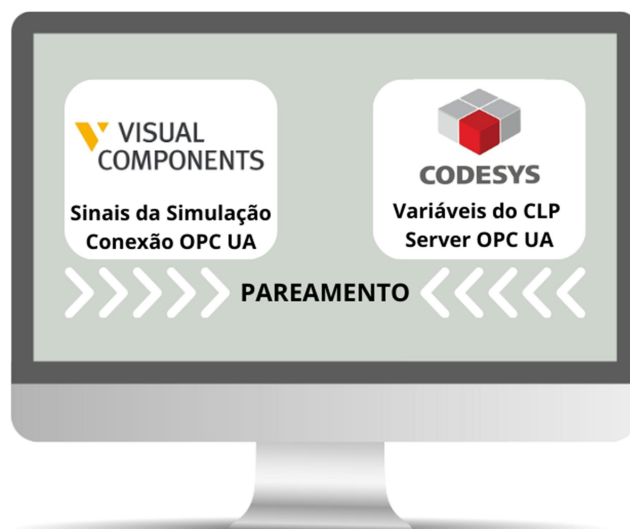
Fonte: Elaborado pelo autor.

6.2 TESTES – DIGITAL MODEL

O modelo virtual foi modelado sem nenhum tipo de lógica incorporada. Toda a programação desenvolvida diz respeito à movimentação dos elementos das estações de trabalho. Portanto para que uma simulação ocorra é necessária a execução de um programa de CLP. O modelo foi concebido dessa forma para que o mesmo pudesse interagir qualquer tipo de lógica de programação do sistema de manufatura. Apesar de ter sido executado testes de funcionamento para cada estação de trabalho, para validar o desenvolvimento do trabalho proposto como um todo foi necessário então desenvolver um programa de CLP para cada estação de manufatura. Tais programas foram desenvolvidos utilizando o software CodeSYS, com um servidor que possui comunicação OPC UA e o pareamento das variáveis no *Visual Components*.

A fim de validar o funcionamento da simulação, foram executados alguns testes. O primeiro teste foi executar a simulação no *Visual Components* com a lógica da programação das estações em um CLP virtual no CodeSYS. Nesse teste ambos os softwares (*Visual Components* e CodeSYS) estavam no mesmo computador (Figura 47).

Figura 47 – Diagrama de conexão dos sinais da simulação e as variáveis do CLP para o Teste 01



Fonte: Elaborado pelo autor.

O resultado da simulação pode ser verificado no vídeo¹ endereçado pela Figura 48.

Figura 48 – QR Code para o vídeo do teste 01 da simulação do Sistema FMS



Fonte: Elaborado pelo autor.

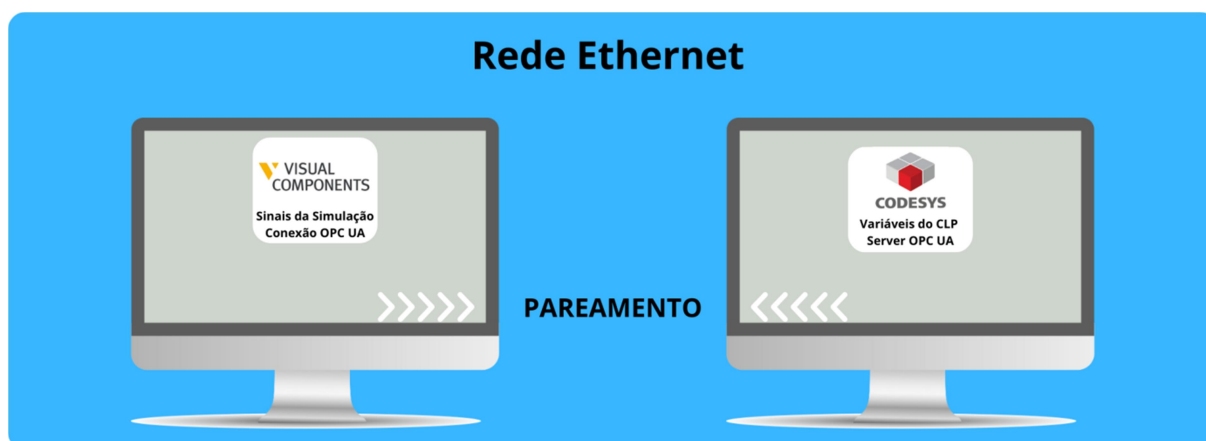
Em alguns momentos o computador utilizado para o desenvolvimento do trabalho deu indícios de não ser suficiente para executar a simulação, rodar o servidor do CLP CodeSYS e gravar a tela do computador, todos os softwares em conjunto, pois a simulação é visualizada com a aparência de possuir menos quadros por segundo. Para atenuar essa dificuldade, todos os softwares não necessários foram encerrados, para liberar o processamento do computador somente para executar a simulação e rodar o programa de CLP, mas como pode-se notar no vídeo (Figura 48), a dificuldade não foi totalmente superada, tendo em vista que os softwares mínimos necessários para o teste (Visual Components, CodeSYS e

