

Universidade Federal de São Carlos - UFSCar
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia - CCET
Departamento de Ciência da Computação - DC
Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação - PPGCC

Eduardo Vieira do Nascimento

**Integração de CLPs Legados com Tecnologias Low-Code: Uma
Abordagem de Retrofit Digital para a Indústria 4.0**

São Carlos - SP
2026

EDUARDO VIEIRA DO NASCIMENTO

**Integração de CLPs Legados com Tecnologias Low-Code: Uma
Abordagem de Retrofit Digital para a Indústria 4.0**

Versão Original

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Área de Concentração: Sistemas de Automação e Robótica - SAR

Orientador: Rafael Vidal Aroca

São Carlos - SP

2026

Eduardo Vieira do Nascimento
Integração de CLPs Legados com Tecnologias Low-Code: Uma Abordagem de
Retrofit Digital para a Indústria 4.0/ Eduardo Vieira do Nascimento. – São Carlos
- SP, 2026 158 p.; 30 cm.
Prof. Dr.Rafael Vidal Aroca
Dissertação de Mestrado –
Universidade Federal de São Carlos - UFSCar
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia - CCET
Departamento de Ciência da Computação - DC
Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação - PPGCC, 2026.
Palavras-chave principais:
1. Retrofit. 2. Digital. 3. CLP. 4. Indústria. 5. Low-Code. 6. Integração.
CDU 02:141:005.7

Eduardo Vieira do Nascimento

Integração de CLPs Legados com Tecnologias Low-Code: Uma Abordagem de Retrofit Digital para a Indústria 4.0

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Área de Concentração: Sistemas de Automação e Robótica - SAR

Orientador: Rafael Vidal Aroca

Folha de aprovação. São Carlos - SP, 2026:

Prof. Dr. Rafael Vidal Aroca
Presidente da Banca - Membro Interno

Prof. Dr. Edilson Reis Rodrigues Kato
Membro Titular Interno

Profa. Dra. Kalinka Regina Lucas
Jaquie Castelo Branco
Membro Titular Externo

São Carlos - SP
2026

Folha de Aprovação

Defesa de dissertação de mestrado do(a) candidato(a) Eduardo Vieira do Nascimento, realizada em 24/02/2026

Comissão Julgadora

Prof(a) Dr(a) Rafael Vidal Aroca (UFSCar)

Prof(a) Dr(a) Kalinka Regina Lucas Jaquie Castelo Branco (USP)

Prof(a) Dr(a) Edilson Reis Rodrigues Kato (UFSCar)

O relatório de defesa assinado pelos membros da comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação

Aos meus pais pelo amor e apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por me conceder saúde e determinação para enfrentar os desafios ao longo desta jornada. Expresso minha profunda gratidão aos meus pais, Sebastião Vieira do Nascimento e Elisodete Aparecida Gonçalves do Nascimento, pelo amor incondicional e pelo apoio constante em todas as etapas da minha vida. Reconheço também a valiosa orientação e a amizade do professor Rafael Vidal Aroca, cuja dedicação foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço à Faculdade de Tecnologia SENAI Antônio Adolpho Lobbe, especialmente ao Diretor Márcio Marinho, pelo incentivo e confiança depositados na pesquisa, bem como pela disponibilização de equipamentos e laboratórios necessários à realização dos experimentos. Estendo meus agradecimentos aos professores da instituição, cujas colaborações, parcerias e suporte foram fundamentais ao progresso deste projeto. Em especial, extendo minha consideração ao professor Vinicius dos Santos, por sua amizade e contribuições técnicas que enriqueceram significativamente o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro por meio da bolsa de mestrado (Processo nº 135142/2021-0).

Deixo registrado meu reconhecimento a todos que, de alguma forma, colaboraram para a concretização desta pesquisa.

*"Se eu vi mais longe, foi porque estava sobre os ombros de gigantes."
(Sir Isaac Newton)*

RESUMO

NASCIMENTO, E. V. **Integração de CLPs Legados com Tecnologias Low-Code: Uma Abordagem de Retrofit Digital para a Indústria 4.0.** 2026. Dissertação (Mestrado Ciência da Computação) - Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 2026

Este trabalho apresenta uma abordagem para a modernização de sistemas industriais por meio da integração de Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) legados com plataformas digitais baseadas em *low-code*, visando à sua adaptação aos paradigmas da Indústria 4.0. No escopo da análise da integração de dispositivos de diferentes gerações, com ênfase na extração e captura de dados em tempo real, são considerados elementos como a reutilização de código legado, com destaque para aspectos técnicos e práticos essenciais à efetividade das soluções implementadas. A validação do artefato desenvolvido contempla a realização de experimentos controlados e a criação de protótipos funcionais que evidenciam a estabilidade do sistema, além da avaliação por especialistas na área de Tecnologia Operacional. O estudo também identifica desafios relacionados ao *retrofit* digital industrial. Os resultados indicam que plataformas como Node-RED e BIPES podem facilitar a transição de sistemas da Indústria 3.0 para a Indústria 4.0, desde que sejam considerados fatores como código legado, protocolos de comunicação e interfaces físicas.

Palavras-chave: CLPs, Controladores Lógicos Programáveis, *retrofit* digital, *low-code*, Node-RED, BIPES, integração de sistemas, sistemas legados, extração de dados, captura de dados, equipamentos antigos, automação industrial.

ABSTRACT

NASCIMENTO, E. V. **Integração de CLPs Legados com Tecnologias Low-Code: Uma Abordagem de Retrofit Digital para a Indústria 4.0.** 2026. Dissertação (Mestrado Ciência da Computação) - Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 2026

This paper presents an approach for modernizing industrial systems through the integration of legacy Programmable Logic Controllers (PLCs) with low-code-based digital platforms, aiming to adapt them to Industry 4.0 paradigms. Within the scope of analyzing the integration of devices from different generations, with an emphasis on real-time data extraction and capture, elements such as the reuse of legacy code are considered, highlighting technical and practical aspects essential to the effectiveness of the implemented solutions. Validation of the developed artifact includes controlled experiments and the creation of functional prototypes that demonstrate system stability, in addition to evaluation by experts in the area of Operational Technology. The study also identifies challenges related to industrial digital retrofit. The results indicate that platforms such as Node-RED and BIPES can facilitate the transition of systems from Industry 3.0 to Industry 4.0, provided that factors such as legacy code, communication protocols, and physical interfaces are considered.

Keywords: PLCs, Programmable Logic Controllers, digital retrofit, low-code, Node-RED, BIPES, systems integration, legacy systems, data extraction, data capture, old equipment, industrial automation.

FIGURAS

Figura 1 – Controlador Lógico Programável	33
Figura 2 – Ciclo de Scan	35
Figura 3 – Método de pesquisa utilizado na Revisão da Literatura	51
Figura 4 – Definição da string de busca	52
Figura 5 – Ano de publicação e Quantidade de artigos	52
Figura 6 – Nuvem de palavras	54
Figura 7 – Quantidade de artigos por período	57
Figura 8 – Quantidade de publicações por país	57
Figura 9 – Distribuição das principais plataformas de comunicação	59
Figura 10 – Limitações Encontradas	64
Figura 11 – Recorrência dos Protocolos	65
Figura 12 – Fluxograma desenvolvido com base na proposição de Dresch et al. (2015).	68
Figura 13 – Produção Industrial	70
Figura 14 – Método utilizado para experimentação	87
Figura 15 – Planejamento antes de aplicar o <i>retrofit</i> digital	88
Figura 16 – Execução do <i>retrofit</i> digital	89
Figura 17 – Mesa Seletora	91
Figura 18 – Borneira	92
Figura 19 – CLP Siemens S7-1500	93
Figura 20 – CLP integrado à borneira	93
Figura 21 – Configurações para protocolo OPC UA	94
Figura 22 – Configurações para habilitar variáveis de captura	95
Figura 23 – Configurações para habilitar rede Profinet	95
Figura 24 – Adição do pacote OPC UA	96
Figura 25 – Validação de dados com OPC UA Expert	96
Figura 26 – Fluxo de Integração Node-RED	97
Figura 27 – Programação nó CSV	97
Figura 28 – Conteúdo do arquivo CSV	98
Figura 29 – Processo de integração até o <i>dashboard</i>	99
Figura 30 – CLP WEG TPW03 30 HR-A	100
Figura 31 – Cabo Mini DIN de 8 pinos para RS-232 e Cabo conversor Serial para USB	102
Figura 32 – Habilitar a comunicação via endereço D8321	102
Figura 33 – Configurações para que o CLP funcione como <i>slave</i>	103
Figura 34 – Habilitar Conexão CLP	103
Figura 35 – Adição do pacote Modbus	104
Figura 36 – Validação da comunicação com QModMaster	104
Figura 37 – Fluxo para a Leitura, Captura, Processamento e Armazenamento dos Dados	105

Figura 38 – Programação do nó para a etapa de inserção no Banco de Dados	106
Figura 39 – Banco de Dados Operacional	107
Figura 40 – Processo de integração até o <i>dashboard</i>	109
Figura 41 – Microcontrolador ESP32	110
Figura 42 – Módulo conversor RS232-TTL	111
Figura 43 – Cabo inversor	111
Figura 44 – Integração entre microcontrolador ESP32 e módulo conversor MAX3232	113
Figura 45 – Blocos para a comunicação entre o microcontrolador ESP32 e o CLP TPW03	114
Figura 46 – Código MicroPython gerado de maneira automática	115
Figura 47 – Fluxo para a Leitura, Captura, Processamento e Armazenamento dos Dados	116
Figura 48 – Processo de integração até o <i>dashboard</i>	118
Figura 49 – Adição de blocos para <i>publisher</i> MQTT	119
Figura 50 – Exemplo: Configuração de um <i>Data Source</i>	120
Figura 51 – Painel de Gestão	121
Figura 52 – Processo de integração até o <i>dashboard</i>	122

TABELAS

Tabela 1 – Informações dos estudos analisados	53
Tabela 2 – Resultados de buscas em periódicos	55
Tabela 3 – Países e estudos realizados	58
Tabela 4 – Recorrência das tecnologias de conectividade nos estudos	60
Tabela 5 – Distribuição dos Participantes da Enquete	63
Tabela 6 – Informações - Estudos Analisados	150

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMQP	Advanced Message Queuing Protocol
API	Application Programming Interface (Interface de Programação de Aplicação)
BFB	Bloco Funcional Básico
BFC	Bloco Funcional Composto
BFIS	Bloco Funcional de Interface de Serviço
BI	Business Intelligence
BIPES	Block based Integrated Programming Environment for Embedded Systems (Ambiente de Programação Integrado Baseado em Blocos para Sistemas Embarcados)
BPMN	Business Process Model and Notation (Modelo de Processo de Negócios e Notação)
CE	Critérios de Exclusão
CI	Critérios de Inclusão
CLP	Controlador Lógico Programável
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CoAP	Constrained Application Protocol
COM/DCOM	Component Object Model / Distributed Component Object Model
CPU	Unidade Central de Processamento
CSV	Comma-Separated Values
DDS	Data Distribution Service
DSR	Design Science Research
E/S	Entradas e Saídas
ERP	Enterprise Resource Planning (Planejamento dos Recursos da Empresa)
GPIO	General Purpose Input/Output
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IDE	Integrated Development Environment (Ambiente de Desenvolvimento Integrado)
IEC	International Electrotechnical Commission (Comissão Eletrotécnica Internacional)
IHM	Interface Homem-Máquina

IIoT	Industrial Internet of Things
IoT	Internet of Things (Internet das Coisas)
LD	Ladder Diagram (Lógica Ladder)
MES	Manufacturing Execution Systems (Sistema de Execução de Manufatura)
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
MVC	Model View Controller
OPC	Open Platform Communications
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture (Arquitetura Unificada de Comunicações de Plataforma Aberta)
OSI	Open Systems Interconnection
PIB	Produto Interno Bruto
PLC	Programmable Logic Controller
POO	Programação Orientada a Objetos
PWA	Progressive Web Apps (Aplicativos Web Progressivos)
RAMI 4.0	Modelo Arquitetônico de Referência para a Indústria 4.0
RFID	Radio Frequency Identification (Identificação por Radiofrequência)
RQ	Research Question (Questão de Pesquisa)
SAR	Sistemas de Automação e Robótica
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition (Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados)
TCS	Tempo de Ciclo de Scan
TEL	Tempo de Execução da Lógica
TGS	Tempo de Gravação das Saídas
TLE	Tempo de Leitura das Entradas
TO	Tecnologia Operacional
TTL	Transistor-Transistor Logic
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
XML	Extensible Markup Language

