

RESSALVA

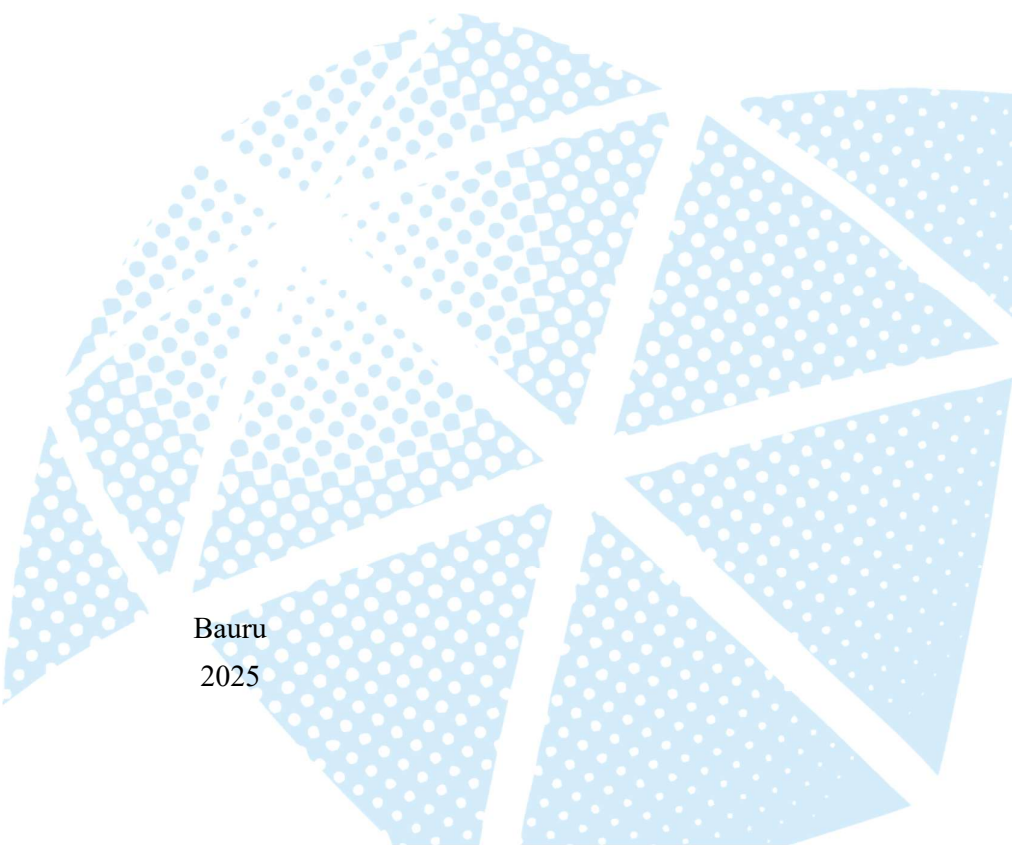
Atendendo a solicitação do autor, Ricardo Pasquati Pontarolli, o texto completo deste documento será disponibilizado somente a partir de 02/08/2027.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
Faculdade de Engenharia - Câmpus de Bauru
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

RICARDO PASQUATI PONTAROLLI

ARQUITETURA PLUG-AND-PRODUCE ORIENTADA A MICROSERVIÇOS
PARA AUTOMAÇÃO NA INDÚSTRIA 4.0

Bauru
2025



RICARDO PASQUATI PONTAROLLI

**ARQUITETURA PLUG-AND-PRODUCE ORIENTADA A MICROSERVIÇOS
PARA AUTOMAÇÃO NA INDÚSTRIA 4.0**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Bauru, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Automação

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Paciencia
Godoy

Bauru

2025

P811a

Pontarolli, Ricardo Pasquati

Arquitetura Plug-and-Produce orientada a microsserviços para
automação na Indústria 4.0 / Ricardo Pasquati Pontarolli. -- Bauru,
2025

193 p. : il., tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Engenharia, Bauru

Orientadora: Eduardo Paciencia Godoy

1. Engenharia elétrica. 2. Automação industrial. 3. Controle de
processo. 4. Arquitetura. 5. Modelos. I. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE RICARDO PASQUATI PONTAROLLI, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 01 dias do mês de agosto do ano de 2025, às 15h, no(a) Sala Gasi - Sorocaba , realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de RICARDO PASQUATI PONTAROLLI, intitulada **ARQUITETURA PLUG-AND-PRODUCE ORIENTADA A MICROSSERVIÇOS PARA AUTOMAÇÃO NA INDÚSTRIA 4.0**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. EDUARDO PACIÊNCIA GODOY (Orientador(a) - Participação Presencial) do(a) Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia UNESP Câmpus de Sorocaba, Prof. Dr. GUILHERME SERPA SESTITO (Participação Virtual) do(a) Departamento Acadêmico de Elétrica - CP - DAELE-CP / Universidade Tecnológica Federal do Paraná -Campus Cornélio Procópio, Prof. Dr. VICENTE FERREIRA DE LUCENA JUNIOR (Participação Virtual) do(a) Eletrônica e Computação / Universidade Federal do Amazonas, Prof. Dr. LUIS ARMANDO DE ORO ARENAS (Participação Presencial) do(a) Departamento de Engenharia Ambiental / Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP - Câmpus de Sorocaba, Prof. Dr. EDUARDO VERRI LIBERADO (Participação Presencial) do(a) Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP - Câmpus de Sorocaba. Após a exposição pelo doutorando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: **APROVADO** . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. EDUARDO PACIÊNCIA GODOY



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
ICPEdu - Certificado Pessoal
<https://pessoal.icpedu.rnp.br/public/verificar-assinatura>

Assinado de forma digital por Eduardo Paciencia
Godoy:29137583808
Dados: 2025.08.07 17:39:36 -03'00'

Impacto potencial dessa pesquisa

A arquitetura *Plug-and-Produce* permitirá a automação da implantação de serviços em ativos distribuídos de forma granular, juntamente com a configuração e o comissionamento, os quais sejam modulares e de código aberto, dentro do contexto de controle de processos industriais. Adicionalmente, busca-se estabelecer mecanismos que facilitem e padronizem o desenvolvimento de aplicações de controle de processos no contexto do referido paradigma. Além disso, ao promover a internacionalização e a colaboração em projetos de pesquisa conjuntos com a Universidade de Brescia fortalecerá a reputação da UNESP globalmente. A adoção e a disseminação dessa arquitetura *Plug-and-Produce* têm o potencial de melhorar a competitividade da indústria brasileira, podendo impactar positivamente nas indústrias químicas, alimentos e bebidas, petróleo e gás no âmbito nacional.

Potential impact of this research

The Plug-and-Produce architecture will enable the automation of service deployment across distributed assets in a granular manner, along with configuration and commissioning, which are modular and open source, within the context of industrial process control. Additionally, we seek to establish mechanisms that facilitate and standardize the development of process control applications in the context of the paradigm. Furthermore, by promoting internationalization and collaboration in joint research projects with the University of Brescia it will strengthen UNESP's reputation globally. The adoption and dissemination of this Plug-and-Produce architecture has the potential to improve the competitiveness of Brazilian industry, potentially having a positive impact on the chemical, food and beverage, oil and gas industries nationwide.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título da Tese de Doutorado: ARQUITETURA PLUG-AND-PRODUCE ORIENTADA A MICROSERVIÇOS PARA AUTOMAÇÃO NA INDÚSTRIA 4.0

Aluno: RICARDO PASQUATI PONTAROLLI

Orientador: EDUARDO PACIENCIA GODOY

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia - Câmpus De Bauru, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. EDUARDO PACIÊNCIA GODOY (Orientador)
Departamento de Engenharia de Controle e Automação /
Universidade Estadual Paulista Câmpus de Sorocaba


UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
ICPEdu - Certificado Pessoal
<https://pessoal.icpedu.rnp.br/public/verificar-assinatura>

Assinado de forma digital
por Eduardo Paciencia
Godoy:29137583808
Dados: 2025.08.07
17:51:50 -03'00'

Prof. Dr. GUILHERME SERPA SESTITO Departamento
Acadêmico de Elétrica / Universidade Tecnológica Federal do
Paraná –Campus Cornélio Procopio



Documento assinado digitalmente

GUILHERME SERPA SESTITO
Data: 07/08/2025 20:43:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. VICENTE FERREIRA DE LUCENA JUNIOR
Departamento de Eletrônica e Computação / Universidade
Federal do Amazonas



Documento assinado digitalmente

VICENTE FERREIRA DE LUCENA JUNIOR
Data: 15/08/2025 18:27:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. LUIS ARMANDO DE ORO ARENAS Departamento de
Engenharia Ambiental / Univrsidade Estadual Paulista -
Câmpus de Sorocaba



Assinado de forma
digital por Luis
Armando De Oro Arenas
Dados: 2025.08.07
19:30:35 -03'00'

Prof. Dr. EDUARDO VERRI LIBERADO Departamento de
Engenharia de Controle e Automação / Universidade Estadual
Paulista Câmpus de Sorocaba



Documento assinado digitalmente

EDUARDO VERRI LIBERADO
Data: 07/08/2025 20:28:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Bauru, 01 de agosto de 2025.

*Este trabalho é dedicado às crianças adultas que,
quando pequenas, sonharam em se tornar cientistas.*

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por ter me mantido na trilha certa durante este projeto de pesquisa, com saúde e forças para chegar até o final. Agradeço ao orientador Prof. Dr. Eduardo Paciência Godoy¹, por aceitar e conduzir o trabalho de pesquisa sempre na direção certa, pelo incentivo, pela dedicação do seu escasso tempo ao projeto e pelas valiosas contribuições durante todo o processo. Ao Prof. Dr. Paolo Ferrari², ao Prof. Dr. Emiliano Sisinni³, e à Universidade de Brescia⁴ (UNIBS), na Itália, pela oportunidade, orientação e supervisão do Programa de Doutorado-sanduiche no Exterior (PDSE), além dos colegas internacionais de doutorado em especial a Massimiliano Gaffurini⁵. A todos os meus professores do curso de Doutorado em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual Paulista, pela excelência da qualidade técnica de cada um. Também agradeço aos meus novos colegas de pós-graduação do Grupo de Automação e Sistemas Integráveis (GASI), que sempre me ajudaram com sua vasta experiência desde o início deste projeto de pesquisa. Agradeço ao Instituto Federal de São Paulo⁶, pelo incentivo à qualificação de seus colaboradores. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP)⁷, processos número 2018/19984-4, 2020/09850-0 e 2024/21954-7, pelo apoio essencial à realização desta pesquisa. Sou grato à minha família pelo apoio constante ao longo da minha vida: aos meus pais, que sempre estiveram presentes, e à minha querida esposa, pelo amor incondicional, compreensão e paciência demonstrada durante todo o período do projeto. A minha primeira filha que nasceu no último ano deste projeto, por relembrar-me a ser criança novamente, permitindo tentar, errar, explorar o novo. Deixo aqui um sincero obrigado a todos aqueles que, de alguma maneira, me ajudaram a chegar até aqui. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES)⁸ - Código de Financiamento 001.