¹ Disponível em: https://youtu.be/YBdu_XLFULL

software para gravação da tela do computador) já exerceram grande influência no desempenho do computador. Contudo, é possível verificar o funcionamento das estações e da esteira circular em conjunto.

Um segundo teste realizado foi executar a simulação no Visual Components e rodar a lógica de programação no CodeSYS em computadores diferentes, um com cada software. As máquinas estavam em uma mesma rede Ethernet cabeada (Figura 49).

Figura 49 – Diagrama de conexão dos sinais da simulação e as variáveis do CLP para o Teste 02



Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando que a programação no CodeSYS é a mesma, com as mesmas variáveis, não foi necessário efetuar os pareamento das mesmas novamente. A única alteração foi o endereçamento IP do servidor OPC UA.

O resultado da simulação pode ser verificado no vídeo² endereçado pela Figura 50.

Figura 50 – QR Code para o vídeo do teste 02 da simulação do Sistema FMS



Fonte: Elaborado pelo autor.

² Disponível em: <https://youtu.be/kOF3lDo4j2c>

A partir deste teste foi possível comprovar que dividindo o processamento da simulação em um computador e a lógica de programação do CLP em outro, a simulação foi executada com maior fluidez.

6.3 TESTE – DIGITAL SHADOW

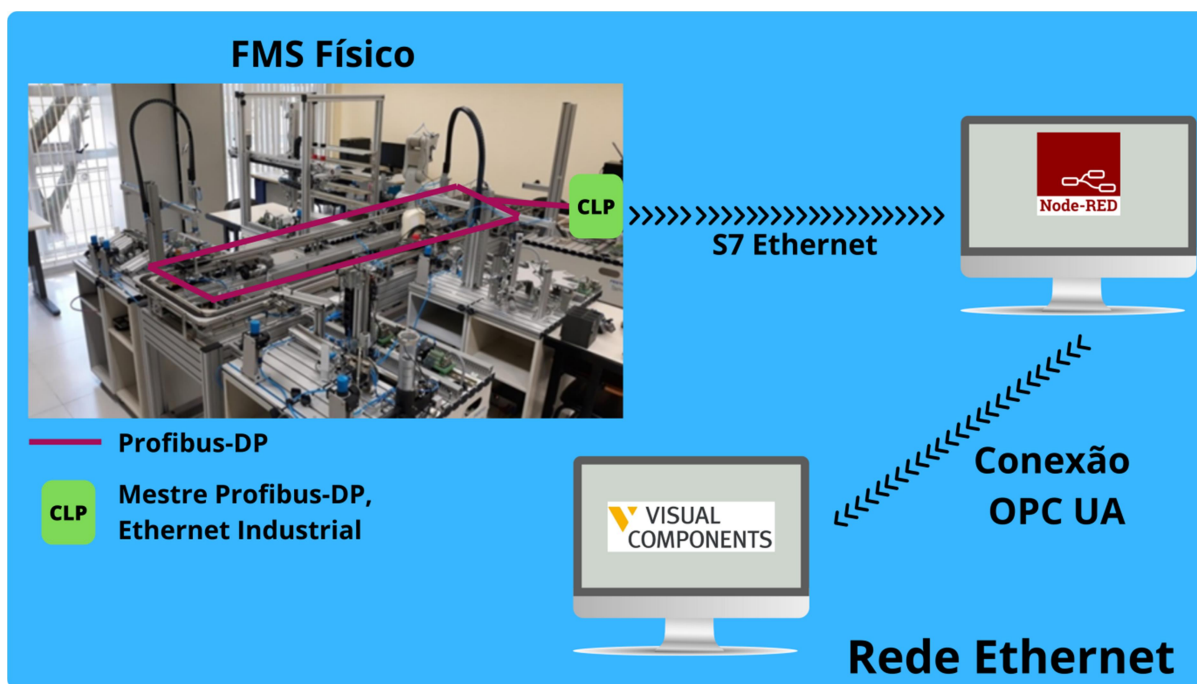
Por fim foi realizado um último teste, em que foi executado a simulação no Visual Components e a lógica de programação que veio através das estações reais de manufatura, para avaliar o funcionamento do modelo como um Digital Shadow (Figura 51). O Modelo do FMS (*Flexible Manufacturing System*), disponível na UNESP Sorocaba, está equipado com CLP's Siemens S7 300 nas estações de trabalho que possuem padrão de comunicação industrial PROFIBUS, porém não possuem as características necessárias de conectividade para a Indústria 4.0 devido à sua antiguidade. Todos os CLP's das estações de trabalho são considerados "escravos" e o CLP "mestre", que também comanda a esteira, embora também não possua tais tecnologias (como Modbus ou OPC-UA integrado) possui uma CPU Advanced, que contém módulo adicional de comunicação por Ethernet Industrial. Para permitir a sua integração às novas tecnologias, foi desenvolvida uma arquitetura que permite a comunicação via Ethernet e disponibiliza as informações em um servidor OPC-UA.

