

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor,
o texto completo desta dissertação será
disponibilizado somente a partir
de 09/12/2024.

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.

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.

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.
- BUKANTAITĖ, 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.