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	Contextualização	25
1.1.1	Evolução nos Paradigmas Industriais	25
1.1.2	<i>Retrofit</i> Industrial	26
1.1.3	Controlador Lógico Programável	27
1.1.4	Indústria no Brasil	29
1.2	Motivação	30
1.3	Objetivo	31
1.4	Estrutura do Trabalho	32
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	33
2.1	Controlador Lógico Programável	33
2.2	<i>Firmware</i>	34
2.3	Ciclo de Scan ou Varredura	35
2.4	Principais Normas no desenvolvimento de <i>software</i> para CLPs	37
2.4.1	Norma IEC 61131	37
2.4.2	Norma IEC 61499	39
2.5	Considerações ao eleger linguagens de desenvolvimento	40
2.6	Comunicação entre dispositivos industriais	41
2.6.1	Principais Protocolos	42
2.6.1.1	Fieldbus	42
2.6.1.2	Ethernet Industrial	42
2.6.1.3	Protocolos <i>Wireless</i>	43
2.6.1.4	Protocolos de IoT	43
2.6.1.5	Protocolo OPC UA	44
2.6.2	<i>Low-Code</i>	45
2.6.3	<i>Middlewares</i>	45
2.6.3.1	Node-RED	46
2.6.3.2	BIPES	46
2.6.3.3	Eclipse IoT	47
2.6.3.4	ThingsBoard	47
2.6.4	<i>Gateways</i>	48
2.7	<i>Retrofit</i> em Automação Industrial	48
2.8	Considerações Finais	49
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	51
3.1	Planejamento	51
3.2	Execução	55

3.2.1	Seleção de Estudos Primários	55
3.2.2	Critérios de Inclusão (CI) e Exclusão (CE)	56
3.2.3	Questões de Pesquisa	56
3.3	Síntese e Análise de Resultados	57
3.4	Enquete	63
3.5	Considerações Finais	66
4	METODOLOGIA	67
4.1	Identificação do Problema	68
4.2	Conscientização do Problema	70
4.3	Revisão da Literatura	71
4.4	Enquete	72
4.5	Identificação dos Artefatos e Configuração das Classes de Problema 72	
4.5.1	Identificação de Tecnologias Potenciais para Composição do Artefato . . .	73
4.5.2	Protocolo de Comunicação OPC UA	73
4.5.3	Plataformas de Integração <i>Open Source</i> e <i>Low-Code</i>	73
4.5.4	Configuração da Classe de Problema	73
4.5.5	Necessidade de Conectividade	73
4.5.6	Captura de Dados	74
4.6	Proposição de Artefatos para Resolver um Problema em Específico 74	
4.6.1	Análise de Viabilidade	74
4.6.2	Atualizar Instruções e Código da Aplicação	74
4.6.3	Protocolo de Comunicação OPC UA	75
4.6.4	Plataformas de Integração <i>Open Source</i> e <i>Low-Code</i> :	75
4.7	Projeto do Artefato Selecionado	75
4.7.1	Análise de Viabilidade	75
4.7.2	Atualizar Instruções e Código da Aplicação	76
4.7.3	Protocolo de Comunicação OPC UA	77
4.7.4	Plataformas de Integração <i>Open Source</i> e <i>Low-Code</i>	78
4.8	Desenvolvimento do Artefato	78
4.9	Avaliação do Artefato	80
4.10	Esclarecimento das Aprendizagens	81
4.11	Conclusões	82
4.12	Generalização para uma Classe de Problemas	83
4.13	Comunicação dos Resultados	84
4.14	Considerações Finais	84
5	RESULTADOS	87
5.1	Planejamento	88
5.2	Execução	89

5.3	Resultados	90
5.4	Estudo de Caso	91
5.4.1	Experimento 1: Separação de Peças com CLP Siemens S7-1500	92
5.4.1.1	Configuração do Experimento	93
5.4.1.2	Integração e Comunicação	94
5.4.1.3	Resultados e Discussões	98
5.4.1.4	Proposta de Utilização	99
5.4.2	Experimento 2: Separação de Peças com CLP WEG TPW03 30 HR-A via cabo	100
5.4.2.1	Configuração do Experimento	100
5.4.2.2	Integração e Comunicação	101
5.4.2.3	Resultados e Discussões	108
5.4.2.4	Proposta de Utilização	108
5.4.3	Experimento 3: Separação de Peças com CLP WEG TPW03 30 HR-A via <i>wireless</i>	109
5.4.3.1	Configuração do Experimento	110
5.4.3.2	Integração e Comunicação	112
5.4.3.3	Cenário 1 – Persistência e Integração de Dados	114
5.4.3.3.1	Resultados e Discussões	116
5.4.3.3.2	Proposta de Utilização	117
5.4.3.4	Cenário 2 – Processamento e Visualização com o BIPES	119
5.4.3.4.1	Resultados e Discussões	120
5.4.3.4.2	Proposta de Utilização	121
5.5	Considerações Finais	122
6	CONCLUSÃO	125
6.1	Estudo Aplicado: Integração de CLPs com Plataformas Digitais <i>Low-Code</i>	125
6.2	Desafios Encontrados	126
6.3	Limitações do Trabalho	127
6.4	Mão de Obra Qualificada e Instituições de Ensino	128
6.5	Trabalhos Futuros	129
	REFERÊNCIAS	131
7	APÊNDICE	147
.1	Estudos Analisados para Revisão Bibliográfica	147
.2	Diagrama Ladder para Mesa Seletora - CLP Siemens S7-1500	152
.3	Diagrama Ladder para Mesa Seletora - CLP WEG TPW03 30 HR-A	156

1 . INTRODUÇÃO

A seguir, são apresentadas a contextualização e a motivação deste trabalho, bem como os objetivos gerais, específicos e a estrutura do texto.

1.1 Contextualização

A pesquisa desenvolvida nesta dissertação busca evidenciar a relevância do *retrofit* digital em âmbito industrial, com ênfase em empresas de pequeno e médio porte, que pretendem manter-se competitivas com investimentos financeiros reduzidos (GARCÍA; CANO; CONTRERAS, 2020). Nesse sentido, o trabalho concentra-se na modernização de sistemas de automação, ao promover a conectividade entre diferentes tecnologias e explorar a possibilidade de ampliar as funcionalidades de dispositivos antigos, com foco em Controladores Lógicos Programáveis (CLPs). Tal abordagem envolve, por exemplo, habilitar registros em memória para que o CLP disponibilize dados que podem ser coletados periodicamente e empregados em análises de processo.

A investigação considera a possibilidade de adaptação no *software* legado, a análise dos protocolos de comunicação disponíveis e o uso de plataformas *low-code*¹, capazes de acelerar o desenvolvimento da solução proposta (RICHARDSON et al., 2014). Sob essa perspectiva, busca-se promover a eficiência operacional, a integração entre sistemas e a capacidade de resposta frente às demandas de produção (TRIATMAJA; BUDIAS-TUTI; RISMARINANDYO, 2024). Para tanto, serão desenvolvidos estudos de caso que exemplifiquem as etapas, benefícios e desafios envolvidos na atualização tecnológica.

1.1.1 Evolução nos Paradigmas Industriais

Os avanços nas fases de industrialização ao longo do tempo refletem marcos históricos significativos que delinearão os processos produtivos. A Indústria 1.0 emergiu no final do século XVIII; foi marcada pela mecanização e pela utilização da energia a vapor, o que revolucionou a produção ao substituir processos artesanais por máquinas (GROUMPOS, 2021). Assim, teve como objetivo principal aumentar a eficiência e a capacidade produtiva, o que possibilitou a manufatura em larga escala.

No início do século XX, a Indústria 2.0 introduziu a eletricidade e a linha de montagem, o que estimulou a produção em massa. Essa etapa consolidou práticas como a padronização e o controle sistemático dos processos, o que permitiu a redução de custos e o aumento da acessibilidade a produtos industrializados (TAN et al., 2018). Já a Indústria 3.0 começou a ganhar forma na segunda metade do século XX; incluiu a automação e o uso de tecnologias digitais, como controladores lógicos programáveis (CLPs) e sistemas

¹ Desenvolvimento de *software* apoiado na criação de soluções com pouco código (SANCHIS et al., 2019).

computacionais, com a finalidade de obter maior precisão e flexibilidade nos métodos de fabricação (PILEVARI et al., 2020).

No século XXI, a Indústria 4.0 estabeleceu um paradigma baseado na integração de tecnologias como Internet das Coisas (IoT), *big data* e inteligência artificial, com foco em operar de forma autônoma e interconectada (WANG et al., 2017). Recentemente, a Indústria 5.0 propõe um retorno ao foco humano, ao associar tecnologias avançadas com a personalização e a sustentabilidade, com ênfase na colaboração homem-máquina para soluções adaptadas e socialmente responsáveis (APRILIYANTI et al., 2022).

1.1.2 Retrofit Industrial

O *retrofit* industrial é uma técnica de revitalização, a qual consiste em promover a atualização de equipamentos existentes, modernizando o *hardware* com a adição ou substituição de componentes, ou o *software*, com versões mais recentes, de maneira acessível (STOCK; SELIGER, 2016). Esse procedimento adiciona novas funcionalidades com base nas características originais dos dispositivos (ILARI et al., 2021). Tal prática contribui para manter a competitividade das indústrias, pois permite a modernização tecnológica sem os altos custos e o tempo de inatividade associados à substituição completa do maquinário. Assim, o objetivo subsidiário dessa abordagem é minimizar os gastos com recursos financeiros e tempo necessários para a digitalização de equipamentos (TANTSCHER; MAYER, 2022).

A Primeira Revolução Industrial (1760 - 1840) marcou o início do uso extensivo de máquinas nas fábricas (MOHAJAN, 2019). Desde então, os avanços tecnológicos permanecem constantes. Na atualidade, vivemos a Quarta Revolução Industrial em curso na maioria dos países, e, em algumas localidades, já está emergindo a Quinta Revolução Industrial (ZIATDINOV; ATTERAYA; NABIYEV, 2024). Com esse ritmo acelerado de inovação, retardar a obsolescência e prolongar a eficiência dos equipamentos pode ser um fator determinante para manter a estabilidade empresarial.

O conceito de obsolescência pode ser compreendido como o ato de se tornar ultrapassado, desatualizado ou inadequado (MELLAL, 2020). Na indústria, isso ocorre quando um dispositivo se torna ineficiente devido às mudanças relacionadas às demandas do mercado ou aos avanços tecnológicos inerentes ao progresso. Alguns trabalhos indicam que muitos equipamentos industriais voltados à automação são projetados para ter uma vida útil entre 20 (CARLO et al., 2021) e 30 anos (RUPPRECHT et al., 2021). Nessas circunstâncias, o *retrofit* surge como uma solução eficaz para estender a eficiência durante o ciclo de vida do maquinário (JASPERT et al., 2021).

Geralmente, são ponderados dois tipos de *retrofit*: por meio de *software* e *hardware*. A proposta baseada em *software*, também chamada de *retrofit* digital (ALQOUD; SCHAEFER; MILISAVLJEVIC-SYED, 2022), contempla a atualização de sistemas operacionais,

de sistemas de controle, de interfaces de usuário, de *middlewares*² e o versionamento de programas. Isso pode incluir a adoção de novos sistemas, como SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition* – Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados), MES (*Manufacturing Execution Systems* – Sistema de Execução de Manufatura) ou ERP (*Enterprise Resource Planning* – Planejamento dos Recursos da Empresa), os quais melhoram a coleta, a análise de dados e a tomada de decisões em tempo real (ALQOUD; SCHAEFER; MILISAVLJEVIC-SYED, 2022).