Essa arquitetura parte do próprio PROFIBUS, onde todas as entradas e saídas de cada CLP "escravo" das estações são mapeadas no código do "mestre" e disponibilizadas para uma aplicação no Node-RED. Isto é necessário não somente para a troca de informações dentro das estações como também para permitir que o OPC-UA, via Node-RED, tenha acesso ao que está acontecendo em tempo real. A programação das estações contempla tanto a leitura das variáveis de entrada (como os sensores da estação) como o acionamento das saídas (acionadores elétricos e eletropneumáticos). Desta forma é possível ler e controlar o que cada estação faz através do OPC-UA.

Uma vez que estas variáveis estão presentes no CLP "mestre", utiliza-se a linguagem Node-RED (baseada em JSON), para buscar as informações nele, tanto de leitura como de escrita. A linguagem Node-RED serve, portanto, como um tradutor entre o CLP Mestre e o OPC-UA, não tendo acesso direto aos escravos (o que é uma limitação da arquitetura devido ao hardware disponível nas estações). Sua escolha dá-se pela facilidade de programação e existência de módulos prontos

para a comunicação com o CLP S7 (driver “*node-red-contrib-s7*”). Além disso, o Node-RED possui bibliotecas para a implementação de um servidor OPC-UA, o que facilita a integração não exigindo hardware ou softwares adicionais. Uma vez disponibilizadas as variáveis no OPC-UA a integração com tecnologias da Indústria 4.0 torna-se possível.

Figura 51 – Diagrama de conexão dos sinais da simulação e as variáveis do CLP para o Teste 03



Fonte: Elaborado pelo autor.

O resultado da simulação pode ser verificado no vídeo³ endereçado pela Figura 52.

Figura 52 – QR Code para o vídeo da simulação do Sistema como um Digital Shadow



Fonte: Elaborado pelo autor.

³ Disponível em: <https://youtu.be/OUk3ok1Odel>

Neste teste, conforme pode-se verificar no vídeo endereçado pela figura acima, foi executado somente no primeiro par de estações de manufatura, a saber as estações Distributing e Testing. Foi necessário inserir uma propriedade nas estações de manufatura para alterar a velocidade de execução da simulação, para que acompanhe a velocidade das estações de trabalho reais, uma vez que o modelo virtual não possui nenhum tipo de mecanismo de sincronismo. Foi possível verificar que o software só identifica sinais de borda de subida, ou seja, somente sinais booleanos de valor “True”. Nas estações de trabalho reais que algum elemento executa alguma ação através de um sinal “False”, a simulação não consegue interpretar essa mudança do sinal. Foi necessário criar um sinal invertido no NodeRed para sanar essa questão.