¹ <<https://orcid.org/0000-0003-3375-096X>>

² <<https://orcid.org/0000-0002-6349-4410>>

³ <<https://orcid.org/0000-0001-5012-443X>>

⁴ <<https://www.unibs.it/en/>>

⁵ <<https://tech4health.unibs.it/index.php/people/students/xxxviii-cycle/gaffurini-massimiliano/>>

⁶ <<https://btv.ifsp.edu.br/>>

⁷ <<https://fapesp.br/>>

⁸ <<https://www.gov.br/capes/pt-br>>

*“Pensar é o trabalho mais difícil que existe.
Talvez por isso tão poucos se dediquem a ele.”*

Henry Ford

Entrevista “My Philosophy of Industry”, *The Forum*, abr. 1928

Resumo

A Indústria 4.0 (I4.0) norteou a evolução das arquiteturas de controle e automação para a orientação a serviços, a Computação em Nuvem, na Borda e a comunicação baseada na *Internet* das Coisas Industrial buscando fornecer maior modularidade, integração vertical e conectividade. Nessa temática, a vanguarda do conhecimento e das pesquisas atuais se encontra nos desafios de desenvolvimento e padronização dos modelos de informação, dos métodos, processos e gestão dos ativos industriais e da criação (composição) e gerenciamento das diferentes aplicações industriais baseadas em serviços. O objetivo desta pesquisa foi o desenvolvimento de uma arquitetura *Plug-and-Produce* (*PnPr*) orientada a microsserviços para automação na Indústria 4.0 sistematizada em dois processos. O processo de *Plug*, contemplando as etapas de modelar, agregar, servitizar, instalar e descobrir, focado no comissionamento e descoberta dos ativos e o processo de *Produce*, contemplando as etapas de comunicar, selecionar, analisar, compor e gerenciar, focado na composição dos ativos para criação das aplicações. Na parte do *Plug* investigou-se e desenvolveu-se a modelagem da informação dos ativos baseado no padrão do *Asset Administration Shell* (AAS), a disponibilização dessas informações através de um agregador de dados compatível com AAS, a programação lógica, registro e descoberta dos ativos como um microsserviço e a instalação e gestão dos ativos usando tecnologia de contêineres (*Docker*). Na parte do *Produce*, a orquestração das aplicações foi desenvolvida através da composição dos ativos usando ferramentas de desenvolvimento na borda industrial, como o *Node-RED*, através das comunicações disponíveis na arquitetura *PnPr*: *API Gateway*, microsserviços (*Transporter*) e OPC UA. O desenvolvimento da arquitetura *PnPr* é apresentado, detalhando-se as etapas do *Plug* e do *Produce*. A validação experimental da arquitetura foi realizada numa planta piloto de controle de processos baseada em microsserviços, descrevendo as etapas do processo de *Plug*. Ativos foram compostos para criação de malhas de controle de processo apresentando as etapas do *Produce*. Experimentos na planta piloto demonstraram a facilidade na implantação de ativos e capacidade de reconfiguração dinâmica de aplicações industriais de controle e automação de processos. A arquitetura *PnPr* habilita a universalização do acesso aos ativos industriais e a criação de Gêmeos Digitais, bem como a compatibilidade com o padrão emergente *Open-Process Automation Standard* (O-PAS), reforçando seu alinhamento com os pilares da Indústria 4.0.

Palavras-chave: arquiteturas de automação. serviços. modelos da informação. orquestração. controle de processos.

Abstract

Industry 4.0 has guided the evolution of control and automation architectures towards service orientation, Cloud and Edge Computing, and communication based on the Industrial Internet of Things, aiming to provide greater modularity, vertical integration, and connectivity. In this context, the forefront of current knowledge and research lies in the challenges of developing and standardizing information models, methods, processes, and the management of industrial assets, as well as in the creation (composition) and management of different service-based industrial applications. The objective of this research was the development of a microservice-oriented Plug-and-Produce (PnPr) architecture for automation in Industry 4.0, systematized in two processes. The Plug process includes the stages of modeling, providing, servitizing, installing, and discovering, focused on commissioning and asset discovery; and the Produce process, which includes the stages of communicating, selecting, analyzing, composing, and managing, focused on asset composition for application creation. In the Plug part, the modeling of asset information based on the Asset Administration Shell (AAS) standard was investigated and developed, as well as the provision of this information through an AAS-compatible data aggregator, logical programming, asset registration and discovery as a microservice, and the installation and management of assets using container technology (Docker). In the Produce part, application orchestration was developed through asset composition using industrial edge development tools, such as Node-RED, through the communications available in the PnPr architecture: API Gateway, microservices (Transporter), and OPC UA. The development of the PnPr architecture is presented, detailing the Plug-and-Produce stages. The experimental validation of the architecture was carried out in a pilot plant for process control based on microservices, describing the steps of the Plug process. Assets were composed to create process control loops, presenting the steps of the Produce process. Experiments in the pilot plant demonstrated the ease of deploying assets and the capability for dynamic reconfiguration of industrial control and automation applications. The PnPr architecture enables the universalization of access to industrial assets and the creation of Digital Twins, as well as compatibility with the emerging Open-Process Automation Standard (O-PAS), reinforcing its alignment with the pillars of Industry 4.0.

Keywords: automation architectures; services; information models; orchestration; process control.

Lista de ilustrações

Figura 1	– Convergência de arquiteturas de <i>Operational Technology</i> e <i>Information Technology</i>	26
Figura 2	– NAMUR <i>Open Architecture</i> (a), serviço de <i>Monitoring and Optimization</i> (b) e extensão de um dispositivo de campo pelo canal paralelo.	39
Figura 3	– Migração da tradicional arquitetura em camadas ISA-95 (a) para uma arquitetura plana com composição de serviços e aplicações (b).	41
Figura 4	– <i>Microservice-Oriented Architecture for Industry 4.0</i> , estrutura modular e escalável para aplicações industriais baseadas em microsserviços.	43
Figura 5	– Visão geral da arquitetura do historiador de <i>big data</i> semântico: (a) Arquitetura SBDH; (b) Dispositivos <i>PnP</i> na SBDH.	47
Figura 6	– Processo de design para componentes de <i>software</i> baseados em serviços <i>PnP</i> (a) e Exemplo de estudo de caso de linha de montagem (b).	48
Figura 7	– <i>OpenPnP</i> , uma arquitetura <i>Plug-and-Produce</i> para <i>internet</i> das coisas industrial.	51
Figura 8	– Arquitetura de sistema para a realização de <i>PnP</i> com habilidades genéricas de dispositivos.	53
Figura 9	– Estrutura do sistema <i>Plug-and-Produce</i> baseado em <i>Asset Administration Shell</i> e comunicação OPC UA.	55
Figura 10	– EDD de um sensor de corrente e temperatura (a) <i>UaExpert</i> (Cliente OPC UA) mostrando os nós do servidor OPC UA (b).	65
Figura 11	– Cronologia e visão geral da tecnologia FDI: evolução e marcos importantes no desenvolvimento e implementação dessa tecnologia.	66
Figura 12	– PA-DIM como parte de um servidor FDI com modelos da informação combinados ou em um dispositivo OPC UA nativo.	69
Figura 13	– Visão geral do formato de troca de dados de engenharia AML (a) e submodelos de um componente AML (b).	71
Figura 14	– Identificador único (ID) para o <i>Administration Shell</i> na cor em azul e o seu respectivo <i>Asset</i> na cor em cinza.	74
Figura 15	– Tipos de interações possíveis dos componentes industriais que utilizam o AAS, sendo (a) passiva, (b) reativa e (c) proativa.	75
Figura 16	– Implementação de interação passiva e ativa utilizando o <i>Asset Administration Shell</i>	76
Figura 17	– <i>Asset Administration Shell</i> (a e b) e sua relação com <i>Reference Architectural Model for Industrie 4.0</i> (c).	77
Figura 18	– <i>Software</i> representado como um <i>Asset Administration Shell</i> de um ativo industrial, neste caso um sensor.	78

Figura 19 – <i>Software</i> representado como um <i>Asset Administration Shell</i> distribuído nas principais camadas industriais.	79
Figura 20 – Modelos de simulação a esquerda e Arquitetura AAS com exemplo de sub-modelo de simulação a direita.	79
Figura 21 – Arquitetura <i>Plug-and-Produce</i> , estrutura que descreve o processo do <i>Plug</i> e interação entre seus componentes principais.	82
Figura 22 – Ciclo de vida e formatos do AAS, representa as fases e estruturas do <i>Asset Administration Shell</i>	86
Figura 23 – Arquitetura de microsserviços, abordagem modular para desenvolvimento de componentes independentes.	88
Figura 24 – <i>ServiceBroker</i> de um microsserviço que possui alguns serviços internos para verificar a saúde do nó ou obter algumas informações de registro.	94
Figura 25 – Descoberta e registro dinâmica de serviços do <i>Molecular</i> utilizando servidor <i>Redis</i>	95
Figura 26 – Arquitetura <i>Plug-and-Produce</i> , estrutura que descreve o processo do <i>Produce</i> e interação entre seus componentes principais.	97
Figura 27 – Interface do <i>OpenPLC</i> Editor: ambiente de programação para sistemas de automação baseado na norma IEC 61131-3.	102
Figura 28 – Interface da <i>4diac</i> IDE: ambiente gráfico para modelagem de sistemas de controle distribuído IEC 61499.	103
Figura 29 – Interface do <i>Node-RED</i> : ambiente de desenvolvimento visual para programação de fluxos em sistemas de automação.	104
Figura 30 – Interface do <i>Grafana</i> : plataforma de visualização de dados para monitoramento e análise em tempo real.	107
Figura 31 – <i>Node-RED</i> com os respectivos nodes do (a) <i>Molecular</i> , (b) OPC UA e (c) MQTT.	108
Figura 32 – Planta piloto industrial: (a) Parte frontal com painel aberto; (b) Parte frontal com o painel fechado; (c) Lado direito.	117
Figura 33 – Legenda do P&ID da Planta piloto industrial com descrição dos instrumentos e conexões.	118
Figura 34 – Planta piloto industrial com P&ID: diagrama detalhado dos processos, equipamentos e fluxos de materiais da planta.	119
Figura 35 – Exportação do modelo da informação do ativos em três formatos mapeados de forma equivalente com o <i>AASX Package Explorer</i>	121
Figura 36 – Criação do <i>aasx server</i> contendo o modelo de informação do ativo <i>pit118_daq</i> para interações reativas entre os componentes industriais.	123
Figura 37 – Acesso através de API REST ao modelo da informação no <i>aasx server</i> para interações entre os componentes industriais de forma reativa.	124

Figura 38 – Criação do microserviço <i>pit118_daq.js</i> contendo seu modelo de informação para interações proativa entre os componentes industriais.	125
Figura 39 – Diagrama de classe para criação dos microserviços dos principais ativos da planta como sensores, controladores e atuadores.	128
Figura 40 – Processo de encapsulamento dos microserviços, registro remoto e criação dos <i>Containers</i> nos ativos.	131
Figura 41 – Diagrama de comissionamento, distribuição e implantação dos microserviços dos ativos relacionados ao processo de <i>Plug</i>	134
Figura 42 – Ambientes dos ativos da planta industrial gerenciáveis pela interface gráfica do <i>Portainer</i> através do navegador.	138
Figura 43 – Lista de <i>containers</i> instanciados em um ativo industrial, que é gerenciável pelo <i>Portainer</i> através do navegador.	139
Figura 44 – Diagrama de sequência ilustrando o registro e descoberta dos serviços dos ativos, com seu respectivo batimento cardíaco.	141
Figura 45 – Aba da interface do usuário com instruções e informações sobre o processo de <i>Produce</i>	143
Figura 46 – Aba da interface do usuário com instruções e informações sobre a etapa de comunicação.	144
Figura 47 – Diagrama de sequência do fluxo de comunicação e atualização dinâmica dos serviços de ativos na <i>User Interface (UI)</i>	147
Figura 48 – Monitoramento de nós: Status, métricas de CPU e últimos heartbeats refletem a saúde dos ativos em tempo real.	148
Figura 49 – Inventário de serviços: visão geral dos serviços oferecidos pelos assets e suas capacidades (ações/eventos).	149
Figura 50 – Mapeamento de ações: visão técnica das operações suportadas pelos assets, com parâmetros essenciais para integração.	149
Figura 51 – Aba da interface do usuário com instruções e informações sobre a etapa de seleção.	150
Figura 52 – Diagrama de sequência do fluxo de interação entre UI e <i>backend</i> para seleção e atualização de ativos.	152
Figura 53 – Menus de seleção de ativos na UI do <i>Node-RED</i> , com opções dinâmicas fornecidas pelo <i>backend</i>	153
Figura 54 – Aba da interface do usuário com instruções e informações sobre a etapa de análise.	154
Figura 55 – Diagrama de sequência da análise e configuração dos ativos da planta industrial.	155
Figura 56 – Diagrama de sequência da análise e configuração do gerador de função para geração de perfil de controle.	156