O *retrofit* por intermédio de *hardware*, por sua vez, abrange a substituição ou adição de componentes mecânicos e eletrônicos, como motores, sensores, controladores e dispositivos de comunicação. Em muitos casos, é necessário combinar ambos os tipos para alcançar os melhores resultados (TRIATMAJA; BUDIASTUTI; RISMARINANDYO, 2024). Quando bem executada, essa abordagem de modernização pode preservar o valor do investimento inicial, elevar o desempenho e agilizar o tempo de atualização da planta fabril (SANCHEZ-LONDONO; BARBIERI; FUMAGALLI, 2023).

1.1.3 Controlador Lógico Programável

Um controlador lógico programável (CLP) é um dispositivo eletrônico baseado em microprocessador que utiliza memória programável para armazenar instruções e implementar funções como lógica, sequenciamento, temporização, contagem e aritmética para monitorar e controlar máquinas e processos industriais por meio de programação (BOLTON, 2015).

Os primeiros CLPs foram introduzidos de maneira comercial em resposta às necessidades da indústria automobilística, com a finalidade de substituir o comando a relés³, em virtude da concorrência e do aumento das demandas por parte dos clientes, o que impulsionou a procura por soluções mais eficientes (MOODY; MORLEY, 2001). Assim, este novo equipamento deveria ser capaz de suportar condições extremas encontradas no ambiente industrial, demonstrar flexibilidade no que diz respeito às entradas e às saídas modulares e ser programável (CAMPISANO et al., 2013).

Nessa perspectiva, no final da década de 1960, a empresa Bedford Associates Inc. desenvolveu um dispositivo chamado MODICON 084. Historicamente, esse aparelho é considerado o primeiro CLP a entrar em produção comercial (HANSSEN, 2015). O MODICON 084 era programado em linguagem *ladder*⁴, baseada em diagramas de circuitos elétricos. Este padrão de notação foi definido, pois reduzia a necessidade de treinamento do corpo técnico, já familiarizado com a lógica de relés (SAHAI, 2015).

² *Software* que atua como um elo entre diferentes camadas tecnológicas (BANSAL; KUMAR, 2020).

³ Dispositivo eletromagnético capaz de mover uma chave eletrônica ao utilizar energia elétrica como fonte de alimentação (GUREVICH, 2018).

⁴ Linguagem de programação gráfica baseada em diagramas de circuitos elétricos (HAMMOND; DAVIS, 2007).

Após ampla aceitação da indústria, foram requeridas novas funcionalidades aos CLPs; as exigências eram por maior capacidade de memória e número de portas. Tais evoluções são observadas nos modelos 1774 da empresa Allen-Bradley, bem como no sucessor do MODICON 084, o 184, que foi lançado em 1973. Esses avanços foram possíveis também graças à chegada dos microprocessadores nesse mesmo período (GASPARETTO; SCALERA et al., 2019).

Os circuitos utilizados na construção de microprocessadores e memórias na década de 1980 eram mais populares, mais poderosos no que diz respeito ao poder computacional e à capacidade de armazenamento, bem como fisicamente menores quando comparados aos utilizados nas décadas anteriores (REVESZ, 1997). Nesse contexto, esta geração de microprocessadores e memórias passou a oferecer maior poder computacional, possibilitando a interconexão de CLPs e outros equipamentos por meio de redes industriais de comunicação e favorecendo o início da informatização nas fábricas (WARREN; ADAM, 2007). Além disso, durante a década de 1980, foram definidos padrões para protocolos de comunicação e para a construção de conexão de rede (SPURGEON, 2000).

Nos anos 1990, a tecnologia Ethernet, inicialmente desenvolvida para redes corporativas, passou a ser adaptada ao ambiente industrial, dando origem a variantes como Ethernet/IP e Profinet. Esse processo ocorreu de forma gradual, à medida que os fabricantes passaram a incorporar interfaces Ethernet em seus CLPs (FELSER; SAUTER, 2004). Em 2000, observamos a ampla utilização do protocolo industrial Ethernet/IP, destinado especificamente à comunicação entre dispositivos em ambiente industrial (BROOKS, 2001). A concepção de processadores mais eficientes resultou em ganhos na velocidade do processamento e na execução de tarefas pelos CLPs (YIGIT et al., 2014). Também na década de 2000, notamos melhorias nas Interfaces Homem-Máquina (HMI - *Human-Machine Interface*) com o surgimento de plataformas mais intuitivas (WU; LIU, 2009).

Na década de 2010, o ambiente industrial obteve progressos, com destaque para a Internet das Coisas (IoT - *Internet of Things*) (RATH; KHANG; ROY, 2024), que viabilizou maior interconectividade entre diferentes equipamentos (WOLLSCHLAEGER; SAUTER; JASPERNEITE, 2017). Dessa forma, temos a agregação de CLPs, sensores e dispositivos IoT, com propósitos diversos, como controle e monitoramento (CASTILLÓN et al., 2020). A integração com plataformas de computação em nuvem possibilitou o armazenamento de dados, análise e supervisão remota (XU, 2012).

No final da década de 2010 e início da década de 2020, houve um fomento significativo a iniciativas de equipamentos de baixo custo, inclusive nos CLPs (ÅKERMAN, 2018). Tal cenário foi motivado por tendências e necessidades de mercado, como a redução de custos, automação de pequenas e médias empresas e a Indústria 4.0 (TAMBAKE; DESHMUKH; PATANGE, 2023). Muitas dessas propostas são baseadas em plataformas de prototipagem consideradas acessíveis, como ESP (ZHANG et al., 2023), Arduino (THA-

ROT et al., 2023) e Raspberry Pi (MOUNITHA et al., 2023), as quais buscam estimular a utilização e o desenvolvimento de novas tecnologias, devido à sua facilidade de prototipação e integração em rede.

1.1.4 Indústria no Brasil

A industrialização do Brasil teve seu maior crescimento entre 1956 e 1961, impulsionada por investimentos em infraestrutura, com preponderância do setor automobilístico. Esse período foi fundamental para o aumento do PIB (Produto Interno Bruto) industrial, o qual alcançou uma participação de 2,9% do total mundial (FERREIRA, 2006). Tal processo também permaneceu relevante entre as décadas de 1970 e 1980, quando o país atingiu 6,4% do PIB industrial global, consolidando-se como um dos principais polos industriais da América Latina. Todavia, essa trajetória de expansão foi seguida por uma queda que perdurou até o final dos anos 1990, resultante de crises econômicas e políticas de desindustrialização, as quais reduziram a participação da indústria brasileira no PIB global para 2,2% (BONELLI; PESSÔA, 2010).

Entre o início dos anos 2000 e o final da década de 2010, a indústria brasileira vivenciou um crescimento moderado, embora tenha enfrentado desafios como a competição com produtos importados e a crise financeira global de 2008 (ONODA, 2021). A partir de 2014, o setor entrou em um ciclo de recessão, marcado por queda na produção, baixa competitividade e elevada carga tributária (OREIRO, 2017). Na atualidade, a indústria brasileira participa de 21,6% do PIB do país; em 2022, empregou 11,2 milhões de trabalhadores formais, o que correspondeu a 21,2% do emprego formal total da economia. Os salários pagos pelas indústrias foram superiores à média salarial do país, sendo essa diferença mais expressiva entre trabalhadores com maior grau de instrução (GOMES; SOUZA; MOURÃO, 2025).

Ainda no cenário nacional, pequenas e médias indústrias compõem cerca de 96% das empresas (Agência Sebrae, 2023). Tais empresas enfrentam desafios para a adoção de tecnologias associadas à Indústria 4.0, em razão de limitações tecnológicas, restrições financeiras, baixa maturidade digital e dificuldades organizacionais (ELHUSSEINY; CRISPIM, 2022). De forma adicional, observa-se que empresas de menor porte apresentam níveis inferiores de adoção de tecnologias digitais quando comparadas a organizações de maior porte, o que evidencia a existência de barreiras estruturais que dificultam a modernização e a integração de processos produtivos (BAIO; CARRER, 2022).

No Brasil, a Quarta Revolução Industrial permanece em andamento (SCHWAB, 2019), uma vez que o processo de atualização de sistemas de produção para tecnologias e padrões em conformidade com a Indústria 4.0 exige altos investimentos e, na maioria dos casos, a substituição de diversos equipamentos (YIN; STECKE; LI, 2018). Essa escolha pode ser impraticável financeiramente ou entrar em conflito com os princípios

da produção sustentável (KHAN et al., 2018; LI et al., 2021). Nessa ótica, pequenas e médias empresas nem sempre dispõem de subsídios para substituir seu maquinário antigo. Assim, há uma demanda por alternativas financeiramente viáveis, sendo uma opção a modernização apoiada em *retrofit*.

Nessas circunstâncias, o *retrofit* industrial apresenta-se como uma solução factível para o parque fabril nacional, ao favorecer a atualização no processo de produção associada a um investimento moderado (SANCHEZ-LONDONO; BARBIERI; FUMAGALLI, 2023). O procedimento abrange a modernização de dispositivos considerados legados, tornando-os compatíveis com a integração de tecnologias recentes, que fornecem suporte para a tomada de decisão (BELLINI; NESI; PANTALEO, 2022). Isso permite que as indústrias melhorem sua performance, reduzam custos operacionais e aumentem a produtividade, fatores fundamentais para competir no mercado global (SHAIR et al., 2021).

1.2 Motivação

No âmbito industrial, os Controladores Lógicos Programáveis constituem uma importante base tecnológica do maquinário relacionado à automação nas etapas de fabricação. A utilização desses equipamentos em processos fabris está acompanhada por muitos benefícios, desde a redução na mão de obra até melhorias na qualidade do produto (AL-TAIY, 2024). O encargo financeiro na implantação de CLPs e seus módulos associados (entradas, saídas, comunicação, fontes de alimentação, etc.) costuma ser elevado (ZHI et al., 2023; KARATSUIPA, 2023). Nessas circunstâncias, tais dispositivos são projetados para uma durabilidade superior a uma década (RUPPRECHT et al., 2021); essa é uma das razões pelas quais pequenas e médias empresas buscam postergar a troca desses recursos (PANAYIOTOU; STERGIOU; PANAGIOTOU, 2022).

Atualmente, para que as corporações se mantenham competitivas, é necessário que elas sejam eficazes em seus processos de produção, o que exige maior controle e interoperabilidade⁵ entre equipamentos do chão de fábrica. Logo, a indústria, de maneira geral, precisa ser capaz de reagir de forma rápida e adequada às mudanças de produtos e processos, inerentes ao atual modo de produção (MERKUMIANS; GSELLMANN; SCHITTER, 2021). Assim, inicialmente, os equipamentos antigos necessitam ser avaliados (MENDONCA et al., 2023), e, quando possível, essas tecnologias devem passar por atualizações para se integrarem aos sistemas de controle e monitoramento, possibilitando a tomada de decisão. Esse processo de modernização de dispositivos é chamado de *retrofit* industrial (STOCK; SELIGER, 2016).

O *retrofit* industrial promove a revitalização dos sistemas fabris, sem os elevados custos relativos à substituição completa dos equipamentos (ILARI et al., 2021). Em

⁵ Capacidade de sistemas, dispositivos ou componentes distintos de trabalharem juntos de maneira adequada (BURNS; COSGROVE; DOYLE, 2019).

particular, os CLPs possuem uma boa capacidade de atualização, uma vez que são sistemas modulares e programáveis, o que permite adaptações e alterações sem a necessidade de substituição total do equipamento (ALQOUD; SCHAEFER; MILISAVLJEVIC-SYED, 2022). Tais características favorecem a modernização por meio de modificações no *software* e integração com novas tecnologias e protocolos de comunicação (VOGEL-HEUSER et al., 2017).

Esta dissertação tem o propósito de investigar o estado da arte no que diz respeito ao processo de *retrofit* industrial, com foco na modernização baseada em *software* (*retrofit* digital) e na integração de sistemas. Em particular, busca explorar o uso de tecnologias *low-code* como ferramentas estratégicas para simplificar e acelerar o processo de integração de CLPs legados aos ambientes da Indústria 4.0, ao favorecer a conectividade entre dispositivos de diferentes gerações. De forma complementar, visa desenvolver um conjunto de procedimentos que possam servir como um guia prático para facilitar essa adequação, com ênfase especial em CLPs legados. Com essa finalidade, serão realizados estudos de caso que buscam demonstrar a viabilidade das técnicas apresentadas.