6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com relação à modelagem das estações de manufatura, mesmo após definir a metodologia para efetuar a modelagem, esta se apresentou desafiadora, tendo em vista que dentre os trabalhos pesquisados não foi encontrado metodologia prática para virtualização de processos industriais que pudesse servir de suporte e também que cada estação tem uma particularidade que necessitou pesquisa específica para realizar a virtualização. Nessa pesquisa, o fórum do *Visual Components* se mostrou muito efetivo e a comunidade ali presente, bem como seus especialistas, foram de grande auxílio.

O software *Visual Components* se apresenta como um software robusto, que possibilita ao usuário efetuar configurações de diversas formas diferentes, mas que atingem o mesmo objetivo, portanto não há um procedimento padrão para virtualizar um equipamento ou processo neste software. Essa característica possibilitou a criação de várias estações de manufatura com funções e funcionamento diferentes. A biblioteca de componentes do software também possibilita a criação de layouts diversos de forma simples. Em algumas estações virtuais foi utilizado sensores da biblioteca, para servirem de suporte para a simulação, justamente pela praticidade que a biblioteca possui. O software possibilitou que fosse criado um Modelo Digital e também como Sombra Digital, onde podem ser explorados em simulações e comissionamento virtual. Ao testar o modelo virtual como Modelo Digital e depois como Sombra Digital, pode-se perceber o aumento de variáveis que influenciaram no correto funcionamento do sistema, pois algumas particularidades só foram

notados no teste como Sombra Digital. Esse fato corrobora que quanto maior o conhecimento do sistema físico, menor a incidência de erros ou dificuldades na virtualização.

O *Visual Components* também possui limitações. Um exemplo é que o software, na versão utilizada, não possui o recurso “Desfazer”. Nesses casos é necessário restaurar os arquivos de backup que o próprio software gera a cada salvamento do modelo. Outra característica que dificulta o uso em aplicações práticas é que o software não possui um player ou algum visualizador para executar a simulação, sendo necessário o carregamento do software completo, tanto para criar novos modelos, quanto somente para executar a simulação. E finalmente, ao realizar o teste do modelo como Sombra Digital, pode-se constatar que o software não reconhece sinais de borda de descida (valor “False”). Esse revés foi contornado com o Node-Red, mas tal característica faz com que o modelo virtual não reflita com fidedignidade a virtualização, e em alguns casos, até mesmo dificultar a sua modelagem.

A metodologia proposta foi estruturada de forma genérica, para que a mesma possa contemplar uma gama maior de aplicações. Contudo, mesmo possuindo esse aspecto genérico, o campo de aplicações pretendido é o de manufatura. Ao seguir a metodologia para modelar cada estação de manufatura individualmente, foi possível obter a modularidade do sistema. As estações de manufatura não possuem interdependência para o seu funcionamento, tampouco possuem sequência ou layout correto para montagem de um sistema. Tendo em vista a independência funcional das estações de manufatura, pode-se comparar cada estação a um sistema, e um layout de sistema de manufatura virtual utilizando tais estações como um sistema de sistemas.

A metodologia proposta trouxe benefícios na virtualização do sistema de manufatura, pois:

- possui caráter de implementação prática, estabelecendo passos simples e possíveis de serem executados com ferramentas disponíveis atualmente;
- o sistema de manufatura virtual tornou-se modular, tendo em vista que as estações de manufatura foram modeladas individualmente;
- é possível a criação e testes de diferentes cenários de um sistema de manufatura, bem como a facilidade de alteração de layouts;

- a incidência de erros na modelagem é menor ao seguir uma metodologia que trata primeiramente os componentes para posteriormente considerar o sistema.

Durante o desenvolvimento do trabalho, foi necessária a padronização para efetuar a nomenclatura dos sinais, tendo em vista a quantidade de informações e sinais que são manipulados pelo modelo do sistema completo (seis estações de manufatura e uma esteira circular). Cada estação possui sua particularidade, sendo modeladas tais particularidades de forma individualizada.