Figura 57 – Análise e configuração do ativo sensor na interface do usuário no processo de <i>Produce</i>	157
Figura 58 – Análise e configuração do ativo controlador PID na interface do usuário no processo de <i>Produce</i>	158
Figura 59 – Análise e configuração do ativo atuador na interface do usuário no processo de <i>Produce</i>	158
Figura 60 – Análise e configuração do ativo gerador de função na interface do usuário no processo de <i>Produce</i>	159
Figura 61 – Análise e configuração do ativo válvula na interface do usuário no processo de <i>Produce</i>	159
Figura 62 – Aba da interface do usuário com instruções e informações sobre a etapa de composição.	161
Figura 63 – Sequência de seleção da aplicação industrial: Nível do tanque, Pressão do reservatório ou tubulação e vazão.	162
Figura 64 – Diagrama de sequência do fluxo de execução da malha de controle dos ativos da planta industrial.	163
Figura 65 – Seleção de aplicações industriais pré-definidas na interface do usuário: Nível do tanque, Pressão do reservatório ou tubulação e vazão.	164
Figura 66 – Aba da interface do usuário com instruções e informações sobre a etapa de gerenciamento.	165
Figura 67 – Sequência de ativação/desativação do controle de processo industrial na etapa de gerenciamento do <i>Produce</i>	166
Figura 68 – Monitoramento de métricas de controle e armazenamento de dados caso gravação esteja ativa.	167
Figura 69 – Sistema de log de dados industriais com ativação manual de gravação e exportação sob demanda para análise offline.	168
Figura 70 – Interface do usuário para gerenciamento de uma aplicação industrial no processo de <i>Produce</i>	169
Figura 71 – Interface do usuário para monitoramento de uma aplicação industrial no processo de <i>Produce</i>	170
Figura 72 – Caracterização da resposta de controle em malha fechada da pressão na tubulação da planta industrial.	171
Figura 73 – Caracterização da resposta de controle em malha fechada do nível do tanque da planta industrial.	172
Figura 74 – Caracterização da resposta de controle em malha fechada da pressão no reservatório da planta industrial.	173
Figura 75 – Caracterização da resposta de controle em malha fechada da vazão na tubulação da planta industrial.	174

Figura 76 – Painel frontal da planta piloto industrial para habilitar a sua operação de controle de processos.	192
--	-----

Lista de listagens

Listagem 1	–	Descoberta e registro dinâmica de serviços do <i>Molecular</i> utilizando servidor <i>Redis</i>	95
Listagem 2	–	Descoberta e registro dinâmica de serviços do <i>Molecular</i> utilizando servidor <i>Redis</i>	95
Listagem 3	–	Criação do modelo da informação de um ativo da planta industrial, sensor PIT118, utilizando o <i>AASX Package Explorer</i> como editor.	120
Listagem 4	–	Arquivo de configuração e execução, <i>docker compose</i> , necessario para a implantação do <i>aasx server</i>	122
Listagem 5	–	Microserviço genérico de um ativo carregando o AAS mapeado para JSON para interações proativa utilizando o <i>transporter</i>	125
Listagem 6	–	Microserviço de um ativo carregando o AAS que foi mapeado para <i>NodeSet</i> para comunicação proativa utilizando OPC UA.	125
Listagem 7	–	Esquema do microserviço de matematica que utiliza o <i>Framework Molecular</i> para definir duas ações de soma e subtração.	127
Listagem 8	–	Trecho da estrutura de um microserviço de ativo genérico, mostrando o seu nome e suas ações.	128
Listagem 9	–	<i>Log</i> do microserviço do ativo sensor da planta industrial no terminal mostrando sua inicialização, registro e conexão com o <i>transporter</i>	130
Listagem 10	–	Arquivo de configuração e execução, <i>Docker compose</i> , necessario para a implantação do microserviço do ativo sensor da planta industrial.	132
Listagem 11	–	Arquivo de configuração e execução, <i>Docker compose</i> , necessario para a implantação do <i>Portainer</i>	136
Listagem 12	–	Arquivo de configuração e execução, <i>Docker compose</i> , necessario para a implantação do <i>Portainer Edge Agent</i>	136
Listagem 13	–	Configuração do registro e descoberta do microserviço do ativo disponível no <i>ServiceBroker</i> dentro de cada ativo.	139
Listagem 14	–	Configuração do nó <i>OpcUa-Browser</i> para realização da comunicação dos ativos atraves do OPC UA utilizando o <i>Node-RED</i>	145
Listagem 15	–	Configuração do nó <i>http request</i> para realização da comunicação dos ativos atraves da <i>API Gateway</i> utilizando o <i>Node-RED</i>	145
Listagem 16	–	Configuração do nó <i>call</i> para realização da comunicação dos ativos atraves do <i>transporter</i> utilizando o <i>Node-RED</i>	145

Lista de tabelas

Tabela 1	– Matriz de decisão comparativa entre arquiteturas industriais frente aos requisitos da Indústria 4.0.	61
Tabela 2	– Matriz de decisão para escolha da plataforma de orquestração dos ativos para criação de aplicações industriais.	105
Tabela 3	– Padronização dos nomes de arquivos e identificador do AAS para os ativos da planta industrial.	122
Tabela 4	– Padronização dos nomes e ações dos serviços criados com o <i>Framework Molecular</i> para os ativos da planta industrial.	126
Tabela 5	– Padronização dos nomes das imagens dos serviços dos ativos para publicação no <i>DockerHub</i> e posterior criação dos nomes dos <i>Containers</i>	132
Tabela 6	– <i>Service Registry</i> contido dentro do <i>ServiceBroker</i> de cada serviço do ativo disponíveis para interações de consulta	140
Tabela 7	– Visualização tabelada através do terminal, dos microserviços descobertos utilizando o <i>Molecular REPL</i>	142
Tabela 8	– Parâmetros, Identificação dos Ativos, Gráficos de controle e Estado Operacional dos Componentes do Sistema de Controle.	175

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
AAS	<i>Asset Administration Shell</i>
AASX	<i>Asset Administration Shell eXchange</i>
ABB	<i>Asea Brown Boveri</i>
AGV	<i>Automated Guided Vehicle</i>
AML	<i>AutomationML</i>
AMLX	<i>Automation Markup Language eXchange</i>
AMQP	<i>Advanced Message Queuing Protocol</i>
APL	<i>Advanced Physical Layer</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
BL	<i>Business Logic</i>
BSON	<i>Binary JSON</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAEX	<i>Computer Aided Engineering Exchange</i>
CDD	<i>Common Data Dictionary</i>
CF	<i>Capability File</i>
CFF	<i>Common File Format</i>
CoAP	<i>Constrained Application Protocol</i>
COLLADA	<i>Collaborative Design Activity</i>
CPS	<i>Cyber-Physical System</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
CRM	<i>Customer Relationship Management</i>
DAQ	<i>Data Acquisition</i>
DB	<i>Data Base</i>

DCS	<i>Distributed Control Systems</i>
DD	<i>Device Definition</i>
DTM	<i>Device Type Manager</i>
EDD	<i>Electronic Device Description</i>
EDDL	<i>Electronic Device Description Language</i>
ENV	<i>Environment Variables</i>
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
FB	<i>Function Blocks</i>
FBB	<i>Function Block Builder</i>
FBSRT	<i>Function Block Service Runtime</i>
FDCML	<i>Field Device Configuration Markup Language</i>
FDI	<i>Field Device Integration</i>
FDT	<i>Field Device Tool</i>
FDT UE	<i>FDT Unified Environment</i>
GASI	Grupo de Automação e Sistemas Integráveis
GSD	<i>General Station Description</i>
GSDML	<i>General Station Description Markup Language</i>
HART	<i>Highway Addressable Remote Transducer</i>
HMI	<i>Human-Machine Interface</i>
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
HTTPS	<i>Hyper Text Transfer Protocol Secure</i>
I4.0	Indústria 4.0
I/O	<i>Input/Output</i>
IAE	<i>Integral Absolute Error</i>
IAS	<i>Industrial Automation Systems</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>

IDTA	<i>Industrial Digital Twin Association</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i>
IIRA	<i>Industrial Internet Reference Architecture</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IPC	<i>Inter-Process Communication</i>
IPv6	<i>Internet Protocol version 6</i>
ISA	<i>International Society of Automation</i>
IT	<i>Information Technology</i>
ITAE	<i>Integral Time-weighted Absolute Error</i>
IVRA	<i>Industrial Value Chain Reference Architecture</i>
JSON	<i>JavaScript Object Notation</i>
KB	<i>Knowledge Base</i>
KPIs	<i>Key Performance Indicators</i>
LASFA	<i>LAsim Smart FActory</i>
LDS	<i>Local Discovery Server</i>
LDS-ME	<i>Local Discovery Server with Multicast Extension</i>
LLC	<i>Limited Liability Company</i>
M+O	<i>Monitoring and Optimization</i>
MAYA	<i>Multi-disciplinArY integrated simulAtion and forecasting tools</i>
MAPE-K	<i>Monitor Analyze Plan Execute Knowledge</i>
M2M	<i>Machine to Machine</i>
MES	<i>Manufacturing Execution</i>
MOA	<i>Microservice-Oriented Architecture</i>
MOAI	<i>Microservice-Oriented Architecture for Industry 4.0</i>

MOM	<i>Manufacturing Operation Management</i>
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
MSB	<i>Manufacturing Service Bus</i>
MS-UDDI	<i>Manufacturing Service for Universal Description Discovery and Integration</i>
MV	<i>Manipulated Variable</i>
NAMUR	<i>Normenarbeitsgemeinschaft für Mess - und Regeltechnik in der chemischen Industrie</i>
NATS	<i>Neural Autonomic Transport System</i>
NOA	<i>NAMUR Open Architecture</i>
OCF	<i>Open Connectivity Foundation</i>
O-PAS	<i>Open-Process Automation Standard</i>
OPC UA	<i>Open Platform Communications Unified Architecture</i>
openMOS	<i>Open dynamic Manufacturing Operating System</i>
OT	<i>Operational Technology</i>
OWL	<i>Ontology Web Language</i>
OWL-S	<i>Ontology Web Language for Services</i>
PC	<i>Personal Computer</i>
PID4.0	<i>Proportional-Integral-Derivative for Industry 4.0</i>
PIMS	<i>Plant Information Management System</i>
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>
PnP	<i>Plug-and-Play</i>
PnPr	<i>Plug-and-Produce</i>
PPR	<i>Product, Process e Resource</i>
PROFIBUS	<i>Process Field Bus</i>
PROFINET	<i>Process Field Net</i>
PV	<i>Process Variable</i>

RAMI 4.0	<i>Reference Architectural Model for Industrie 4.0</i>
RDF	<i>Resource Description Framework</i>
REPL	<i>Read-Eval-Print-Loop</i>
REST	<i>Representational State Transfer</i>
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
SBDH	<i>Semantic Big Data Historian</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SCM	<i>Supply Chain Management</i>
SDK	<i>Software Development Kit</i>
SDN	<i>Software-Defined Networking</i>
SITAM	<i>Stuttgart IT Architecture for Manufacturing</i>
SM	<i>Submodel</i>
SMS	<i>Smart Manufacturing Services</i>
SOA	<i>Service-Oriented Architecture</i>
SPARQL	<i>Simple Protocol And RDF Query Language</i>
SQWRL	<i>Semantic Query-Enhanced Web Rule Language</i>
SSH	<i>Secure Shell</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TSN	<i>Time Sensitive Networking</i>
UDA	<i>UPnP Device Architecture</i>
UID	<i>User Interface Description</i>
UIP	<i>User Interface Plug-in</i>
UNESP	Universidade Estadual Paulista
UPnP	<i>Universal Plug-and-Play</i>
URLs	<i>Uniform Resource Locators</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
XML	<i>Extensible Markup Language</i>