1.3 Objetivo

O objetivo geral desta pesquisa é desenvolver um conjunto de procedimentos para promover a captura de dados provenientes de Controladores Lógicos Programáveis legados, com ênfase na adequação de *software* e no apoio em plataformas *low-code*.

No âmbito deste trabalho, busca-se investigar e definir estratégias que priorizem a utilização das tecnologias já existentes em CLPs, como códigos e protocolos suportados, para viabilizar sua modernização.

Como objetivo específico, propõe-se a utilização de tecnologias *open source*, capazes de demonstrar a viabilidade do método por meio de uma abordagem prioritariamente digital, com mínima intervenção física, utilizando *gateways* de baixo custo para habilitar a conectividade de equipamentos sem suporte nativo aos padrões atuais de comunicação.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este texto está dividido em seis capítulos. No Capítulo 2, são abordados os fundamentos teóricos, suas peculiaridades, definições e características, com o propósito de evidenciar as escolhas das técnicas empregadas. Já o Capítulo 3 apresenta os trabalhos que fundamentam esta pesquisa, ao incluir proposições no contexto do desenvolvimento e da utilização de procedimentos de *retrofit* industrial, apoiadas em *software* e na integração de sistemas.

O Capítulo 4, por sua vez, descreve a metodologia utilizada na investigação e apresenta a proposta desenvolvida. No Capítulo 5, são detalhados os experimentos e a análise dos resultados. Por fim, o Capítulo 6 apresenta a conclusão da pesquisa, com destaque ao estudo aplicado, consideração sobre desafios encontrados, limitações, mão de obra qualificada, instituições de ensino e trabalhos futuros.

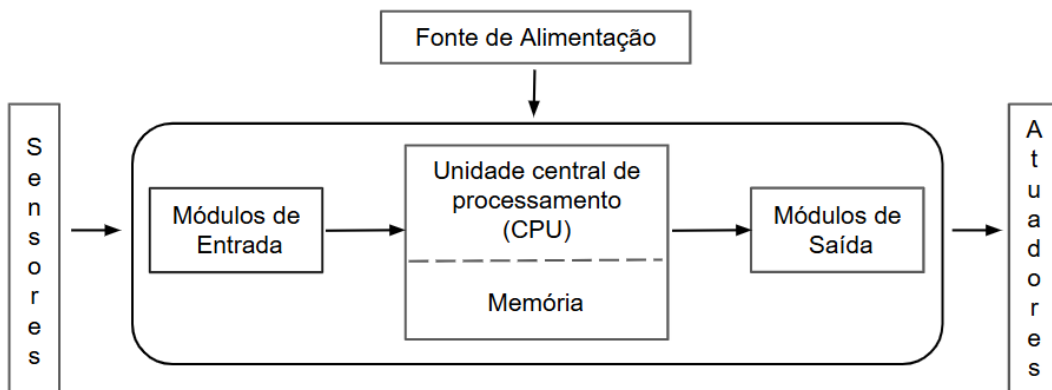
2 . FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A seguir, é apresentada a fundamentação teórica desta dissertação, na qual são estabelecidas definições sobre Controladores Lógicos Programáveis, *firmwares*, conceitos associados ao Ciclo de Scan, regulamentos para o desenvolvimento de programação em CLPs, bem como das normas IEC 61131 e IEC 61499. Posteriormente, são detalhados os padrões de comunicação adotados em âmbito industrial, incluindo protocolos e tecnologias de conectividade no contexto fabril. Por fim, é abordado o conceito de *retrofit* em automação industrial.

2.1 Controlador Lógico Programável

Um Controlador Lógico Programável é um dispositivo eletrônico tradicionalmente empregado na automação industrial, o qual compreende uma unidade central de processamento (CPU) integrada com memória e as interfaces de entrada e saída (E/S), utilizadas na comunicação com sensores e atuadores, como pode ser observado na ilustração da Figura 1, desenvolvida com base na proposição apresentada no livro de Bolton (2015).

Figura 1 – Controlador Lógico Programável



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao contrário de um computador convencional, o CLP é projetado especificamente para o controle de operações fabris, que demandam alta confiabilidade e capacidade de operar em ambientes adversos (KHOLIKHMATOV et al., 2023). Assim, características como robustez, eficiência, flexibilidade e capacidade de comunicação com outros dispositivos e sistemas são inerentes à adoção desses equipamentos (JOHNSON, 2020).

De maneira sistemática, os *hardwares* e os *softwares* envolvidos na construção e operação desses dispositivos evoluíram impulsionados pelas demandas industriais (NEZHMETDINOV et al., 2020). No início, eram utilizados componentes eletrônicos e *softwares*

condizentes com as limitações tecnológicas da época. Com o progresso tecnológico, os controladores incorporaram microprocessadores mais avançados, permitindo uma maior capacidade de processamento e, por consequência, a execução de um maior número de atividades (BRADLEY, 2018).

A evolução tecnológica contribuiu para impulsionar a integração dos CLPs com outros dispositivos, além de ampliar o suporte a diferentes linguagens de programação e protocolos de comunicação, em resposta às crescentes demandas da indústria (KIANGALA, 2018). Nesse contexto, destacaram-se propostas apoiadas em *Internet of Things* (IoT), as quais promoveram a conectividade entre equipamentos com complexidade reduzida (SISINNI et al., 2018).

Com a simplificação no processo de conectividade, observamos a adoção de soluções como manutenção preditiva, otimização de processos e maior flexibilidade na produção (COMPARE; BARALDI; ZIO, 2019). De maneira concomitante, arquiteturas *open source*, baseadas em plataformas como Arduino, ESP e Raspberry Pi, inicialmente concebidas para prototipagem (AGHENTA; IQBAL, 2019), têm se consolidado como alternativas viáveis e acessíveis para apoiar aplicações de automação em pequena e média escala, ampliando ainda mais o impacto da IoT no setor industrial (PATHMUDI et al., 2023).

2.2 Firmware

Os *firmwares* representam um conjunto de instruções de baixo nível adaptadas ao *hardware*, o qual é responsável por mediar a operação do dispositivo e a execução dos códigos programados pelo desenvolvedor (BASNIGHT et al., 2013). Esse *software* é projetado para garantir a funcionalidade básica e a compatibilidade com as ferramentas de desenvolvimento, como as IDEs (*Integrated Development Environments* - Ambientes de Desenvolvimento Integrado).

As atualizações de *firmware* são disponibilizadas pelos fabricantes em intervalos que podem variar de meses a anos, em razão da evolução tecnológica, correção de falhas e demandas de mercado. Essas atualizações podem incluir melhorias, como suporte a novos protocolos de comunicação, otimizações de desempenho, ou correções de vulnerabilidades de segurança (SERHANE et al., 2019).

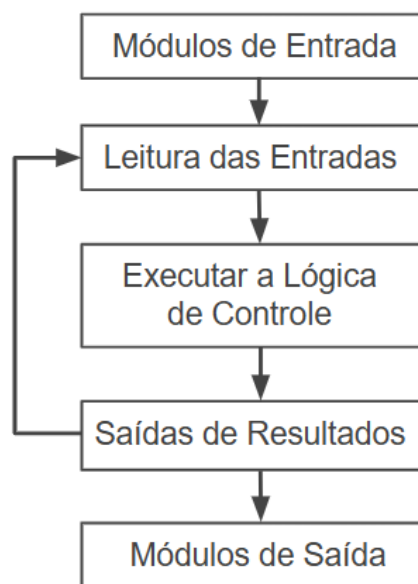
Existe uma relação intrínseca entre as versões de *firmwares* e IDEs, uma vez que a funcionalidade do CLP está ligada à compatibilidade entre o *software* de programação e o *firmware* vigente (BASEM, 2022). Versões mais recentes de IDEs suportam *firmwares* atualizados e oferecem novos recursos; no entanto, podem surgir limitações, especialmente em ambientes legados. Assim, os *firmwares* antigos podem não ser plenamente compatíveis

com as últimas versões da IDE, o que exige adaptações ou a realização de *downgrade*¹ (NAG; MITHUN, 2022). Nessa perspectiva, o gerenciamento eficiente do *firmware*, em conjunto com o uso adequado da IDE, é necessário para garantir a longevidade, a segurança e a funcionalidade dos CLPs em aplicações industriais.

2.3 Ciclo de Scan ou Varredura

O Controlador Lógico Programável pode ser classificado como um sistema embarcado de tempo real (KRUPA et al., 2020), o que indica que este dispositivo realiza operações críticas em relação ao tempo. Para otimizar esses procedimentos, foi introduzido o conceito de controle de execução de ciclo (CASTELLANOS et al., 2021). Desse modo, o equipamento deve realizar suas operações de maneira contínua em uma estrutura de repetição chamada ciclo de scan ou varredura, como ilustrado na Figura 2, gerada com base no trabalho de Patil e Appannavar (2022).

Figura 2 – Ciclo de Scan



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme ilustrado na Figura 2, o ciclo de varredura de um Controlador Lógico Programável (CLP) ocorre de forma contínua e pode ser dividido nas seguintes etapas:

¹ *downgrade* de *software* - processo de retroceder para uma versão anterior, com o objetivo de restaurar a compatibilidade com um sistema.

- **Módulos de Entrada:** representam os dispositivos físicos conectados às entradas do CLP, como sensores, interruptores, entre outros.
- **Leitura das Entradas:** o CLP realiza a leitura do estado dos dispositivos de entrada. Os sinais físicos são convertidos em valores digitais e armazenados em memórias de entrada. Essa etapa pode ser representada pelo **Tempo de Leitura das Entradas (TLE)**.
- **Executar a Lógica de Controle:** com base nos valores lidos, o CLP executa o programa (lógica de controle). Tal estágio pode ser representado por **Tempo de Execução da Lógica (TEL)**.
- **Saídas de Resultados:** após processar a lógica, o CLP atualiza os valores das saídas, que refletem as ações necessárias. Isso é feito no **Tempo de Gravação das Saídas (TGS)**.
- **Módulos de Saída:** os valores processados nas saídas são enviados para os dispositivos de campo conectados, como atuadores, motores, válvulas e lâmpadas.

As fases descritas acima se repetem de maneira contínua, formando uma estrutura de repetição. Nessas condições, o **Tempo do Ciclo de Scan (TCS)** pode ser expresso como a soma dos tempos de leitura das entradas, execução da lógica e gastos em cada etapa do ciclo:

$$TCS = TLE + TEL + TGS \quad (2.1)$$

Na expressão anterior, podemos compreender **TCS** como o **Tempo de Ciclo de Scan** de um CLP, enquanto **TLE** representa o **Tempo de Leitura da Entrada**, normalmente associado a sensores e interruptores; já **TEL** refere-se ao **Tempo de Execução da Lógica** de controle e **TGS** corresponde ao **Tempo de Gravação das Saídas**, frequentemente relacionado a dispositivos como atuadores, motores e lâmpadas (AHMED et al., 2021).

De maneira geral, um ciclo de varredura ocorre dentro de um intervalo de tempo específico. A leitura das entradas é realizada por meio de dispositivos conectados ao controlador, como sensores e interruptores, que atualizam as respectivas entradas referenciadas em memória. Em seguida, a lógica de controle é executada com base nos dados recebidos, após a execução do programa, os dados em memória são modificados e as saídas são acionadas de acordo com os resultados dessa execução. Por fim, o controlador gerencia os dispositivos de saída conectados, como atuadores e luzes de sinalização.