Na comunicação com Controladores Lógicos Programáveis, inicialmente realizou-se comunicação através de conexão com Siemens S7, tendo em vista que os CLP's das estações de manufatura utilizadas como modelo para o projeto possuem CLP's Siemens, contudo ao realizar os testes verificou-se que o software só conseguia realizar um sentido de comunicação (que no projeto foi adicionado como "*Server to Simulation*"). Mesmo após algumas investigações no software, não foi encontrado o motivo para tal comportamento. Para que pudesse haver uma comunicação em ambos os sentidos ("*Server to Simulation*" e "*Simulation to Server*"), houve a troca para o software CodeSYS, utilizando a comunicação OPC UA.

Nos testes realizados pode-se perceber que o poder computacional é um requisito prioritário para que a simulação possa ser executada apropriadamente, onde preferencialmente o computador que executa o Visual Components possua placa gráfica dedicada. Notou-se também que a comunicação Ethernet sem fio também exerce influência no atraso de resposta entre a simulação e o sistema real, contudo não foi algo que prejudicou o funcionamento da simulação.

7 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou uma metodologia para a virtualização de sistemas de manufatura e a mesma foi aplicada na virtualização de um sistema de manufatura flexível, tomando como modelo o sistema de manufatura didático da *Festo Didactic*. Foi realizada a virtualização utilizando o software *Visual Components* e foi realizada a comunicação desse modelo virtualizado utilizando softwares de CLP virtual (Siemens S7 e CodeSYS).

Nota-se o alinhamento da metodologia proposta (Figura 08) com as partes propostas por Lee; Park (2014) para a modelagem de um sistema, sendo a parte geométrica, parte cinemática e parte lógica presentes também na aplicação da metodologia proposta. Tal metodologia pode ser utilizada em outras ferramentas de modelagem, tendo em vista o caráter genérico proposto e a sua compatibilidade para sistemas de manufatura.

A simulação 3D do sistema de manufatura se mostrou um recurso efetivo para monitoramento remoto, caso esse sistema esteja conectado em uma rede Ethernet TCP/IP. No trabalho apresentado, a visualização se mostrou fidedigna pois:

- os desenhos 3D possuíam todos os detalhes das estações de manufatura física tomadas como referência ;
- o software *Visual Components* permitiu a criação das funções de cinemática das estações;
- foi possível a criação dos diversos sinais criados na estação de manufatura virtual e o pareamento desses sinais com programas de CLP.

Ao utilizar dois tipos de interfaces CLP, ficou evidente a flexibilidade e facilidade que a comunicação OPC UA possui, tendo em vista sua configuração e utilização no software. Nos testes realizados, foi possível verificar a comunicação do modelo com CLP's, tanto virtuais (testes com o software CodeSYS) quanto físicos (teste com as estações de trabalho físicas e Node-RED); o que possibilitou vislumbrar a utilização do modelo virtual em cenários de gêmeos digitais.

O *Visual Components* ainda possui recursos não explorados nesse trabalho, tais como componentes estatísticos que podem ser de grande valia ao associar o modelo com softwares de inteligência de negócio, de análise de processo produtivo ou ferramentas de aprendizado de máquinas.

Por fim, acredita-se que o software *Visual Components* possui potencial para explorar modelos de gêmeos digitais, contudo é necessária a criação do sincronismo entre a estação de manufatura virtual e real de forma dinâmica. Nesse caso novas funções e sinais devem ser criados na programação do *Python Script*, para alterar a velocidade de execução da cinemática do modelo a fim de se obter tal sincronismo.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, pode-se sugerir:

- Exploração do modelo em um contexto de gêmeos digitais, com a implantação de sincronismo entre os ambientes físico e virtual e mecanismos que levem em consideração as variáveis dinâmicas;
- Integração do modelo e seus componentes estatísticos com softwares de Business Intelligence;
- Inserção de ferramentas de aprendizagem de máquinas para análise do processo produtivo.
- Explorar a metodologia de virtualização proposta em outras ferramentas de modelagem de sistemas industriais de forma a validar e consolidar a mesma na criação de Modelos digitais, Digital Shadows ou Gêmeos Digitais.