Sumário

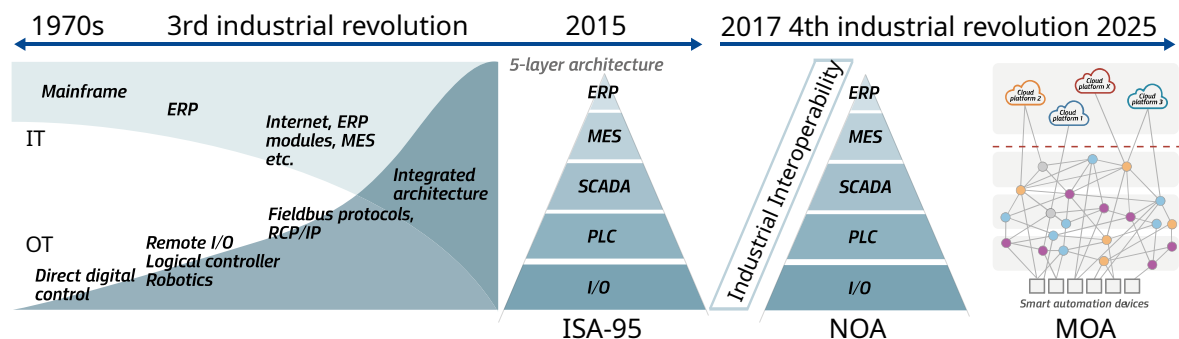
1	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	26
1.1	Tese	30
1.2	Objetivos	30
1.2.1	Gerais	30
1.2.2	Específicos	31
1.3	Resumo da proposta do trabalho	32
1.4	Contribuições	33
1.4.1	Científicas	33
1.4.2	Tecnológicas	34
1.5	Estrutura e conteúdo do trabalho	35
2	EVOLUÇÃO DAS ARQUITETURAS NA INDÚSTRIA 4.0	37
2.1	NAMUR <i>Open Architecture</i> (NOA)	37
2.2	<i>Service-Oriented Architecture</i> (SOA)	40
2.3	<i>Microservice-Oriented Architecture</i> (MOA)	42
2.4	<i>Plug-and-Play Architectures</i> (PnP)	45
2.5	<i>Plug-and-Produce Architectures</i> (PnPr)	50
2.6	Considerações finais	56
3	MODELOS DA INFORMAÇÃO NA INDÚSTRIA DE PROCESSOS	63
3.1	<i>Field Device Integration</i> (FDI)	65
3.2	<i>Process Automation - Device Information Model</i> (PA-DIM)	68
3.3	<i>Automation Markup Language</i> (AML)	71
3.4	<i>Asset Administration Shell</i> (AAS)	73
3.5	Considerações finais	80
4	ARQUITETURA <i>PLUG-AND-PRODUCE</i>	82
4.1	<i>Plug</i>	82
4.1.1	Modelar (1)	85
4.1.2	Agregar (2)	86
4.1.3	Servitizar (3)	88
4.1.4	Instalar (4)	90
4.1.5	Descobrir (5)	93
4.2	<i>Produce</i>	96
4.2.1	Comunicar (6)	107

4.2.2	Selecionar (7)	111
4.2.3	Analisar (8)	112
4.2.4	Compor (9)	113
4.2.5	Gerenciar (10)	114
4.3	Considerações finais	115
5	DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS	117
5.1	<i>Plug</i>	119
5.1.1	Modelar (1)	119
5.1.2	Agregar (2)	122
5.1.3	Servitizar (3)	126
5.1.4	Instalar (4)	130
5.1.5	Descobrir (5)	135
5.2	<i>Produce</i>	143
5.2.1	Comunicar (6)	144
5.2.2	Selecionar (7)	150
5.2.3	Analisar (8)	153
5.2.4	Compor (9)	160
5.2.5	Gerenciar (10)	164
5.3	Considerações finais	176
6	CONCLUSÃO	181
	REFERÊNCIAS	184
	APÊNDICE A – PROCEDIMENTO DE OPERAÇÃO DA PLANTA PILOTO	192

1 Introdução e justificativa

A convergência de *Operational Technology* (OT) e *Information Technology* (IT) no *Industrial Automation Systems* (IAS) não era possível décadas atrás, começando com os *mainframes* e controle digital direto na Figura 1. O desenvolvimento de redes industriais e controladores programáveis possibilitou a convergência OT-IT através de arquiteturas hierárquicas como o modelo de pirâmide ISA-95.

Figura 1 – Convergência de arquiteturas de *Operational Technology* e *Information Technology*.



Fonte: Adaptado de ISA (2021).

A necessidade de interoperabilidade de dados entre camadas verticais foi fornecida através de uma ligação paralela na Figura 1 com o NAMUR *Open Architecture* (NOA). Hoje em dia, maior escalabilidade e integração total podem ser alcançadas usando as *Microservice-Oriented Architectures* (MOA) ou serviços baseado em nuvem (BORANGIU et al., 2019; IBP, 2022; ISA, 2021; SISINNI et al., 2018).

Na NOA o núcleo de controle de processo permanece inalterado, onde a ideia central é uma interface aberta, como OPC UA, integrando camadas do domínio de controle principal e monitoramento de otimização. Um canal de comunicação adicional, Figura 1 (*Industrial Interoperability*), proporciona acesso direto e padronizado a soluções pré-existentes. Essa abordagem amplia a integração tecnológica e facilita a adoção de práticas inovadoras, atendendo às demandas modernas de processos industriais (CAIGNY et al., 2019; KLETTNER et al., 2017; OPC Foundation, 2022a).

Com a Indústria 4.0, empresas utilizam tecnologia para criar sistemas interconectados, processos digitalizados e decisões baseadas em dados. Esses sistemas integram aplicativos e dispositivos que devem comunicar-se de forma adequada. Nesse contexto, a *Service Oriented Architecture* (SOA) facilita o desenvolvimento de serviços modulares, fracamente acoplados, permitindo sua combinação para formar sistemas complexos e eficientes.

A abordagem da SOA reduz a complexidade e aumenta a flexibilidade, facilitando a adaptação às mudanças nas necessidades dos negócios. A SOA permite a integração e interoperabilidade entre camadas para sistemas descentralizados, fornecendo serviços em nuvem para vários dispositivos, *gateways* ou sistemas e padronizando a comunicação entre eles (LEITÃO; COLOMBO; KARNOUSKOS, 2016).

Considerando a aplicação SOA na Indústria 4.0, surge a tendência do uso de micros-serviços. A *Microservice-Oriented Architecture* (MOA) é uma evolução da SOA, dividindo o aplicativo tradicional em serviços menores e independentes, que trabalham em conjunto para manter a funcionalidade original de maneira eficiente (XU; XU; LI, 2018).

Microserviços são serviços mais simples, leves e independentes, com comunicação de rede aprimorada e maior granularidade funcional do que a SOA. Isso aumenta a modularidade e escalabilidade das aplicações, permitindo maior flexibilidade e eficiência no desenvolvimento (FRANCESCO; MALAVOLTA; LAGO, 2017; XIAO; WIJEGUNARATNE; QIANG, 2017).

A MOA também facilita a reutilização, redundância e composição de serviços, o que pode reduzir o tempo e o custo de desenvolvimento. No geral, é um facilitador crítico dos princípios no núcleo da Indústria 4.0. Os principais princípios da Indústria 4.0 são interoperabilidade, virtualização, descentralização, orientação a serviços e modularidade (XU; XU; LI, 2018; MRUGALSKA; WYRWICKA, 2017).

O abundante número de objetos e *softwares* OT-IT na MOA na Figura 1, conectados constantemente para pesquisar e descobrir serviços oferecidos e distribuídos, cria uma ampla gama de serviços. Esse cenário apresenta desafios significativos, exigindo esforços para gerenciar e integrar essas interações de maneira eficiente e organizada em um ambiente dinâmico.

Para enfrentar essa complexidade da MOA, é necessária uma nova arquitetura capaz de implantar e suportar todos esses serviços de forma padronizada em todas as camadas industriais OT-IT. Isso inclui camadas ISA-95 como ERP, MES, I/O, PLC ou SCADA, Figura 1, indo além das camadas de base industrial.

Quando se imagina um ambiente de conexão e desconexão de dispositivos e serviços em redes, um dos termos que surge é o *Plug-and-Play* (*PnP*) que provém da área de IT e em alguns trabalhos na área de OT-IT que utiliza soluções da *web* semântica para descoberta e reconhecimento automático do dispositivo quando conectado ao computador ou à rede (ZORGATI; DJEMAA; AMOR, 2019).

Pode-se genericamente definir *PnP* em IT como um sistema que possibilita que um equipamento seja conectado a uma rede ou dispositivo e funcione imediatamente sem que o usuário precise fazer nada. Esse termo tem algumas variações quando introduzido no contexto industrial como o termo *Plug-and-Produce* (*PnPr*).

Madiwalar, Schneider e Profanter (2019) propõem quatro requerimentos para sistemas *PnPr* de dispositivos. O primeiro é a habilidade como serviço, em que um dispositivo na insta-

lação de fabricação flexível deve oferecer sua habilidade como serviço para outros dispositivos. O segundo é a descoberta automática, permitindo que dispositivos identifiquem outros e seus serviços sem pré-configurações específicas.

O terceiro requerimento proposto por [Madiwalar, Schneider e Profanter \(2019\)](#) é o uso de protocolos de comunicação padrão, garantindo que dispositivos de diferentes fornecedores possam interoperar. Por fim, uma infraestrutura de rede flexível deve ser capaz de acomodar novos dispositivos ou alterações na topologia sem a necessidade de configuração manual de dispositivos de rede, promovendo maior adaptabilidade.

O termo *PnPr* está relacionado a protocolos industriais de rede, ao planejamento dos processos (*Process*) para a construção de produtos (*Product*) e aos recursos (*Resources*) disponíveis. Nesse contexto, a sigla *Product*, *Process* e *Resource* (PPR) simplifica a integração de dispositivos e serviços em ambientes de produção industriais flexíveis e interconectados ([DANNY et al., 2018](#)).

Além de se conectar à rede e ser descoberto, o dispositivo ou serviço pode ser reconfigurado de acordo com o produto em produção. Esse dispositivo colabora com outros serviços para criar uma aplicação que viabiliza a confecção do produto desejado, atendendo às demandas dinâmicas da linha de produção.

Os sistemas de controle industrial apresentam uma complexidade significativa, necessitando de uma variedade de *softwares* voltados para a gestão de processos críticos de produção. O comissionamento desses sistemas envolve a instalação, configuração e integração de inúmeros ativos, sensores, atuadores e controladores, e, atualmente, ainda é um processo predominantemente manual e dispendioso.

Diferentemente do *PnP* da computação, que já conta com uma norma de padronização (*UPnP*), o *PnPr* ainda não estabeleceu procedimentos normativos, ainda em fase de desenvolvimento, o conceito apresenta diversas lacunas para sua concretização, especialmente no que diz respeito à criação e gerenciamento de serviços e tecnologias de comunicação.

Tecnologias de modelagem da informação, ferramentas de configuração e simulação, além da criação de aplicações utilizam padrões legados, exigindo investigações para verificar sua compatibilidade e capacidade de integração no contexto do *PnPr*, essencial para avançar rumo à padronização e adoção em larga escala.

[Jirkovský et al. \(2018\)](#), para resolverem a questão da implementação de alterações em componentes industriais, sugerem a introdução do recurso *PnP* para componentes do *Cyber-Physical System* (CPS). Esse recurso permite que os componentes se auto descrevam, incluindo os dados que produzem, permitindo que sejam perfeitamente integrados a um sistema existente sem a necessidade de etapas adicionais.

[Dai et al. \(2019\)](#) encapsulam cada serviço em uma instância dos *Function Blocks* (FBs) IEC 61499. Durante a execução do sistema, o *PnP* serve para criar, modificar, excluir e invocar

os serviços. Esses FBs IEC 61499 baseados em serviços são publicados e descobertos através do padrão de design de microserviços através da rede e acessados via *API Gateway*.

Profanter et al. (2021) propõem uma arquitetura de sistema genérica *PnPr*, baseada em modelos padronizados de habilidades. Essa abordagem permite sua aplicação em qualquer tipo de componente do sistema, abrangendo tanto *hardware* quanto *software*, promovendo maior flexibilidade, interoperabilidade e eficiência na integração de dispositivos e serviços em ambientes industriais.