Cada ciclo de execução deve completar suas tarefas dentro de um determinado período para garantir a operação em tempo real (ZUBAIR et al., 2022). No entanto, em programas multitarefa contínuos, nos quais as atividades são executadas sem interrupção, um processo deve aguardar a conclusão de outro antes de iniciar o próximo ciclo (ALSAB-BAGH; LANGENDÖRFER, 2022). A duração de um ciclo de scan é influenciada por diversos fatores, como a velocidade do processador, o número de dispositivos de entradas e saídas associados ao controlador e a complexidade da programação, entre outros fatores (NDJIONGUE; FERREIRA, 2019). Assim, em um cenário com diferentes *hardwares* e lógicas de controle, observamos que a execução das tarefas requer intervalos de tempo variados. Isso resulta em ciclos específicos de varredura para cada tipo de equipamento e atividade (R JOHNSON JR et al., 2023).

2.4 Principais Normas no desenvolvimento de software para CLPs

O desenvolvimento de *software* para Controladores Lógicos Programáveis é regido por normas que visam garantir a segurança, a confiabilidade e a eficiência dos sistemas automatizados. A seguir, são apresentadas as principais normas que devem ser consideradas na codificação de aplicações para CLPs.

2.4.1 Norma IEC 61131

Esse conjunto de diretrizes é considerado um padrão internacional que estabelece referências para o desenvolvimento de *hardware* e *software*. O principal benefício observado na implementação dessas normas é a conformidade na fabricação dos controladores, além da adequação das plataformas para sistemas de codificação desses equipamentos (IQBAL; KHAN; KHAN, 2013). Essa regulamentação abrange diversos aspectos e, geralmente, é segmentada em três partes:

- **IEC 61131-1 Informação Geral:** determina os termos utilizados e as características gerais de um dispositivo para que seja classificado como um CLP (Controlador Lógico Programável).
- **IEC 61131-2 Requisitos de *Hardware* e Testes:** estabelece as condições que precisam ser cumpridas, além das premissas ambientais as quais o equipamento deve suportar.
- **IEC 61131-3 Linguagens de Programação:** delimita os paradigmas de linguagens de programação aceitos.

Como mencionado anteriormente, a IEC 61131-3 engloba informações sobre as linguagens de programação e especificações para a estrutura e implementação de programas

de controle (CAVALIERI; SALAFIA, 2020). Os cinco principais padrões de linguagens são:

1. **Texto Estruturado:** é uma linguagem textual semelhante a Pascal ou C, adequada para a codificação de algoritmos de maior complexidade e manipulação de dados, devido à sua capacidade de utilizar estruturas de controle condicionais e de repetição. Essa proposta apoia-se em conceitos de linguagens de propósito geral, como variáveis locais e globais, funções e procedimentos.
2. **Diagrama de Blocos de Funções:** é uma linguagem que representa funções e operações como blocos conectados por linhas de sinal. Cada bloco funcional realiza uma operação determinada, como lógica, matemática ou temporização. Essa abordagem é útil para sistemas de controle contínuo e para visualizar interconexões de funções de maneira intuitiva.
3. **Diagrama Ladder:** é uma linguagem inspirada em diagramas de relés eletromecânicos. É uma linguagem apoiada em representações visuais para retratar contatos, bobinas, temporizadores e contadores. A simbologia adotada por Ladder busca facilitar a compreensão, em especial para técnicos e engenheiros familiarizados com os diagramas de circuitos elétricos.
4. **Lista de Instruções:** é uma linguagem textual semelhante ao Assembly, composta por uma sequência de instruções básicas como carregar, armazenar, adicionar e comparar. Embora seja menos intuitiva, cada instrução opera diretamente sobre registradores e memória, o que contribui para maior eficiência na execução.
5. **Gráfico de Funções Sequenciais:** é baseado em um modelo que organiza programas em passos e transições. Cada passo representa um estado do sistema, com ações associadas, e as transições determinam a mudança entre os passos. Essa linguagem é normalmente implementada para controlar processos sequenciais e máquinas de estado, pois proporciona uma visualização clara da sequência de operações e estados do sistema.

No desenvolvimento de um CLP, há uma margem de liberdade associada às estratégias de produção. Nesse contexto, a norma IEC 61131-3 não deve ser interpretada como um conjunto rígido de exigências, mas sim como uma coleção abrangente de instruções (HANSSEN, 2015). Diante disso, os fabricantes têm a liberdade de definir disposições proprietárias, isso resulta na existência de diferentes padrões de programação, interfaces e protocolos.

Na fabricação de um Controlador Lógico Programável, é fundamental que a documentação informe de maneira clara o que está e o que não está de acordo com os

regulamentos da IEC 61131-3. Isso pode ser feito com base nos itens e especificações individuais; logo, a documentação do sistema deve conter uma declaração de correspondência, como: "Esta plataforma está em conformidade com as diretrizes da IEC 61131-3 nas seguintes propriedades". As informações de referência devem estar em concordância com a IEC (*International Electrotechnical Commission* - Comissão Eletrotécnica Internacional) (HEINL et al., 2023).

2.4.2 Norma IEC 61499

A IEC 61499 contempla as restrições impostas pela norma IEC 61131, ao fornecer uma arquitetura de referência aberta com alguns recursos principais como modelagem orientada a objetos, uso de blocos funcionais como componentes básicos e execução orientada a eventos. Esses elementos são armazenados em um formato aberto baseado em XML, o que permite a comunicação entre diferentes plataformas, bem como a reutilização (DAI; VYATKIN, 2012). Existem três categorias: bloco funcional básico, bloco funcional composto e bloco funcional de interface de serviço (AGUIRREZABAL, 2018).

- **Bloco Funcional Básico (BFB):** é definido por uma máquina de estados orientada a eventos, onde cada estado ativo aciona ações específicas. Um BFB encapsula algoritmos que podem utilizar apenas dados de entrada, saída e internos, sendo escrito em qualquer linguagem de programação mencionada pela norma IEC 61499.
- **Bloco Funcional Composto (BFC):** é compreendido por uma rede de componentes, sem restrição de tipo. Os BFCs podem ser reutilizados de forma hierárquica, e sua execução depende das conexões de eventos e dados da rede, mas, não possuem dados internos.
- **Bloco Funcional de Interface de Serviço (BFIS):** encapsula interações com elementos externos fora do escopo da norma IEC 61499. A interface de um BFIS é semelhante à de um BFB ou BFC, e sua funcionalidade oculta é detalhada por um diagrama de sequência. Um BFIS pode ser acionado por aplicativos, recursos ou ambos.

Em razão de restrições tecnológicas da época, a norma IEC 61499 não foi implementada de forma abrangente. Entretanto, com os avanços nos recursos de *hardware* e *software*, no âmbito de automação industrial e o desenvolvimento de ferramentas de suporte mais sofisticadas, a adoção das diretrizes da IEC 61499 na integração de ecossistemas digitais tornou-se fundamental na atualidade (CAVADINI et al., 2022).

2.5 Considerações ao eleger linguagens de desenvolvimento

Com os avanços tecnológicos e as crescentes necessidades de integração e controle nos processos de produção, a programação tornou-se uma habilidade fundamental para profissionais que atuam em setores relacionados à automação fabril (DORNELLES; AYALA; FRANK, 2022). Como mencionado anteriormente, os CLPs são equipamentos tradicionalmente utilizados nesse ambiente, os quais permitem o controle de aplicações industriais. Ao adotar a norma IEC 61131-3, os controladores podem seguir cinco abordagens de programação (CAVALIERI; SALAFIA, 2020), detalhadas na seção 2.4 deste Capítulo.

Entre as linguagens suportadas pelos CLPs, a Lógica Ladder, também conhecida como LD (*Ladder Diagram*), é a mais utilizada (ZHAO; ZHANG, 2020). Essa linguagem ganhou popularidade devido à sua semelhança com os diagramas de circuitos elétricos, comuns na década de 1970. Dessa forma, engenheiros sem treinamento técnico em programação conseguiam compreender e desempenhar suas atividades graças à familiaridade com esquemas já conhecidos. Todavia, a prevalência desses diagramas específicos de domínio diminuiu com o tempo.

Atualmente, pesquisas como a de Fronchetti et al. (2022) e de Rosiak et al. (2021) evidenciaram limitações na linguagem Ladder, devido à complexidade observada em programas extensos. De modo geral, os usuários que participaram dos experimentos afirmaram que, embora Ladder seja útil no contexto de aprendizagem, quando comparada a linguagens mais modernas, surgem queixas quanto à compreensão e manutenção de programas com algumas centenas de linhas. Tais descobertas sugerem um impacto negativo na manutenibilidade de programas que continuam a utilizar esse paradigma.

No trabalho de Tarnawski, Kudełka e Korzeniowski (2022), destacou-se que, no contexto de CLPs, linguagens gráficas como a Lógica Ladder foram projetadas para permitir uma programação rápida, e que favoreça profissionais com conhecimento prévio em circuitos elétricos. Sendo assim, trata-se de um padrão de linguagem intuitiva para aplicações de controle, porém prolixo e pouco legível para a implementação de algoritmos de controle avançados. Na mesma pesquisa, Tarnawski, Kudełka e Korzeniowski (2022) reforçaram que o padrão IEC 61131-3 contempla propostas como Lista de Instrução e Texto Estruturado, considerados modelos mais adequados com estratégias de controle para a implementação de algoritmos avançados.

White (2023), em seu livro, ao introduzir conceitos de programação, também apresenta a norma IEC 61131-3 e, particularmente, refere-se às linguagens baseadas em Lista de Instruções e Texto Estruturado como bases para o ensino de programação avançada. Assim, abrange conceitos como variáveis complexas, listas, matrizes e depuração. Os trabalhos de Zyubin et al. (2022) e de Weiß et al. (2021), ao considerarem as diretrizes da IEC 61131-3, mencionam as linguagens apoiadas em Lista de Instruções e Texto Estruturado

como uma modalidade possível para o desenvolvimento de programas classificados como complexos.

A expansão tecnológica e as exigências de controle nos processos de produção ressaltam a importância da automação na esfera industrial (DING; HERNANDEZ; JANE, 2023). Dessa forma, embora a Lógica Ladder continue sendo amplamente utilizada devido à sua familiaridade histórica, suas limitações em programas complexos sugerem a necessidade de abordagens mais eficientes. Nessas circunstâncias, CLPs que seguem as normas IEC 61131, em particular a regulamentação IEC 61131-3, possuem maior flexibilidade, pois permitem a codificação dos programas com outras abordagens como Lista de Instruções ou Texto Estruturado. Esses modelos favorecem o desenvolvimento e a manutenção de algoritmos de controle avançados e promovem maior escalabilidade produtiva, sem a necessidade de substituição dos dispositivos.

No início da década de 2000, plataformas como o Arduino foram lançadas com o objetivo de democratizar o acesso ao desenvolvimento de *hardware* (BAYLE, 2013). Posteriormente, com a popularização e expansão do ecossistema de microcontroladores programáveis no ambiente industrial, os fabricantes de CLPs reconheceram a necessidade de integrar sistemas industriais com essas tecnologias. Assim, começaram a incorporar em seus equipamentos suporte para as linguagens adotadas nessas plataformas. Por volta de 2015, já havia uma presença significativa de CLPs no mercado que ofereciam suporte a linguagens de propósito geral, como C++ (SANTOS et al., 2015) e, mais adiante, MicroPython (SANFILIPPO; AUSTRENG, 2021). Isso permite que engenheiros e programadores desenvolvam soluções industriais utilizando técnicas semelhantes às aplicadas em outros setores de tecnologia (RÚNARSSON, 2016).

2.6 Comunicação entre dispositivos industriais

Historicamente, os métodos de comunicação entre equipamentos industriais foram desenvolvidos por diferentes empresas; como resultado, observamos diretrizes variadas para a troca de dados entre dispositivos, as quais foram regulamentadas com o tempo. Normalmente, grandes companhias estavam à frente dessas tecnologias, assim, inicialmente, existia a necessidade de que outras empresas adequassem seus dispositivos às normas adotadas por grandes corporações (SEHR et al., 2020).

Diante disso, o protocolo de comunicação serial Modbus foi desenvolvido pela empresa Modicon no final da década de 1970, com o objetivo de promover a conectividade entre dispositivos, como sensores, medidores e atuadores. Algum tempo depois, em 1989, a Siemens apresentou o protocolo Profibus, que possuía uma velocidade superior ao seu antecessor e suportava uma topologia de rede mais complexa. Essas primeiras convenções

de conectividade são consideradas as redes inaugurais para a transmissão de dados entre dispositivos em âmbito fabril (RAHMAN et al., 2022).