REFERÊNCIAS

- ARNARSON, Halldor *et al.* Towards automatic configuration and programming of a manufacturing cell. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 64, p. 225-235, 2022.
- BOSCHERT, Stefan; ROSEN, Roland. Digital twin—the simulation aspect. In: **Mechatronic futures**. Springer, Cham, 2016. p. 59-74.
- BUKANTAITÉ, Simona. Factors of smart production processes modernization. In: **2020 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)**. IEEE, 2020. p. 1-5.
- COLOMBO, Armando W. *et al.* Industrial cyberphysical systems: A backbone of the fourth industrial revolution. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, v. 11, n. 1, p. 6-16, 2017.
- DRATH, Rainer; HORCH, Alexander. Industrie 4.0: Hit or hype?[industry forum]. **IEEE industrial electronics magazine**, v. 8, n. 2, p. 56-58, 2014.
- EL SADDIK, Abdulmotaleb. Digital twins: The convergence of multimedia technologies. **IEEE multimedia**, v. 25, n. 2, p. 87-92, 2018.
- GARTNER, INC. Gartner Glossary. c2020. Disponível em: <<https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/internet-of-things>>. Acesso em 20/11/2022.
- GIVEHCHI, Omid *et al.* Interoperability for industrial cyber-physical systems: An approach for legacy systems. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 13, n. 6, p. 3370-3378, 2017.
- GLAESSGEN, Edward; STARGEL, David. The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles. In: **53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics and materials conference 20th AIAA/ASME/AHS adaptive structures conference 14th AIAA**. 2012. p. 1818.
- GRIEVES, Michael. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. **White paper**, v. 1, n. 2014, p. 1-7, 2014.
- HAAG, Sebastian; ANDERL, Reiner. Digital twin—Proof of concept. **Manufacturing letters**, v. 15, p. 64-66, 2018.
- HARWOOD, T., IoT Overview Handbook [Online]. Disponível em: <<https://www.postscapes.com/iot/>>. Acesso em: 22/11/2022
- HERMANN, Mario; PENTEK, Tobias; OTTO, Boris. Design principles for industrie 4.0 scenarios. In: **2016 49th Hawaii international conference on system sciences (HICSS)**. IEEE, 2016. p. 3928-3937.
- HSRC. Industry 4.0 Market Reserarch. **Industry 4.0 Technologies**. [S.l]: Industry 4.0 Market Research, 2019. Disponível em: https://industry40marketresearch.com/blog/industry_4-0_technologies/. Acesso em: 05 dez. 2023.

INGALLS, Ricki G. Introduction to simulation. In: **Proceedings of the 2011 winter simulation conference (WSC)**. IEEE, 2011. p. 1374-1388.

JOHANSSON, Oscar. **Testing and evaluation of virtual commissioning-case study of an existing robot cell at Scania modelled with 3Dexperience**. 2017. 44fls. Master's Thesis (Master in Technology) - Chalmers University of Technology, 2017.

KAGERMANN, Henning; LUKAS, Wolf-Dieter; WAHLSTER, Wolfgang. Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution. **VDI nachrichten**, v. 13, n. 1, p. 2-3, 2011.

KIM, Yong S. *et al.* Application of virtual commissioning technology in a steel making industry. In: **2013 13th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2013)**. IEEE, 2013. p. 1718-1720.

KIRNER, Claudio; TORI, Romero. **Fundamentos de realidade aumentada. Fundamentos e tecnologia de realidade virtual e aumentada**, v. 1, p. 22-38, 2006.

KRITZINGER, Werner *et al.* Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. **Ifac-PapersOnline**, v. 51, n. 11, p. 1016-1022, 2018.

LAURINDO, Quézia Manuela Gonçalves *et al.* Comissionamento de uma linha de produção no software de simulação a eventos discretos Ururau. **Gepros: Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, v. 12, n. 1, p. 167, 2017.

LEE, Chi G.; PARK, Sang C. Survey on the virtual commissioning of manufacturing systems. **Journal of Computational Design and Engineering**, v. 1, n. 3, p. 213-222, 2014.