Koziolek et al. (2019) mostram como um dispositivo industrial pode melhorar seu tempo de configuração com essa nova funcionalidade *PnPr* independente do fabricante. Sugerem uma arquitetura de referência *OpenPnP* neutra em relação ao fornecedor que pode automatizar em grande parte as tarefas de configuração e integração para comissionamento.

Ye et al. (2020) utilizam um modelo de informação amplo (IEC 63278-1), para realizar o *PnP* de dispositivos de campo industriais, que encapsula ativos de fabricação com recursos de autogerenciamento. Um protótipo deste modelo primeiro criado e, em seguida, usado como instância. Esse modelo de informação permite que um ativo opere de forma independente com base em habilidades de informação e comunicação.

Observou-se nas pesquisas mencionadas nesta seção, uma lacuna na área do *Plug*, relacionada à investigação e definição de um modelo de informação universal. Esse modelo deve ser capaz de suportar a modelagem de dispositivos, equipamentos, *softwares*, serviços ou outros ativos, promovendo a padronização do acesso e organização de dados na aplicação industrial.

Além disso, é essencial estruturar e organizar os dados digitais de ativos reais em aplicações de *Digital Twin*. Essa abordagem conecta o mundo físico ao virtual, otimizando o monitoramento e a simulação de processos industriais. Tecnologias de comunicação padronizadas, como OPC UA e HTTP, desempenham um papel central nesse cenário, facilitando a interoperabilidade.

A interconexão entre camadas industriais por *Ethernet* e a comunicação externa via *internet* têm ampliado a eficiência nos processos. Essa integração também abrange a comunicação de microserviços, adicionando maior agilidade e flexibilidade às operações industriais, alinhando-se às demandas da Indústria 4.0.

Observou-se também nas pesquisas mencionadas nesta seção, lacunas na área do *Produce*, onde grande parte da literatura sobre as arquiteturas concentram-se em aplicações de manufatura, deixando descobertas significativas em arquiteturas voltadas para automação e controle de processos. Essa limitação reflete a necessidade de ampliar o escopo das pesquisas nesse campo.

Além disso, as interfaces de programação apresentadas nos estudos são específicas para processos de produção abordados, não sendo facilmente customizáveis ou flexíveis para atender qualquer aplicação industrial. Essa tarefa de flexibilidade de programação para aplicações dis-

tintas é desafiadora, pois muitos *softwares* de implementação foram desenvolvidos para padrões de OT ou IT separadamente, sem considerar sua convergência nas arquiteturas *PnPr*.

Portanto, é crucial abordar esses desafios na construção de arquiteturas *PnPr*, considerando tanto a flexibilidade quanto a integração entre OT e IT, demonstrando que novas contribuições devem focar em soluções que detalhem esses aspectos e promovam avanços em automação e controle de processos dentro do contexto da Indústria 4.0.

1.1 Tese

Minha tese é que novas plantas e a integração de sistemas legados em ambientes industriais rumo à Indústria 4.0 pode ser viabilizada por meio de uma arquitetura *Plug-and-Produce* orientada a microsserviços, fundamentada no *Asset Administration Shell* (AAS). O problema central abordado é a dificuldade de interoperabilidade semântica e comunicacional entre ativos heterogêneos, especialmente em cenários de plantas legadas. A hipótese sustentada é que, ao modelar a informação dos ativos de forma padronizada e encapsular suas funções em microsserviços interoperáveis, é possível alcançar flexibilidade e escalabilidade sem comprometer os requisitos de tempo de resposta.

Para validar essa hipótese, foi concebida, implementada e testada uma arquitetura *Plug-and-Produce* aplicada a uma planta piloto de controle de processos, envolvendo ativos como sensores, atuadores, controladores e sistemas de supervisão. Os resultados demonstraram a viabilidade da composição automática de ativos industriais e a redução das barreiras de integração em cenários legados. Ao final, foi possível comprovar que a tese proposta resolve o problema identificado, permitindo a modernização gradual de ambientes industriais com interoperabilidade, baixo acoplamento e confiabilidade nos fluxos de controle.

1.2 Objetivos

Antes de detalhar os objetivos específicos, apresenta-se a formulação geral da pesquisa. Essa formulação busca alinhar a tese e a hipótese previamente discutidas com a definição clara das metas a serem atingidas. Assim, estabelece-se a conexão entre os desafios identificados no contexto da Indústria 4.0 e a proposta de uma arquitetura *Plug-and-Produce*, servindo como guia para o desenvolvimento deste trabalho.

1.2.1 Gerais

Esta pesquisa concentrou-se na criação de uma arquitetura de automação na Indústria 4.0 baseada em *PnPr* sistematizada em dois processos, o *Plug* e o *Produce*. Essa arquitetura tem como objetivo integrar e suportar diversos ativos industriais relacionados ao controle de processos, incluindo serviços, não se limitando apenas a dispositivos industriais.

A arquitetura *PnPr* abrangeu todas as etapas que um ativo deve seguir para permitir o processo de *Plug*: modelar, agregar, servitizar, instalar e descobrir. Além disso, abordou as etapas necessárias para a integração e composição com outras aplicações no processo de *Produce*, que inclui as etapas comunicar, selecionar, analisar, compor e gerenciar.

Essa arquitetura permite automatizar a implantação de serviços em ativos distribuídos de maneira granular, bem como a configuração e o comissionamento, que seja modular e de código aberto no contexto de controle de processos industriais. Além disso, visa criar mecanismos que facilitem e padronizem a criação de aplicações de controle de processos no contexto do *PnPr*.

Isso é alcançado através da descoberta de ativos na rede e da utilização de um modelo de informação padronizado, garantindo a identificação e o reconhecimento de suas funcionalidades. Isso possibilita a composição dos ativos de forma monolítica ou distribuída (usando microsserviços) na construção de aplicações para o controle de processos industriais.

1.2.2 Específicos

1. Definir um modelo de informação universal para ativos industriais (dispositivos, serviços, *softwares*), contemplando funcionalidades, manuais, esquemáticos e habilidades, compatível com padrões da Indústria 4.0 (Ex.: OPC UA, IEC 61499).
2. Projetar e validar o processo de *Plug*, abrangendo:
 - a. modelagem e servitização de ativos (físicos e virtuais);
 - b. agregação e disponibilização automatizada via protocolos industriais (OPC UA, HTTP/-REST) e microsserviços;
 - c. mecanismos de descoberta automática em redes heterogêneas.
3. Implementar o processo de *Produce*, incluindo:
 - a. composição de serviços distribuídos para aplicações de controle;
 - b. ferramentas de análise e orquestração baseadas em modelos de informação;
 - c. gerenciamento dinâmico via *dashboard* e integração com *Digital Twins*.
4. Avaliar a arquitetura *PnPr* quanto aos quatro requisitos-chave:
 - a. habilidade como serviço;
 - b. descoberta automática de dispositivos;
 - c. uso de protocolos padrão (Ex.: OPC UA, MQTT);
 - d. infraestrutura de rede flexível.
5. Validar a abordagem em cenários reais ou simulados de automação industrial, comparando com soluções existentes (Ex.: NOA, SOA) em termos de tempo de comissionamento, escalabilidade e interoperabilidade.

1.3 Resumo da proposta do trabalho

A proposta de Arquitetura *PnPr* deste trabalho divide-se em dois processos, sendo o primeiro o *Plug* e o segundo o *Produce*, que visam facilitar o desenvolvimento da arquitetura *PnPr*, deixando claras as etapas para sua criação, independentemente da tecnologia ou linguagem de sua implementação.

O processo do *Plug* é essencial para habilitar ativos industriais em uma arquitetura *PnPr*, permitindo que dispositivos físicos e serviços sejam integrados de forma modular, garantindo interoperabilidade, automação e facilidade de gerenciamento em redes industriais heterogêneas. O processo de *Plug* consiste em cinco etapas:

1. Modelagem: inicialmente, é utilizado um *software* para modelar as informações do ativo alvo, que pode ser um dispositivo físico ou um serviço. Essas informações são estruturadas de forma a abranger diversos tipos de ativos e seus respectivos modelos de informação;
2. Agregação: o modelo de informação gerado é disponibilizado através de um servidor implantado no dispositivo hospedeiro, utilizando diversos meios de comunicação para facilitar a interoperabilidade com outros ativos. Essa etapa é essencial para garantir que o ativo possa se comunicar com outros dispositivos da rede, atendendo aos requisitos de compatibilidade e padronização na infraestrutura industrial;
3. Servitização: a parte lógica do ativo é desenvolvida utilizando *Framework* de desenvolvimento de serviços, criando ações e configurações padrão para o ativo. Isso inclui a criação de microserviços adaptados tanto para áreas de IT e OT. Esses microserviços permitem que os ativos se integrem facilmente em arquiteturas complexas, aumentando a modularidade e escalabilidade;
4. Instalação: o dispositivo físico é conectado e configurado, enquanto o modelo de informação, servidor, comunicação e serviços são implementados de forma modular e automatizada. Isso é realizado por meio de *containers* que encapsulam os microserviços, facilitando a gestão e a disponibilização dos ativos;
5. Descoberta: o ativo é integrado a sistemas maiores, anunciando sua presença na infraestrutura de comunicação comum. Métodos de descoberta de rede são utilizados para que outros ativos ou aplicativos detectem sua presença. O gerenciamento e monitoramento dos ativos encapsulados também são realizados nesta etapa.

O processo de *Produce* visa facilitar a integração e composição de ativos industriais, permitindo a criação rápida e eficiente de aplicações de automação em ambientes industriais. Busca-se otimizar o uso dos recursos disponíveis e padronizar a interação entre dispositivos. O processo de *Produce* consiste em cinco etapas:

1. Comunicação: os compositores de serviços abrem canais de comunicação para criar aplicações na automação, utilizando linguagens e protocolos compatíveis com os ativos e modelos de informação da arquitetura *PnPr*, garantindo a interoperabilidade e a consistência na troca de informações entre os sistemas.
2. Seleção: os compositores realizam uma requisição de *scanner* para detectar todos os ativos na rede, recebendo informações estruturadas conforme o modelo de informação. A partir dessa listagem, os ativos desejados são selecionados para a composição da aplicação.
3. Análise: o compositor analisa a identidade, funcionalidades e requisitos dos dispositivos, interpretando suas descrições e configurando-os conforme as necessidades de produção. Os dados do administrador do ativo permitem a representação do mundo físico e da informação, habilitando a criação de *Digital Twins* e análises de desempenho.
4. Composição: os ativos são dispostos em uma sequência de execução, como em uma orquestra, para compor uma aplicação de controle de processo ou automação. A escolha da ordem de execução dos ativos é realizada para garantir o funcionamento correto da aplicação.
5. Gerenciamento: após a definição da ordem de execução, o compositor de serviços é compilado ou executado, concentrando toda a lógica de programação em um único dispositivo ou distribuindo-a pela rede. Durante e após a execução, os dados são monitorados através de um *dashboard* para correlacioná-los com os recursos disponíveis e o produto almejado.

1.4 Contribuições

As contribuições deste trabalho podem ser organizadas em dois eixos complementares. O primeiro refere-se às contribuições científicas, relacionadas à produção de conhecimento, à fundamentação teórica e à proposição de uma arquitetura *Plug-and-Produce* voltada à Indústria 4.0. O segundo contempla as contribuições tecnológicas, materializadas na implementação prática da arquitetura e no desenvolvimento de soluções aplicadas.