Desse modo, à medida que a popularidade dos primeiros protocolos de comunicação aumentava, questões relacionadas à necessidade de intercâmbio de dados tornavam-se mais mandatórias, pois os padrões raramente eram compatíveis e poucos fornecedores ofereciam suporte a diferentes protocolos. Somente no final da década de 1990, foi feito um acordo entre os grupos empresariais para a incorporação de um padrão comum, o IEC 61158 (BETTLER et al., 2020), o qual designou os protocolos de comunicação para redes industriais.

2.6.1 Principais Protocolos

Atualmente, existem diversos protocolos que foram desenvolvidos com o objetivo de proporcionar maior flexibilidade, velocidade, confiabilidade e integração entre sistemas de automação. Segundo o trabalho de Shaikh, Shah e Sekhar (2023), esses regulamentos podem ser categorizados da seguinte forma:

2.6.1.1 Fieldbus

Concerne às comunicações com fio que conectam os controladores aos atuadores, sensores e outros dispositivos na rede industrial. Essa proposta de barramentos é utilizada para conectar diferentes máquinas e dispositivos no chão de fábrica, o que favorece a automação, o monitoramento e o controle. Sistemas baseados em Fieldbus são projetados para permitir a coleta e análise de dados, ao mesmo tempo em que mantêm o controle contínuo e as tarefas de automação nos sistemas industriais (NWAZOR; AUDU, 2022).

Os protocolos mais comuns nessa categoria incluem Modbus, Profibus, DeviceNet, CC-Link e CANopen. Esses protocolos fornecem diferentes níveis de arquitetura e eficiência na comunicação.

2.6.1.2 Ethernet Industrial

Diferente das redes baseadas em barramentos *Fieldbus*, as quais operam com limitações de largura de banda e topologias rígidas (GALLOWAY; HANCKE, 2011), a Ethernet Industrial oferece uma infraestrutura de comunicação baseada no padrão IEEE 802.3, adaptada para as normas exigidas pelo ambiente fabril (FELSER, 2005). Essa transição é preferível pois a Ethernet Industrial suporta taxas de transmissão mais altas (de 100 Mbps a Gbps) em comparação aos poucos kbps ou Mbps dos protocolos seriais tradicionais (VITTURI; ZUNINO; MARCHEAN, 2019).

De maneira adicional, a utilização de comutadores na camada de enlace permite uma segmentação de rede que reduz colisões e latências, o que oferece maior flexibilidade

para a expansão do número de nós sem degradar o desempenho global da rede (VITTURI; ZUNINO; MARCHEAN, 2019). Arquiteturas apoiadas nessa tecnologia viabilizam a convergência entre os dados de chão de fábrica e os sistemas de gestão corporativa, isso facilita a integração vertical e a implementação de *frameworks*² de conectividade escaláveis (LIAO et al., 2017).

Os protocolos mais comuns nessa categoria incluem o Ethernet/IP, Profinet, EtherCAT, Modbus TCP e PowerLink (DECOTIGNIE, 2005). Estes padrões diferem essencialmente na forma como modificam as camadas do modelo OSI³, para garantir o tráfego em tempo real, sendo selecionados de acordo com os requisitos de sincronização e a arquitetura dos dispositivos de controle utilizados no processo industrial (CAVALIERI, 2019).

2.6.1.3 Protocolos Wireless

Os padrões apoiados em *wireless* são utilizados para proporcionar conectividade de maneira versátil em ambientes industriais, permitem a comunicação sem fio entre dispositivos distribuídos, o que corrobora com a integração entre equipamentos. Comparados a soluções com fio, os protocolos *wireless* oferecem vantagens como maior mobilidade, facilidade de instalação e expansão da rede, além de suporte a aplicações que exigem flexibilidade e adaptação rápida às mudanças de ambiente (CAVALCANTI et al., 2019).

Os protocolos *wireless* mais comuns usados para integrar dispositivos em ambientes industriais incluem: WirelessHART, Zigbee e LoRaWAN. Cada um desses padrões possui peculiaridades próprias em termos de alcance, velocidade de transmissão, segurança e rendimento energético, adequados para diferentes finalidades. No âmbito da confiabilidade, redes *wireless* são impactadas por fatores como interferência eletromagnética, variações na qualidade do sinal e limitações de alcance, especialmente em ambientes com a presença de maquinário pesado e barreiras físicas (KULKARNI; NARAYANA; SAHOO, 2020). Em conformidade com isso, a implementação de mecanismos de correção de erros, criptografia e priorização de pacotes críticos é requerida para mitigar riscos e assegurar uma comunicação confiável e contínua (BHUSHAN; SAHOO, 2020).

2.6.1.4 Protocolos de IoT

São protocolos utilizados para integrar dispositivos IoT (*Internet of Things* - Internet das Coisas) e facilitar a comunicação e controle em ambientes industriais. Os padrões de IoT competem com abordagens tradicionais de automação e oferecem características como segurança na transmissão de dados, conectividade entre dispositivos de múltiplos fabricantes e eficiência energética. Esses protocolos possibilitam que diferentes tipos de

² Um *framework* é uma estrutura de *software* que fornece componentes e padrões reutilizáveis para o desenvolvimento de aplicações.

³ O modelo OSI é um arcabouço conceitual de sete camadas que padroniza as funções de comunicação de sistemas de rede (ZIMMERMANN, 1980).

dispositivos sejam conectados de forma escalável e segura em redes industriais (SHAIKH; SHAH; SEKHAR, 2023).

Os padrões mais comuns usados para integrar dispositivos IoT em ambientes industriais incluem protocolos de aplicação, como MQTT, WebSocket, CoAP, DDS e AMQP (AL-FUQAHA et al., 2015), bem como tecnologias de comunicação sem fio de curto alcance, como o Bluetooth Low Energy (GOMEZ; OLLER; PARADELLS, 2012). Essas propostas tecnológicas apresentam características particulares em termos de comunicação, segurança, eficiência energética e suporte a diferentes tipos de dispositivos IoT (LIN et al., 2017). No que se refere à conectividade, as tecnologias sem fio desempenham papel fundamental ao viabilizar a comunicação entre dispositivos distribuídos no ecossistema IoT, sendo classificadas conforme o alcance, o consumo energético e adequação a diferentes cenários de aplicação (DING et al., 2020).

2.6.1.5 Protocolo OPC UA

O OPC (*Open Platform Communications* - Comunicações de Plataforma Aberta) é uma norma de comunicação utilizada em automação industrial, criada pela *OPC Foundation*. Esse padrão foi desenvolvido em dois estágios: OPC *Classic* e OPC UA (*Open Platform Communications Unified Architecture* - Arquitetura Unificada de Comunicações de Plataforma Aberta). O OPC *Classic* fornece diretrizes de comunicação para sistemas de controle de processos e automação, incluindo acesso a dados (OPC DA), alarmes e eventos (OPC A&E) e acesso a dados históricos (OPC HDA). No entanto, essas variações do OPC são limitadas em sua conectividade e não possuem um mecanismo de autenticação seguro. Por essa razão, a versão UA (*Unified Architecture* - Arquitetura Unificada) do OPC foi criada em 2008, para facilitar a comunicação segura, padronizada e independente de plataforma entre dispositivos e sistemas de automação industrial (KANNOTH; SCHNICKE; ANTONINO, 2021).

O protocolo OPC UA garante a conectividade entre diferentes dispositivos e sistemas em ambientes de automação. Foi desenvolvido como uma evolução do OPC *Classic*, que apresentava como principal limitação a dependência do sistema operacional *Windows* e do uso de tecnologias como COM/DCOM (TAHVANAINEN, 2016). Com o OPC UA, essa barreira foi superada, ao permitir uma arquitetura multiplataforma que é mais segura, escalável e flexível, o que facilita a comunicação entre dispositivos de diferentes fabricantes e sistemas heterogêneos em uma rede industrial.

O propósito inicial do OPC UA é garantir que diferentes dispositivos, como CLPs, sistemas SCADA, sensores e até aplicativos em nuvem, possam trocar dados de forma eficiente e segura, independentemente de seu fabricante ou sistema operacional. Isso é fundamental em ambientes industriais complexos, onde diversos sistemas precisam compartilhar dados para otimizar operações e garantir controle e monitoramento eficazes.

Para que um dispositivo participe dessa rede, ele precisa suportar nativamente o protocolo OPC UA, seja por meio de *firmware* compatível ou por meio de *gateways* que permitam a integração (CÂNDIDO et al., 2010). Este padrão de comunicação é capaz de se integrar com outros protocolos, como: MQTT, Modbus e Profinet, atuando como um elo entre diferentes camadas de automação (LADEGOURDIE; KUA, 2022).

2.6.2 Low-Code

O termo *low-code* foi introduzido no trabalho de Richardson et al. (2014), e pode ser compreendido como uma abordagem de desenvolvimento de *software* que favorece a construção de aplicações por meio de componentes visuais e blocos funcionais pré-configurados, ao reduzir de forma significativa a necessidade de codificação manual. Tal estratégia emergiu como resposta à crescente demanda por soluções digitais ágeis e à escassez de profissionais especializados em programação (LUO et al., 2021). A aplicabilidade dessas ferramentas se estende a diversas áreas, como ciência de dados, gestão de processos, engenharia de *software* e tecnologia da informação, funcionando como um elo entre conhecimento técnico e inovação. Ao reduzir barreiras técnicas, o *low-code* estimula a colaboração multidisciplinar e amplia as possibilidades de criação tecnológica.

2.6.3 Middlewares

No contexto desta pesquisa, um *middleware* pode ser compreendido como um *software* que opera de maneira intermediária, ao permitir a interação entre diferentes sistemas e aplicações em ambientes de automação, ao favorecer a troca de dados entre componentes diversos. Geralmente, esse *software* demonstra compatibilidade com múltiplos protocolos de interconexão e padrões de conectividade, além de ser capaz de gerenciar a segurança e a escalabilidade dos sistemas conectados (BANSAL; KUMAR, 2020). A adoção de *middlewares* na esfera fabril proporciona agilidade operacional e integração de diferentes tecnologias.

As versões pagas de *middlewares* oferecem recursos como suporte técnico, integração nativa com sistemas proprietários e funcionalidades específicas voltadas à otimização de processos fabris. Grandes fabricantes, como Siemens, Rockwell Automation e Schneider Electric, disponibilizam plataformas que facilitam a conectividade com seus CLPs (PEREIRA; DIEDRICH; NEUMANN, 2023). *Softwares* como Siemens Industrial Edge e o FactoryTalk da Rockwell são amplamente utilizados devido à sua interdependência com os equipamentos e sistemas desenvolvidos pelos fabricantes. No entanto, tais ferramentas são frequentemente restritas a licenças comerciais e dependentes do ecossistema proprietário. Assim, ao considerarmos o escopo desta pesquisa, serão apresentadas tecnologias baseadas em arquitetura *open source*, as quais possibilitam a comunicação com diferentes sistemas e equipamentos, independentemente dos fabricantes (KOO; KIM, 2022).

2.6.3.1 Node-RED

O Node-RED é um *software open source* desenvolvido pela IBM em 2013 para facilitar a conectividade entre diferentes *hardwares* e serviços, com foco em aplicações de Internet das Coisas (IoT) e automação (KODALI; ANJUM, 2018). Tal aplicação é baseada na linguagem de programação JavaScript e permite o desenvolvimento de fluxos de automação ao interligar dispositivos e sistemas por meio de uma interface gráfica baseada em nós conectáveis. Sob essa perspectiva, cada nó representa uma funcionalidade, como sensores, dispositivos ou APIs (*Application Programming Interface* - Interface de Programação de Aplicação), que podem ser conectados entre si, favorecendo a criação e implementação de soluções de automação (SUNEHRA; SRINIDHI, 2020).