OPPELT, Mathias; URBAS, Leon. Integrated virtual commissioning an essential activity in the automation engineering process: From virtual commissioning to simulation supported engineering. In: **IECON 2014-40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. IEEE, 2014. p. 2564-2570.

OVERBY, Eric. Process virtualization theory and the impact of information technology. **Organization science**, v. 19, n. 2, p. 277-291, 2008.

PALATTELLA, Maria Rita *et al.* Internet of things in the 5G era: Enablers, architecture, and business models. **IEEE journal on selected areas in communications**, v. 34, n. 3, p. 510-527, 2016.

REINHART, Gunther; WÜNSCH, Georg. Economic application of virtual commissioning to mechatronic production systems. **Production engineering**, v. 1, n. 4, p. 371-379, 2007.

ROLLE, Rodrigo Pita. Arquitetura para construção de gêmeos digitais com foco na Indústria 4.0. 2019.

ROMANO, Matheus. Entenda tudo sobre a integração na indústria 4.0 e conheça as integrações horizontal e vertical, 2017. Disponível em: <<https://www.logiquesistemas.com.br/blog/integracao-na-industria-40/>> . Acesso em: 11/08/2023

RÜßMANN, Michael *et al.* Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. **Boston consulting group**, v. 9, n. 1, p. 54-89, 2015.

SCHAMP, Matthias *et al.* Virtual commissioning of industrial control systems-a 3D digital model approach. **Procedia Manufacturing**, v. 39, p. 66-73, 2019.

SCHWAB, Klaus. A quarta revolução industrial. Edipro, 2019.

SHAFTO, Mike *et al.* Modeling, simulation, information technology & processing roadmap. **National Aeronautics and Space Administration**, v. 30, n. 2010, p. 1-28, 2010.

SHANNON, Robert E. Introduction to the art and science of simulation. In: **1998 winter simulation conference. proceedings (cat. no. 98ch36274)**. IEEE, 1998. p. 7-14.

SISINNI, Emiliano *et al.* Industrial internet of things: Challenges, opportunities, and directions. **IEEE transactions on industrial informatics**, v. 14, n. 11, p. 4724-4734, 2018.

SOORI, Mohsen; AREZOO, Behrooz; DASTRES, Roza. Virtual manufacturing in industry 4.0: A review. **Data Science and Management**, 2023.

SRIVASTAVA, Aditya; VISHNOI, Ankit; SRIVASTAVA, Kingshuk. Process virtualisation in Internet of Things (IoT)—A study. In: **2016 2nd International Conference on Next Generation Computing Technologies (NGCT)**. IEEE, 2016. p. 215-218.

SCHROEDER, Greyce N. *et al.* A methodology for digital twin modeling and deployment for industry 4.0. **Proceedings of the IEEE**, v. 109, n. 4, p. 556-567, 2020.

TAO, Fei *et al.* Five-dimension digital twin model and its ten applications. **Computer integrated manufacturing systems**, v. 25, n. 1, p. 1-18, 2019.

TAO, Fei *et al.* Digital twin modeling. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 64, p. 372-389, 2022.

VAUGHAN, William. Digital modeling. **New Riders**, 2011.

VERMAAK, H. J.; NIEMANN, J. A. Validating a reconfigurable assembly system utilizing virtual commissioning. **Interim: Interdisciplinary Journal**, v. 14, n. 1, p. 100-109, 2015.

VISUAL Components. **Visual Components Premium**. Versão 4.4. [S.l]: Visual Components, 2021. 1 Software.

WU, Chunlong *et al.* Conceptual digital twin modeling based on an integrated five-dimensional framework and TRIZ function model. **Journal of manufacturing systems**, v. 58, p. 79-93, 2021.

YI, Yang *et al.* Digital twin-based smart assembly process design and application framework for complex products and its case study. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 58, p. 94-107, 2021.

ZHAOYUN, Zhang; LINJUN, Lv. Application status and prospects of digital twin technology in distribution grid. **Energy Reports**, v. 8, p. 14170-14182, 2022.

ZHOU, Kelian; LIU, Taigang; ZHOU, Lifeng. Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges. In: **2015 12th International conference on fuzzy systems and knowledge discovery (FSKD)**. IEEE, 2015. p. 2147-2152.