1.4.1 Científicas

A arquitetura *PnPr* pode ser um modelo de referência para profissionais que trabalham na implementação de aplicações OT-IT não só no controle de processo, mas também em diversos setores da indústria de automação, acelerando os procedimentos de desenvolvimento, gerenciamento, comissionamento em inúmeros sistemas de controle e instalações. Tendo como principais contribuições:

- a) desenvolvimento de uma arquitetura *PnPr* para o comissionamento, implantação (*Plug*) automatizada e gerenciamento de um ou mais serviços relacionados ao ativo,

permitindo a integração ágil e eficiente de dispositivos e sistemas. Essa arquitetura visa reduzir significativamente o tempo e os custos associados a configurações manuais em ambientes industriais complexos;

- b) investigação de modelos de informação que contemplem os requisitos de aplicações da automação e controle na Indústria 4.0, desenvolvendo este modelo para os ativos industriais que contemplem as funcionalidades, manuais, esquemáticos, dos dispositivos e habilidades dos serviços;
- c) agregar o modelo de informação através de diversos protocolos de comunicação industrial, além dos protocolos de microsserviços, utilizando o registro e descoberta dos microsserviços no cenário da indústria de processos, sendo uma contribuição para a comunicação da Indústria 4.0;
- d) verificação de ferramentas que suportem a composição de serviços para a criação de aplicações (*Produce*) nas indústrias de processo que sejam compatíveis com os principais protocolos de comunicação industrial e com o modelo da informação desenvolvido para suportar a arquitetura *PnPr*;
- e) validação da arquitetura *PnPr* através da verificação dos quatro requerimentos do *PnPr* mencionados na introdução deste trabalho: habilidade como serviço; descoberta automática de dispositivos; protocolo de comunicação padrão e infraestrutura de rede flexível.

1.4.2 Tecnológicas

Este trabalho não se restringiu à aplicação direta das tecnologias estudadas, mas envolveu contribuições tecnológicas significativas, fundamentais para a implementação e validação da arquitetura proposta. Entre as principais contribuições destacam-se:

- a) modelagem da informação: criação de modelos da informação para sensores, controladores, atuadores e ativos industriais em geral, alinhados à especificação do *Asset Administration Shell* (AAS), garantindo interoperabilidade semântica;
- b) implementação da arquitetura: adaptação e aplicação da arquitetura *Plug-and-Produce* à planta piloto de controle de processos, abrangendo tanques, bombas, válvulas, inversores e sensores;
- c) desenvolvimento de microsserviços: concepção e programação de todos os serviços necessários para representar ativos industriais (sensores, atuadores e controladores PID), assegurando a comunicação bidirecional entre planta física e ambiente digital;
- d) aplicações de automação: implementação de aplicações de *Industrial Automation System* (IAS) em malha fechada, utilizadas para validar a arquitetura e demonstrar sua flexibilidade de uso;

- e) integração prática e comissionamento: participação ativa no comissionamento da planta experimental, instalação de dispositivos, incluindo configuração de controladores, integração de protocolos industriais e validação dos fluxos de dados em ambiente real.

Essas contribuições evidenciam a efetiva participação em todas as etapas do trabalho, desde a concepção conceitual até a implementação prática e validação experimental, atribuindo caráter aplicado e original à pesquisa.

1.5 Estrutura e conteúdo do trabalho

Este trabalho possui mais 6 capítulos, além deste Capítulo 1 que contém a introdução, relevância e justificativa, mostrando as arquiteturas recentes relacionadas com o contexto industrial e a inclinação das recentes pesquisas para uma nova arquitetura *PnP*, o objetivo, o resumo da proposta desta pesquisa e suas respectivas contribuições.

No Capítulo 2, *Evolução das Arquiteturas na Indústria 4.0*, é apresentado o estado da arte sobre o *Plug-and-Produce*, detalhando o conhecimento, as técnicas, os métodos e as abordagens mais recentes e relevantes. Esse capítulo busca explorar os avanços que permitem entender o impacto dessa abordagem na automação industrial contemporânea.

Foi realizada uma revisão sistemática e abrangente da literatura existente, envolvendo a análise de artigos científicos, teses, dissertações e trabalhos publicados em conferências e revistas acadêmicas. Esse levantamento identificou tendências, lacunas e contribuições significativas sobre o tema, fornecendo uma base sólida para as discussões e os desenvolvimentos apresentados nos capítulos subsequentes.

No Capítulo 3, *Modelos da informação na indústria de processos*, contém uma revisão dos modelos de informação industriais, que são uma representação estruturada e organizada dos dados e informações relevantes dentro de um determinado domínio, sendo uma forma de descrever e organizar o conhecimento para facilitar o armazenamento, a recuperação, a manipulação e a compreensão das informações.

Um modelo de informação pode ser construído de várias maneiras, dependendo do contexto e dos requisitos específicos. Facilitam a comunicação, a análise e o desenvolvimento de sistemas de informação eficientes e precisos. Cada modelo tem suas características e usos específicos, e a escolha do modelo adequado para o problema da pesquisa é apresentado na síntese do capítulo.

No Capítulo 4, *Arquitetura Plug-and-Produce*, é o principal capítulo desta pesquisa, tem-se a descrição da Arquitetura desta tese de doutorado, ilustrando como será arquitetado cada componente do sistema *PnP*, como *hardwares*, *softwares*, comunicação e aplicação.

Além da descrição dos serviços desenvolvidos tanto para os ativos quanto para a parte de

comunicação. O capítulo é dividido em dois processos: *Plug* com as etapas de modelar, agregar, servitizar, instalar e descobrir, e o processo de *Produce* com as etapas de comunicar, selecionar, analisar, compor e gerenciar.

No Capítulo 5, Desenvolvimento e resultados, mostra-se o desenvolvimento das etapas do processo de *Plug* e o desenvolvimento das etapas do processo de *Produce*, sendo apresentado os resultados das implementações, discutindo os pontos positivos e as dificuldades encontradas em cada etapa do processo de desenvolvimento.

No Capítulo 6, Conclusão, são abordados de forma breve todos os capítulos do trabalho, estabelecendo conexões entre eles para apresentar as conclusões finais. Por fim, são listadas todas as referências utilizadas, destacando os fundamentos teóricos e práticos que embasaram o desenvolvimento deste estudo.

6 Conclusão

A evolução das arquiteturas de controle de processos no contexto da Indústria 4.0 reflete a busca contínua por maior integração e convergência entre as Tecnologias da Informação e Tecnologias Operacionais. Cada abordagem discutida nesta pesquisa como NOA, SOA, MOA e *PnPr* apresenta características únicas que atendem a necessidades específicas das indústrias, ao mesmo tempo em que enfrentam desafios significativos que limitam sua adoção e implementação prática.

A arquitetura NOA destacou-se pela capacidade de integrar dispositivos legados por meio de canais de comunicação paralelos, mas sua limitação ao modelo de informação NE 131 reduz sua aplicabilidade em cenários mais complexos. Por outro lado, a SOA promoveu a flexibilidade e a reutilização de serviços, embora enfrente desafios de governança e desempenho, especialmente em ambientes industriais tradicionais e altamente dinâmicos.

A introdução da MOA trouxe avanços consideráveis na modularidade e escalabilidade, aproveitando o conceito de microsserviços. Contudo, a complexidade de gerenciar inúmeros microsserviços e a ausência de padronização dificultam sua aplicação em larga escala. Por sua vez, a arquitetura *PnPr* emerge como uma alternativa promissora para resolver essas limitações, com foco na integração *PnPr* de ativos industriais. No entanto, ainda carece de padronização robusta e investigações mais amplas sobre suas aplicações em controle de processos.

Embora as arquiteturas exploradas apresentem desafios de implementação, evidenciam um progresso significativo rumo à transformação digital nas indústrias. A convergência de IT e OT é fundamental para alcançar os objetivos da Indústria 4.0, promovendo interoperabilidade, modularidade e flexibilidade. Estudos futuros devem se concentrar na superação das lacunas existentes, especialmente no desenvolvimento de padrões universais e na adaptação de dispositivos e serviços para ambientes industriais diversos.

Essa pesquisa contribui para a compreensão das capacidades e limitações das arquiteturas de controle de processos na Indústria 4.0, oferecendo uma base para pesquisas e implementações futuras. O sucesso na adoção dessas tecnologias depende não apenas de avanços técnicos, mas também de esforços colaborativos entre academia, indústria e órgãos reguladores para consolidar práticas e padrões inovadores.

A evolução das arquiteturas industriais na Indústria 4.0 demonstra uma clara transformação tecnológica, desde a ISA-95 até abordagens modernas como NOA e *PnPr*. Deduz-se que esta transição reflete tanto o avanço tecnológico quanto a necessidade de integrar dispositivos legados com tecnologias emergentes. A análise dessas arquiteturas evidencia como cada uma contribuiu para soluções mais flexíveis e adaptáveis à manufatura moderna e ao controle de processos.

Conclui-se que lacunas significativas persistem, especialmente na ausência de modelos de informação abrangentes que contemplem dispositivos, serviços e ativos em todas as camadas industriais. Nesse contexto, a arquitetura *PnPr* surge como promissora para criar sistemas autossuficientes e flexíveis. Percebe-se seu potencial particularmente no controle de processos, embora ainda esteja em fase de pesquisa e enfrentando desafios de padronização.

Esta pesquisa buscou modelos de informação padronizados essenciais para a evolução industrial, investigando abordagens desde tecnologias como FDI até iniciativas mais abrangentes como AML e AAS. Entende-se que enquanto soluções como FDI e PA-DIM resolvem problemas específicos, não cobrem integralmente as necessidades da Indústria 4.0. O AAS emerge como solução mais completa, capaz de representar ativos físicos e virtuais.

Propôs-se o AAS como base para uma arquitetura *PnPr* que atenda às camadas inferiores e superiores da ISA-95. Compreende-se que a adoção de microsserviços e protocolos abertos garante transparência e escalabilidade necessárias. A pesquisa demonstrou que a escolha de um modelo de informação adequado é crucial para o sucesso da integração vertical e horizontal nas indústrias modernas. A modularidade e descentralização são princípios fundamentais, permitindo que ativos sejam representados de forma padronizada.

Apresentou-se uma arquitetura *PnPr* dividida em duas partes principais: *Plug* e *Produce*. Verifica-se que a principal contribuição técnica está na proposição de uma arquitetura modular que combina microsserviços, contêineres Docker, AAS e *Framework* de TI adaptados para automação. A integração de diferentes tecnologias demonstrou viabilidade de implementar sistemas que atendam tanto à camada OT quanto à IT.

Os resultados práticos validaram a eficácia da arquitetura *PnPr* proposta, comprovando sua capacidade de reduzir tempo de implantação e simplificar reconfiguração de sistemas. Contudo, identificaram-se limitações como sobrecarga de tráfego caso o AAS seja trafegado em sua totalidade sendo sugerido apenas parte dele, além da curva de aprendizado.

Esta pesquisa demonstrou a viabilidade de implementação da arquitetura *PnPr* em aplicações industriais, como sistemas de controle em malha fechada usando tecnologias modernas como *Node-RED*, OPC UA, microsserviços e AAS. Observa-se que o sistema desenvolvido mostrou facilidade no comissionamento e gerenciamento de ativos, além de alta capacidade de adaptação, permitindo controle dinâmico e monitoramento contínuo dos processos industriais.

Trabalhos futuros devem concentrar-se na utilização do AAS para criação de gêmeos digitais usando a arquitetura *PnPr* como base. Além de se nortearem no O-PAS que surge como um agregador dessas arquiteturas, combinando seus princípios em um *framework* unificado baseado em padrões abertos.

A capacidade de interoperabilidade e portabilidade do O-PAS o posiciona como um candidato à padronização industrial, promovendo a convergência OT-IT e facilitando a integração de sistemas heterogêneos. A pesquisa conclui que o O-PAS representa um passo significativo

em direção à criação de uma infraestrutura digital unificada para a Indústria 4.0, alinhando-se aos princípios fundamentais de modularidade, interoperabilidade e descentralização.

Referências

ARAI, T. et al. Agile Assembly System by “Plug and Produce”. *CIRP Annals*, v. 49, n. 1, p. 1–4, jan. 2000. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607628832>>. Citado na página 50.

AutomationML. *Best Practice Recommendations: AutomationML Container*. 2017. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <https://www.automationml.org/wp-content/uploads/2021/06/BPR-008E_BPR_Container_V1.0.0.zip>. Citado na página 72.

AutomationML. *Interrelation of Asset Administration Shell and AutomationML*. 2021. Acesso em: 07 abr. 2025. Versão 2.0. Disponível em: <<https://www.automationml.org/o.red.c/dateien.html?cid=742>>. Citado na página 74.