O propósito da plataforma é simplificar o desenvolvimento de soluções integradas, ao proporcionar a conectividade entre dispositivos físicos e serviços *web* por meio de uma abordagem *low-code*. Sua arquitetura escalável e flexível suporta uma vasta gama de protocolos, favorecendo a transmissão fluida dos dados entre tecnologias distintas (BADII et al., 2020). Para que dispositivos e sistemas possam ser integrados, é necessário que tenham suporte aos protocolos utilizados, também é possível implementar nós personalizados para conectar dispositivos específicos. A versatilidade da ferramenta explica sua ampla adoção em diferentes projetos (ONWUEGBUZIE; OLOWOJEBUTU; AKOMOLEDE, 2024). Um exemplo é o trabalho de Nugraha et al. (2025) que implementou um sistema de controle em cascata de nível e vazão, no qual um CLP foi integrado a uma plataforma de IIoT utilizando um servidor com Node-RED.

2.6.3.2 BIPES

O BIPES (*Block based Integrated Programming Environment for Embedded Systems* - Ambiente de Programação Integrado Baseado em Blocos para Sistemas Embarcados) foi desenvolvido a partir de 2020, com o objetivo de fornecer um ambiente de programação visual *open source* e *low-code* para sistemas embarcados (JUNIOR et al., 2020a). A arquitetura adotada permite que os usuários programem por meio de uma interface gráfica baseada em blocos, eliminando a necessidade de instalação do *software*.

Ao contrário de muitas tecnologias tradicionais de programação, a ferramenta é totalmente funcional em navegadores *web* e permite o uso *online* ou *offline* com PWA (*Progressive Web Apps* - Aplicativos Web Progressivos). Essa abordagem garante que usuários possam acessar a aplicação em ambientes com conexão instável ou até mesmo sem internet, como laboratórios ou áreas remotas. O BIPES utiliza o ecossistema da linguagem Python para ampliar suas capacidades e oferece integração com ferramentas como o *Google Cloud Storage* e bibliotecas gráficas, as quais permitem monitoramento em tempo real e análises históricas de dados de IoT (PACHECO, 2022).

A plataforma executa de forma automática a tradução da lógica criada para código em *MicroPython*, que pode ser executado diretamente em microcontroladores, sem etapas intermediárias. Aliado a isso, disponibiliza blocos específicos para comunicação em diferentes protocolos, ampliando sua aplicabilidade em cenários de IoT e automação. A ferramenta oferece suporte a diversas funcionalidades, como comunicação via barramento, manipulação de arquivos e integração com bibliotecas. Essa flexibilidade torna o BIPES relevante tanto em âmbito educacional como no industrial. (MARQUES et al., 2023).

2.6.3.3 Eclipse IoT

O Eclipse IoT é um conjunto de projetos *open source* desenvolvido pela Eclipse Foundation, para atender às demandas crescentes do ecossistema IoT (SCHIEFERDECKER et al., 2017). A plataforma compreende ferramentas e *frameworks*, como o Eclipse Kura para *gateways* IoT e o Eclipse Mosquitto. Esses componentes oferecem suporte para a coleta de dados entre dispositivos IoT. A estrutura modular da ferramenta permite que desenvolvedores escolham os componentes mais adequados, seja para conectar dispositivos industriais, criar soluções de monitoramento ou implementar redes IoT (RÖMER; JEROSCHEWSKI; KRISTAN, 2020).

A plataforma possui suporte para arquiteturas híbridas, assim, admite que aplicações sejam implantadas tanto em nuvem como em dispositivos de borda, isto é, em equipamentos localizados próximos à fonte de geração dos dados, como *gateways*, controladores industriais ou microcomputadores embarcados, promovendo flexibilidade e integração entre diferentes tecnologias. O ecossistema do *software* oferece uma base para o desenvolvimento de aplicações IoT, assim como outras propostas *open source*, conta com uma comunidade ativa para sua evolução contínua (SOLDATOS et al., 2020).

2.6.3.4 ThingsBoard

É uma plataforma IoT *open source* destinada ao monitoramento e controle de dispositivos conectados, com o foco em aplicações industriais e comerciais. A ferramenta possui suporte nativo a protocolos de comunicação como MQTT, CoAP e HTTP, permite a coleta e o gerenciamento de dados provenientes de uma ampla variedade de dispositivos (AGHENTA; IQBAL, 2019). O *software* fornece opções para visualização de *dashboards* que facilitam a análise e o acompanhamento de dados.

A arquitetura modular do ThingsBoard possibilita a implementação da ferramenta em diferentes infraestruturas. A plataforma também conta com um mecanismo de regras as quais permitem criar fluxos de automação, integrando ações como notificações, comandos remotos e processos analíticos (SHVAIKA; SHVAIKA; ARTEMCHUK, 2024).

2.6.4 Gateways

Um *gateway* é um dispositivo físico o qual atua como um ponto de conexão entre diferentes redes e aplicações, com o objetivo de facilitar a troca de dados em um ambiente com equipamentos e padrões de comunicação heterogêneos. Em contraste com o *middleware*, que é um *software*, o *gateway* desempenha funções semelhantes ao proporcionar a interconexão, entretanto, em nível de *hardware* (RANA; SINGH; SINGH, 2021). Assim como os *middlewares*, os *gateways* são capazes de gerenciar a segurança e a escalabilidade dos sistemas conectados. Sua incorporação em ambientes industriais potencializa a integração entre diferentes *hardwares*.

Nesse contexto, equipamentos conversores desempenham uma função importante como parte integrante dos *gateways* em sistemas industriais, em especial ao lidar com a diversidade de padrões de comunicação de Controladores Lógicos Programáveis (CLPs). Esses dispositivos possibilitam a tradução de protocolos e sinais entre equipamentos com interfaces incompatíveis, como a conversão de RS-485 para Ethernet ou de protocolos proprietários para padrões amplamente adotados, como Modbus ou Profinet (KIM; TRAN-DANG, 2019). Além disso, os conversores adaptam diferentes níveis de tensão e formatos de sinal, garantindo a conectividade segura e eficiente entre sensores, atuadores e sistemas supervisórios (FLAUS, 2019).

Ao considerarmos meios físicos de comunicação como cabos de conexão para CLPs, os *gateways* equipados com conversores asseguram a conectividade; logo, permitem que equipamentos industriais heterogêneos compartilhem dados em tempo real, mesmo quando tais dispositivos forem desenvolvidos por diferentes fabricantes (XIA et al., 2022). É importante ressaltar que esses dispositivos introduzem um tempo adicional de processamento ao traduzir dados e protocolos, o que pode impactar sistemas industriais que exigem respostas em tempo real. Dessa forma, é necessário avaliar se o *gateway* suporta os requisitos temporais do processo, especialmente em aplicações críticas, como controle de processos contínuos ou segurança operacional (MACAULAY; SINGER, 2011).

2.7 Retrofit em Automação Industrial

O *retrofit*, no contexto da automação industrial, refere-se à atualização de sistemas de controle e gestão de processos sem a necessidade de substituir completamente os *hardwares* ou *softwares* existentes (TRIATMAJA; BUDIASTUTI; RISMARINANDYO, 2024). Essa abordagem possibilita que as indústrias aprimorem seus sistemas ao incorporar novas tecnologias e funcionalidades, sem os altos custos e o tempo de inatividade associados à substituição total dos equipamentos ou sistemas. Tal prática pode resultar em melhorias significativas em termos de eficiência operacional, redução do consumo de energia e aumento

da produtividade.

Embora a quarta revolução industrial esteja em curso há mais de uma década, muitas fábricas ainda enfrentam desafios na modernização de sistemas e processos para aderir às tecnologias e padrões da Indústria 4.0 (BAKHTARI et al., 2020). As pequenas e médias empresas, em particular, muitas vezes não dispõem dos recursos necessários para substituir seus sistemas legados por máquinas de última geração. Nesse contexto, uma alternativa viável é o *retrofit* de equipamentos e aplicações (ALQOUD; SCHAEFER; MILISAVLJEVIC-SYED, 2022).

A modernização de *hardware* ou *software* pode agregar funcionalidades, como a capacidade de comunicação com outros dispositivos e a integração entre ecossistemas industriais, elementos essenciais para a implementação da Indústria 4.0. Em determinadas situações, o *retrofit* de dispositivos legados pode ser viabilizado exclusivamente por meio de *software*, utilizando a adaptação de códigos preexistentes, ferramentas específicas para integração e protocolos de comunicação compatíveis. Essa abordagem, denominada *retrofit* digital (JASPERT et al., 2021), representa uma solução eficaz para prolongar a vida útil de sistemas legados enquanto se atende às demandas tecnológicas atuais.

2.8 Considerações Finais

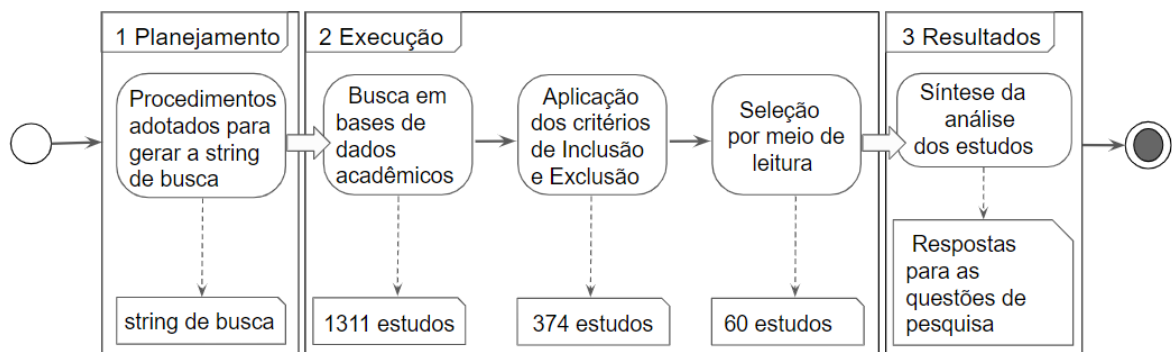
Neste capítulo, foram abordados os seguintes temas: Controlador Lógico Programável (CLP), ciclo de scan ou varredura, regulamentos para o desenvolvimento de CLPs, considerações na escolha de linguagens de desenvolvimento, comunicação entre dispositivos industriais e *retrofit* em automação industrial. A fundamentação teórica foi motivada pelo aprimoramento de conceitos e técnicas relacionadas ao estado da arte nesses assuntos.

Alguns desses conteúdos foram fundamentais para compreender e correlacionar possíveis metodologias, enquanto outros contribuíram para a identificação de ambivalências e para a interpretação do panorama e do progresso tecnológico. No Capítulo 3, são descritos os trabalhos que se relacionam com a temática dessa pesquisa.

3 . REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir, é descrita a metodologia de revisão da literatura utilizada nesta dissertação para pesquisar publicações acadêmicas relacionadas ao *retrofit* industrial, com foco em soluções que promovam a conectividade entre equipamentos por meio de *software*. O processo de levantamento bibliográfico foi dividido em três fases: planejamento, execução e síntese dos resultados, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Método de pesquisa utilizado na Revisão da Literatura



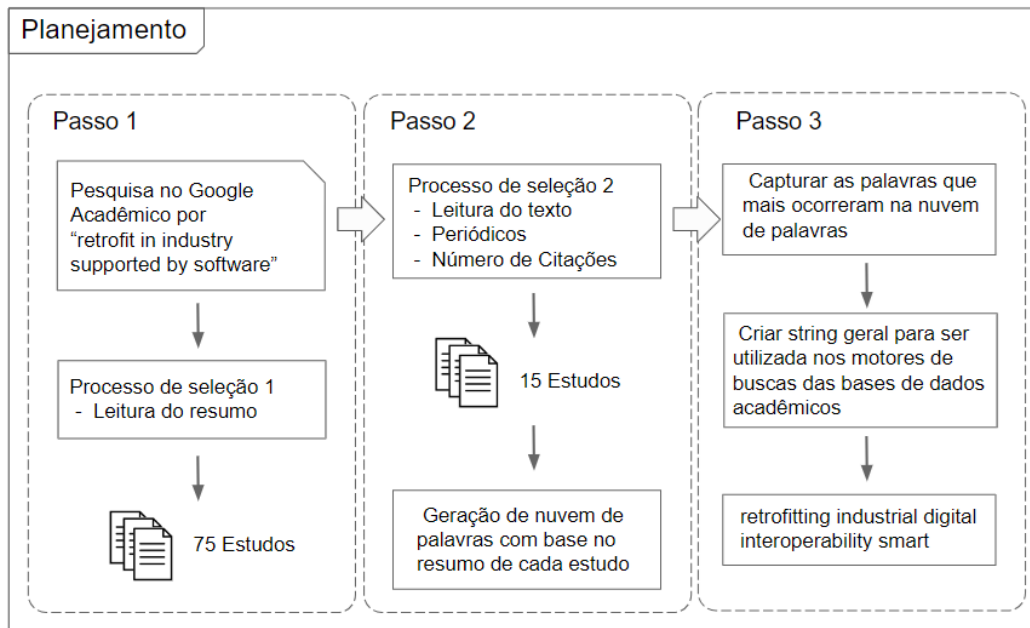
Fonte: Elaborado pelo autor.