AutomationML. *What is AutomationML?* 2022. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://www.automationml.org/about-automationml/automationml/>>. Citado 3 vezes nas páginas 63, 71 e 72.

BÄR, M. A.; COLOMBO, A. W. Service Composition Solutions Based on an Industry 4.0-Compliant Asset Administration Shell Service Collector. In: *IET Conference Proceedings*. Cambridge, UK: Institution of Engineering and Technology, 2024. p. 1–9. Citado na página 99.

BARTUSIAK, R. D. et al. Open Process Automation: A standards-based, open, secure, interoperable process control architecture. *Control Engineering Practice*, v. 121, n. 1, p. 105034, abr. 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0967066121002902>>. Citado 2 vezes nas páginas 56 e 59.

BELYAEV, A. *Specification “I4.0-Language Demonstrator” Version 2.0*. 2019. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/334429277>>. Citado na página 76.

BIGHETI, J. A.; FERNANDES, M. M.; GODOY, E. P. Control as a Service: A Microservice Approach to Industry 4.0. In: *2019 II Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT*. Naples, Italy: IEEE, 2019. p. 438–443. Citado na página 129.

BLEVINS, T.; NIXON, M.; WOJSZNIS, W. PID control using wireless measurements. In: *2014 American Control Conference*. Portland, OR, USA: IEEE, 2014. p. 790–795. ISBN 9781479932726. Citado na página 130.

BORANGIU, T. et al. Digital transformation of manufacturing through cloud services and resource virtualization. *Computers in Industry*, v. 108, p. 150–162, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361519300107>>. Citado na página 26.

CAIGNY, J. et al. NOA – Von Demonstratoren zu Pilotanwendungen. *atp magazin*, v. 61, n. 1–2, p. 44–55, fev. 2019. Disponível em: <https://ojs.di-verlag.de/index.php/atp_edition/article/view/2403>. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 37.

- CIAVOTTA, M. et al. A microservice-based middleware for the digital factory. *Procedia manufacturing*, Elsevier, v. 11, p. 931–938, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.197>>. Citado na página 43.
- CONTRERAS, J. D.; GARCIA, J. I.; PASTRANA, J. D. D. Development of Industry 4.0 Applications. *International Journal of Online and Biomedical Engineering*, v. 13, n. 10, p. 30–47, nov. 2017. Disponível em: <<https://online-journals.org/index.php/i-joe/article/view/7331>>. Citado na página 77.
- DAI, W. et al. Semantic Integration of Plug-and-Play Software Components for Industrial Edges Based on Microservices. *IEEE Access*, v. 7, p. 125882–125892, 2019. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8816079>>. Citado 5 vezes nas páginas 28, 46, 47, 48 e 49.
- DAI, W. et al. Automatic Information Model Generation for Industrial Edge Applications Based on IEC 61499 and OPC UA. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 18, n. 12, p. 8634–8645, 2022. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9838444>>. Citado na página 49.
- DANNY, P. et al. An Event-Based AutomationML Model for the Process Execution of Plug-and-Produce Assembly Systems. In: *Proceedings of the IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. Porto, Portugal: IEEE, 2018. p. 49–54. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8471955>>. Citado na página 28.
- DIN. *Standards – Deutsches Institut für Normung e.V.* 2023. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://www.din.de/en/innovation-and-research/industry-4.0/standards>>. Citado na página 63.
- Docker. *Documentation*. 2025. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://docs.docker.com/>>. Citado na página 90.
- DRATH, R.; RENTSCHLER, M.; HOFFMEISTER, M. The automationml component description in the context of the asset administration shell. In: IEEE. *2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. 2019. p. 1278–1281. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8869214>>. Citado 3 vezes nas páginas 71, 72 e 74.
- ECLASS. *The Global Reference Data Standard*. 2023. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://eclass.eu/>>. Citado na página 73.
- ECLASS. *Basic & Advanced Content Suche*. 2025. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://eclass.eu/eclass-standard/content-suche>>. Citado na página 120.
- Eclipse 4diac. *Open Source for Industrial Automation Systems*. 2024. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://eclipse.dev/4diac/>>. Citado na página 103.
- Eclipse Foundation. *AASX Package Explorer and Server*. 2022. Acesso em: 15 abr. 2025. Disponível em: <<https://projects.eclipse.org/projects/dt.aaspe>>. Citado na página 85.
- Eclipse Foundation. *Digital Twin*. 2025. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://projects.eclipse.org/projects/dt>>. Citado na página 85.

- ENCHEV, G.; DJAGAROV, N.; GROZDEV, Z. Plug and Play System for Monitoring of Electrical and Non-Electrical Data. In: IEEE. *Proceedings of the 20th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA)*. 2018. p. 1–5. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8447147>>. Citado na página 64.
- FieldComm Group. *Digital transformation through field device integration*. 2017. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://fieldcommgroup.org>>. Citado 4 vezes nas páginas 63, 65, 66 e 67.
- FieldComm Group. *Process Automation Device Information Model*. 2019. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://www.fieldcommgroup.org/>>. Citado 2 vezes nas páginas 68 e 69.
- FOWLER, M.; LEWIS, J. *Microservices*. 2014. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://martinfowler.com/articles/microservices.html>>. Citado na página 42.
- FRANCESCO, P. D.; MALAVOLTA, I.; LAGO, P. Research on Architecting Microservices: Trends, Focus, and Potential for Industrial Adoption. In: IEEE. *Proceedings of the IEEE International Conference on Software Architecture (ICSA)*. 2017. p. 21–30. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7930199>>. Citado na página 27.
- FULLEN, M. *AASX Package Explorer*. 2025. Acesso em: 15 abr. 2025. Disponível em: <<https://github.com/admin-shell-io/aasx-package-explorer>>. Citado 2 vezes nas páginas 85 e 86.
- Grafana. *The open observability platform*. 2021. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://grafana.com/>>. Citado 2 vezes nas páginas 106 e 107.
- GRÜNER, S.; TROSTEN, A. A Cloud-Native Software Architecture of NAMUR Open Architecture Verification of Request using OPC UA PubSub Actions over MQTT. In: *2023 IEEE 28th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. Sinaia, Romania: IEEE, 2023. p. 1–8. Citado na página 40.
- IBP. *Guia de Convergência OT–IT*. 2022. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/2022/05/convergencia-ot-it.pdf>>. Citado na página 26.
- IDTA. *Provision of Simulation Models*. 2022. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <https://industrialdigitaltwin.org/wp-content/uploads/2023/01/IDTA-02005-1-0_Submodel_ProvisionOfSimulationModels.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas 78 e 79.
- IDTA. *Working together to promote the Digital Twin*. 2025. Acesso em: 15 abr. 2025. Disponível em: <<https://industrialdigitaltwin.org/en/>>. Citado 2 vezes nas páginas 85 e 86.
- IEC. *61499-1:2012 | Function blocks – Part 1: Architecture*. 2012. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://webstore.iec.ch/publication/5506>>. Citado na página 100.
- IEC. *61131-3:2013 | Programmable controllers – Part 3: Programming languages*. 2013. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://webstore.iec.ch/publication/4552>>. Citado na página 100.

IEC. 62714-1:2018 – *Engineering Data Exchange Format for Use in Industrial Automation Systems Engineering – Automation Markup Language – Part 1: Architecture and General Requirements*. 2018. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://webstore.iec.ch/publication/32339>>. Citado na página 72.

INNERBICHLER, J. et al. NIMBLE Collaborative Platform: Microservice Architectural Approach to Federated IoT. In: *Proceedings of the 2017 Global Internet of Things Summit (GloTS 2017)*. Geneva, Switzerland: IEEE, 2017. p. 1–6. ISBN 978-1-5090-5873-0. Citado na página 43.

Intel. *Two Decades of “Plug and Play”: How USB Became the Most Successful Interface in the History of Computing*. 2014. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/articles/usb-two-decades-of-plug-and-play-article.pdf>>. Citado na página 45.

ISA. *Beyond the Pyramid: Using ISA95 for Industry 4.0 and Smart Manufacturing*. 2021. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://www.isa.org/intech-home/2021/october-2021/features/beyond-the-pyramid-using-isa95-for-industry-4-0-an>>. Citado na página 26.

ISO/IEC/IEEE. *Systems and Software Engineering – Vocabulary*. Piscataway, NJ, 2017. Citado na página 60.

JHUNJHUNWALA, P. et al. Interoperability in Software-Defined Process Automation Using the Open Process Automation Standard and IEC 61499: Adapter Connections of IEC 61499 and OPAS Enable Plug-and-Play Integration. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, v. 18, n. 1, p. 12–24, 2024. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/10293225>>. Citado na página 100.

JIRKOVSKÝ, V. et al. Toward Plug&Play Cyber-Physical System Components. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 14, n. 6, p. 2803–2811, 2018. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8240615>>. Citado 4 vezes nas páginas 28, 46, 47 e 49.

KAYA, F. et al. Asset Administration Shell Tool Comparison: A Case Study with Real Digital Twins Used in Petrochemical Industry. *Sensors*, v. 25, n. 7, p. 1978, 2025. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/25/7/1978>>. Citado na página 78.

KLETTNER, C. et al. NOA – Namur Open Architecture. *atp magazin*, v. 59, n. 1–2, p. 20–37, fev. 2017. Disponível em: <https://ojs.di-verlag.de/index.php/atp_edition/article/view/620>. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 38.

KOZIOLEK, H. et al. OpenPnP: A Plug-and-Produce Architecture for the Industrial Internet of Things. In: IEEE/ACM. *Proceedings of the 41st International Conference on Software Engineering: Software Engineering in Practice (ICSE-SEIP)*. Montreal, QC, Canada, 2019. p. 131–140. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8804416>>. Citado 4 vezes nas páginas 29, 50, 51 e 52.

LARRINAGA, F. et al. Node-RED Workflow Manager for Edge Service Orchestration. In: *2022 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium (NOMS 2022)*. Budapest, Hungary: IEEE, 2022. p. 1–6. Citado na página 105.

- LEITÃO, P.; COLOMBO, A. W.; KARNOUSKOS, S. Industrial Automation Based on Cyber-Physical Systems Technologies: Prototype Implementations and Challenges. *Computers in Industry*, v. 81, p. 11–25, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016636151500123X>>. Citado 3 vezes nas páginas 27, 40 e 41.
- MADIWALAR, B.; SCHNEIDER, B.; PROFANTER, S. Plug and Produce for Industry 4.0 using Software-defined Networking and OPC UA. In: *Proc. IEEE Int. Conf. Emerging Technol. Factory Autom. (ETFA)*. Zaragoza, Spain: IEEE, 2019. p. 126–133. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- MAYA. *Multi-disciplinArY Integrated Simulation and Forecasting Tools*. 2022. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://cordis.europa.eu/project/id/678556>>. Citado na página 43.
- MINY, T. et al. Overview and Comparison of Asset Information Model Standards. *IEEE Access*, v. 11, p. 99189–99221, 2023. Citado na página 64.
- Moleculer. *Broker*. 2025. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://moleculer.services/docs/0.13/broker.html>>. Citado 2 vezes nas páginas 93 e 94.
- Moleculer. *Documentation (v0.13)*. 2025. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://moleculer.services/docs/0.13/>>. Citado na página 88.
- Moleculer. *Registry & Discovery*. 2025. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://moleculer.services/docs/0.14/registry.html>>. Citado na página 93.
- Moleculer. *Services*. 2025. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://moleculer.services/docs/0.13/services.html>>. Citado 2 vezes nas páginas 93 e 94.
- MRUGALSKA, B.; WYRWICKA, M. K. Towards lean production in industry 4.0. *Procedia engineering*, Elsevier, v. 182, p. 466–473, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.135>>. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 59.
- NAMUR. *NE 131 has been revised*. 2017. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://www.namur.net/en/publications/news-archive/ne-131-has-been-revised.html>>. Citado na página 68.
- NAMUR. *NAMUR Open Architecture*. 2018. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://www.namur.net/en/focus-topics/namur-open-architecture/>>. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 39.
- NAMUR. *NE 176 - NOA Information Model*. 2021. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://www.namur.net/en/publications/news-archive/ne-176-ist-neu-erschienen.html>>. Citado na página 38.
- NATS.IO. *FAQ — How many clients can connect simultaneously?* 2025. Acesso em: 22 ago. 2025. Disponível em: <<https://docs.nats.io/reference/faq>>. Citado na página 109.
- NIMBLE. *The Novel, Federated Approach for Industry B2B Platforms*. 2018. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://www.nimble-project.org/>>. Citado na página 43.
- Node-RED. *Creating Nodes*. 2024. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://nodered.org/docs/creating-nodes/>>. Citado 3 vezes nas páginas 104, 111 e 113.

NodeOPCUA. *Documentation*. 2025. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://node-opcua.github.io/>>. Citado na página 87.

NodeOPCUA. *OPCUAServerOptions.maxConnectionsPerEndpoint – API Documentation (v2.32.0)*. 2025. Acesso em: 22 ago. 2025. Disponível em: <https://node-opcua.github.io/api_doc/2.32.0/interfaces/node_opcua_server.opcuaserveroptions.html#maxconnectionsperendpoint>. Citado na página 109.

NSIAH, K. A.; SCHAPPACHER, M.; SIKORA, A. Dynamic Mapping of EDDL Device Descriptions to OPC UA. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 870, n. 1, p. 012006, set. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/1742-6596/870/1/012006>>. Citado 2 vezes nas páginas 64 e 65.

OCHOA, W. et al. Enhancing flexibility in industry 4.0 workflows: A context-aware component for dynamic service orchestration. *Procedia Computer Science*, v. 232, p. 1503–1512, 2024. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050924001433>>. Citado na página 99.

OPC Foundation. *OPC Unified Architecture Specification: Part 4 - Services*. 2022. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://reference.opcfoundation.org/Core/Part4/v105/docs/>>. Citado na página 26.

OPC Foundation. *Process Automation Devices - PA-DIM*. 2022. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://opcfoundation.org/markets-collaboration/pa-dim/>>. Citado 2 vezes nas páginas 63 e 68.

Open Connectivity Foundation. *UPnP Standards & Architecture*. 2022. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://openconnectivity.org/developer/specifications/upnp-resources/upnp/>>. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 46.

OpenPLC. *Open-source PLC Software*. 2022. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://openplcproject.com/>>. Citado 2 vezes nas páginas 101 e 102.

Plattform Industrie 4.0. *Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI4.0) - An Introduction*. 2018. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/rami40-an-introduction.html>>. Citado na página 77.

Plattform Industrie 4.0. *Submodel Templates of the Asset Administration Shell - Generic Frame for Technical Data for Industrial Equipment in Manufacturing Version 1.1*. 2020. Acesso em: 19 jan. 2025. Disponível em: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/Submodel_templates-Asset_Administration_Shell-Technical_Data.html>. Citado na página 119.

Plattform Industrie 4.0. *Details of the Asset Administration Shell - Part 1*. 2023. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/Details_of_the_Asset_Administration_Shell_Part1_V3.html>. Citado 6 vezes nas páginas 63, 73, 74, 75, 77 e 119.

Plattform Industrie 4.0. *Functional View of the Asset Administration Shell in an Industrie 4.0 System Environment*. 2023. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Functional-View.html>>. Citado 2 vezes nas páginas 75 e 76.

- PONTAROLLI, R. P. et al. Microservice-Oriented Architecture for Industry 4.0. *Eng*, MDPI, v. 4, n. 2, p. 1179–1197, 2023. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2673-4117/4/2/69>>. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 117.
- Portainer. *Documentation*. 2025. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://docs.portainer.io/>>. Citado na página 91.
- PROFANTER, S. et al. A Generic Plug & Produce System Composed of Semantic OPC UA Skills. *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, v. 2, p. 128–141, 2021. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9338411>>. Citado 3 vezes nas páginas 29, 53 e 54.
- REPRESA, J. G. et al. Investigation of microservice-based workflow management solutions for industrial automation. *Applied Sciences*, v. 13, n. 3, p. 1835, 2023. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/13/3/1835>>. Citado na página 99.
- SINGH, J. et al. Digitalization of the Components of a Mini Factory with the Implementation of RAMI 4.0 Asset Administration Shell. In: *Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS 2024)*. St. Louis, MO, USA: IEEE, 2024. p. 1–8. ISBN 979-8-3503-6301-2. Citado na página 78.
- SISINNI, E. et al. Industrial Internet of Things: Challenges, Opportunities, and Directions. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 14, n. 11, p. 4724–4734, 2018. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8424566>>. Citado na página 26.
- SMITH, E. *Plug and Play History: The Design Decision That Made PCs Complicated*. 2021. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://tedium.co/2021/08/04/plug-and-play-peripheral-history/>>. Citado na página 45.
- SONG, J. et al. Improving pid control with unreliable communications. In: *ISA Expo Technical Conference*. Houston, TX: ISA, 2006. p. 105–116. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Aloysius-Mok/publication/266403691_Improving_PID_Control_with_Unreliable_Communications/links/555948e308ae6943a876bfa1/Improving-PID-Control-with-Unreliable-Communications.pdf>. Citado na página 130.
- STOLZE, M. et al. Realizing Automated Production Planning via Proactive AAS and Business Process Models. In: *Proceedings of the 29th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2024)*. Padova, Italy: IEEE, 2024. p. 1–8. Citado na página 76.
- WIESMAYR, B.; ZOITL, A.; HÄSTBACKA, D. Modeling Service Choreographies and Collaborative Tasks for Autonomous Mixed-Fleet Systems. In: *Proceedings of the ACM/IEEE 27th International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems*. Linz, Austria: Association for Computing Machinery, 2024. p. 234–244. ISBN 979-8-4007-0504-5. Citado na página 99.
- XIAO, Z.; WIJEGUNARATNE, I.; QIANG, X. Reflections on SOA and Microservices. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Enterprise Systems (ES 2016)*. Melbourne, Australia: IEEE, 2017. p. 60–67. ISBN 978-0-7695-5984-1. Citado 3 vezes nas páginas 27, 40 e 42.

XU, L. D.; XU, E. L.; LI, L. Industry 4.0: State of the Art and Future Trends. *International Journal of Production Research*, v. 56, n. 8, p. 2941–2962, 2018. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00207543.2018.1444806>>. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 59.

YE, X. et al. Toward the Plug-and-Produce Capability for Industry 4.0: An Asset Administration Shell Approach. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, v. 14, n. 4, p. 146–157, dez. 2020. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9170653>>. Citado 4 vezes nas páginas 29, 54, 55 e 56.

ZHANG, J. et al. Digital twin and the asset administration shell: An Analysis of the Three Types of AASs and their Feasibility for Digital Twin Engineering. *Software and Systems Modeling*, p. 1–23, 2025. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10270-024-01157-1>>. Citado na página 78.

ZHAO, Y. et al. An Architecture of a NOA-Based Secure Internet of Things Edge Gateway. In: *2025 IEEE 8th International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*. Emden, Germany: IEEE, 2025. p. 1–6. Citado na página 40.

ZORGATI, H.; DJEMAA, R. B.; AMOR, I. A. B. Service Discovery Techniques in Internet of Things: A Survey. In: *Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC 2019)*. Bari, Italy: IEEE, 2019. p. 1720–1725. Citado na página 27.

ZVEI. *The Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0)*. 2015. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <<https://www.zvei.org/en/press-media/publications/the-reference-architectural-model-industrie-40-rami-40>>. Citado na página 77.

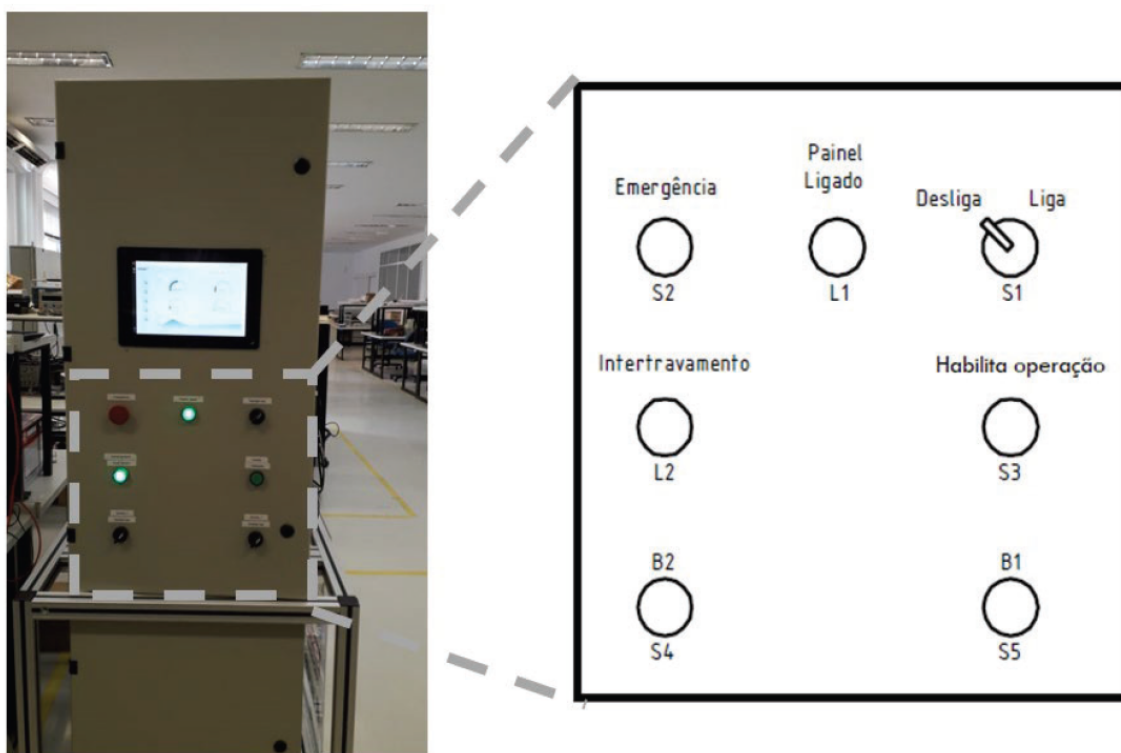
ZVEI. *Industrie 4.0 Plug-and-Produce for Adaptable Factories: Example Use Case Definition, Models, and Implementation*. 2017. Acesso em: 23 abr. 2025. Disponível em: <https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2017/Juni/Industrie_4.0_Plug_and_produce/Industrie-4.0-_Plug-and-Produce-zvei.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas 68 e 74.

ZVEI. *Software as Asset*. 2022. Acesso em: 07 abr. 2025. Disponível em: <https://github.com/admin-shell-io/submodel-templates/blob/main/development/Software%20Nameplate/1/0/2022-03-10_Software_As_Asset.pdf>. Citado 3 vezes nas páginas 77, 78 e 79.

APÊNDICE A – Procedimento de Operação da Planta Piloto

A fim de operar a planta piloto, é necessário energizá-la com tensão de alimentação de 220V e acionar a chave geral de energia. Logo após, utilizando-se os botões e lâmpadas indicadoras presentes no painel de controle da planta na [Figura 76](#), deve-se seguir os passos:

Figura 76 – Painel frontal da planta piloto industrial para habilitar a sua operação de controle de processos.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

1. Acionar a chave seletora do painel Desliga/Liga. Com essas configurações selecionadas, os indicadores painel ligado (L1) e intertravamento nível mínimo (L2) devem ficar acesos;
2. O nível mínimo garante que as bombas não sejam acionadas sem uma quantidade mínima de água para circular na tubulação. Essa proteção é feita com uma chave de nível. Garantido o nível mínimo, basta pressionar o botão Habilita Operação (S3);
3. O controle individual de Liga/Desliga das duas bombas é feito através das duas chaves seletoras da bomba 1 (S5) e bomba 2 (S4). Acionando ambas as chaves na posição de

Liga, as bombas irão funcionar em uma frequência de operação baixa (3 Hz), estando prontas para rodarem em sua faixa de operação máxima ou mínima (0 a 100%) através de requisições dos microsserviços.