As técnicas de revisão empregadas no contexto de engenharia de *software*, conforme discutido por Kitchenham e Brereton (2013), assim como as proposições relacionadas ao tema de pesquisa apresentadas por Hernández et al. (2020), Jaspert et al. (2021), Alqoud, Schaefer e Milisavljevic-Syed (2022), Teixeira et al. (2022), Tran et al. (2022) e Sanchez-Londono, Barbieri e Fumagalli (2023), foram estudadas e devem ser compreendidas como fontes de inspiração para as diretrizes adotadas nas próximas seções. Por fim, ao analisar as publicações encontradas, são apresentadas evidências que fundamentam a proposta desta dissertação de mestrado.

3.1 Planejamento

Adiante, é detalhado o processo utilizado para a escolha de *string* de busca; essa etapa foi dividida em três passos: (1) busca no Google Acadêmico e leitura dos resumos; (2) leitura dos textos e consideração dos periódicos e número de citações; e (3) adoção da técnica de nuvem de palavras para evidenciar os termos mais recorrentes e, de maneira semântica, criar uma *string* geral. A Figura 4 resume as fases descritas anteriormente.

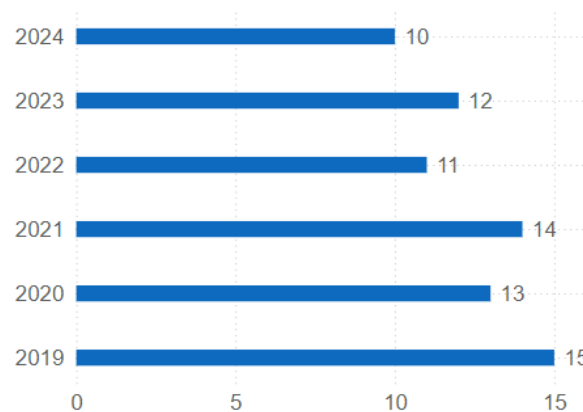
Figura 4 – Definição da string de busca



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a escolha da *string* de busca, foram investigados trabalhos que abordaram procedimentos sistemáticos na etapa de revisão bibliográfica. Inicialmente, foi conduzida uma pesquisa no Google Acadêmico utilizando a *string* de busca "retrofit in industry supported by software". Durante a verificação das publicações, foram revisados 75 trabalhos (NASCIMENTO, 2025d) com base na leitura dos resumos, abrangendo o período de 2019 a 2024, conforme pode ser observado na Figura 5 a seguir.

Figura 5 – Ano de publicação e Quantidade de artigos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dos 75 trabalhos obtidos, foi realizado um novo processo de seleção, com a incorporação de critérios adicionais, como a leitura do texto, a análise dos periódicos e o número de citações. Como resultado, foram escolhidos 15 estudos (NASCIMENTO, 2025a), distribuídos na Tabela 1 da seguinte forma:

Tabela 1 – Informações dos estudos analisados

Id	Título	Periódicos	Ano	Citações
1	Industrial edge computing: Enabling embedded intelligence	IEEE Xplore	2019	180
2	Retrofit: Creating Awareness in Embedded Systems - A Usecase for PLCs	ACM	2019	6
3	Cyber-physical production systems retrofitting in context of industry 4.0	Science Direct	2020	220
4	Enabling servitization by retrofitting legacy equipment for Industry 4.0 applications: benefits and barriers for OEMs	Science Direct	2020	55
5	Digital retrofit: A first step toward the adoption of Industry 4.0 to the manufacturing systems of small and medium-sized enterprises	Scopus	2020	53
6	Smart retrofitting in manufacturing: A systematic review	Science Direct	2021	97
7	Concepts for retrofitting industrial programmable logic controllers for industrie 4.0 scenarios OEMs	IEEE Xplore	2021	20
8	Smart Working in Industry 4.0: How digital technologies enhance manufacturing workers	Science Direct	2022	242
9	Retrofitting of legacy machines in the context of Industrial Internet of Things (IIoT)	Science Direct	2022	57
10	Industrial digitalization in the industry 4.0 era: Classification, reuse and authoring of digital models on Digital Twin platforms	Science Direct	2022	56
11	Industry 4.0: a systematic review of legacy manufacturing system digital retrofitting	Scopus	2022	51
12	PLC orchestration automation to enhance human machine integration in adaptive manufacturing systems	Science Direct	2023	49
13	Digital Twin Technology: Opportunities and Challenges for Smart Era's Applications	ACM	2023	22

14	Retrofitting enables sustainability, Industry 4.0 connectivity, and improved usability	Science Direct	2024	9
15	Adaptive retrofitting for industrial machines: utilizing webassembly and peer-to-peer connectivity on the edge	Scopus	2024	6

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a seleção dos artigos, foi criada uma nuvem de palavras com base nos resumos desses estudos, como pode ser observado na Figura 6 a seguir.

Figura 6 – Nuvem de palavras



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por meio da análise, observou-se que as palavras com maior recorrência foram:

retrofitting, retrofit, connectivity, interoperability, digital, IoT, PLC, CNC, software, manufacturing, industrial, industry, legacy, equipment, smart

As fases descritas anteriormente foram utilizadas para identificar as palavras que deveriam ser exploradas. À medida que os principais termos eram identificados, a combinação desses vocábulos foi empregada de maneira semântica na criação de uma *string* geral, a qual será adotada nas bases de busca desta revisão.

retrofitting industrial digital interoperability smart

3.2 Execução

Nessa etapa, a *string* geral foi adaptada para os periódicos ACM - *Association for Computing Machinery*, IEEE Xplore, Scopus e Science Direct. Com o objetivo de controlar o escopo da busca, foram aplicados também os operadores AND e OR, tradicionalmente usados em pesquisas avançadas. O operador AND combina termos, ao retornar resultados que contêm todos os termos especificados, enquanto o operador OR busca resultados que contenham ao menos um dos termos, ampliando assim o escopo da pesquisa. O uso do * (asterisco) como operador de truncamento foi adotado apenas no Scopus, uma vez que essa estratégia permitiu ampliar o processo de investigação.

3.2.1 Seleção de Estudos Primários

Após a definição da *string* geral de busca e sua adaptação às especificidades de cada base de dados, procedeu-se à realização das consultas nos principais periódicos e indexadores da área de Computação e Engenharia. O objetivo dessa etapa foi identificar o volume inicial de publicações relacionadas ao tema investigado, a partir da aplicação padronizada dos descritores previamente estabelecidos. A Tabela 2 apresenta, de forma sistematizada, as bases consultadas, as respectivas *strings* de busca utilizadas e o quantitativo de resultados retornados em cada plataforma.

Tabela 2 – Resultados de buscas em periódicos

Base de Dados	String de Busca	Resultados
ACM	retrofitting AND industrial AND digital AND interoperability AND smart	153
IEEE Xplore	retrofitting AND industrial AND digital AND interoperability AND smart	405
Science Direct	retrofitting AND industrial AND digital AND interoperability AND smart	381
Scopus	retrofit* AND industr* AND digital* OR interoperability OR smart	372

Fonte: Elaborado pelo autor.

Obteve-se um total de 1311 trabalhos (NASCIMENTO, 2025c), assim sendo, para gerenciar essa bibliografia e aplicar novos filtros, utilizou-se o *software* JabRef <<https://www.jabref.org/>>.

3.2.2 Critérios de Inclusão (CI) e Exclusão (CE)

Diante da grande quantidade de resultados, alguns critérios foram estabelecidos com o objetivo de selecionar os artigos que tratassem especificamente do *retrofit* de equipamentos industriais no contexto de *software* e integração de sistemas. Isso se faz necessário, pois o termo *retrofit* é utilizado em outras áreas do conhecimento, como engenharia civil, automobilística e sistemas de informação (ZHANG et al., 2018). A seguir, apresentamos os critérios de inclusão (CI) e os critérios de exclusão (CE).

Critérios de Inclusão (CI):

- CI 1 - O artigo deve abordar o *retrofit* industrial e discorrer sobre as tecnologias de *software* utilizadas na integração dos equipamentos.
- CI 2 - O artigo deve contemplar conteúdos como revisão, metodologia, técnicas, procedimentos ou estratégias para propor o *retrofit* digital em equipamentos industriais.

Critérios de Exclusão (CE):

- CE 1 - Remover artigos duplicados.
- CE 2 - Remover artigos que promovem o *retrofit* com foco exclusivo no *hardware*.

Para essa verificação, foram consideradas as palavras-chave, o título e o resumo de cada artigo. Depois de uma nova análise, foram aprovados 112 estudos da Scopus, 97 da IEEE Xplore, 52 da ACM e 33 da Science Direct, totalizando 294 estudos. Após a leitura detalhada desses artigos, 60 foram selecionados (NASCIMENTO, 2025b) para embasar esta dissertação. Durante a revisão, foram encontrados estudos publicados entre os anos de 2014 e 2024, com propostas de trabalhos de *retrofit* apoiados em *software* e na conectividade de equipamentos.

3.2.3 Questões de Pesquisa

Q1: Qual é o panorama atual da pesquisa sobre *retrofit* digital industrial no mundo?

Q2: Quais são as tecnologias mais comuns adotadas na conectividade entre diferentes dispositivos industriais?

Q3: Quanto ao Brasil, o que podemos concluir?

3.3 Síntese e Análise de Resultados

RQ1: Ao analisarmos os trabalhos contidos no conjunto de amostra desta pesquisa, apresentado no gráfico de linha da Figura 7, é possível afirmar que os estudos relacionados ao *retrofit* digital industrial cresceram nos últimos anos, o que demonstra a relevância do assunto na comunidade científica.

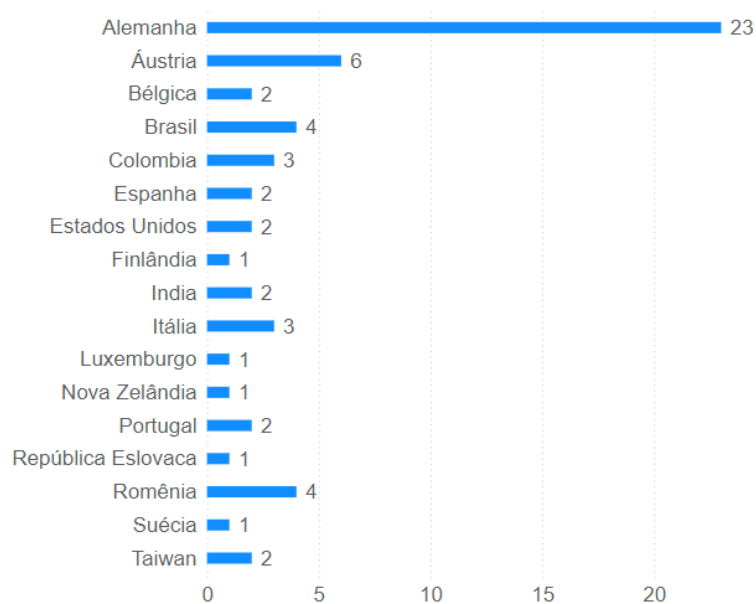
Figura 7 – Quantidade de artigos por período



Fonte: Elaborado pelo autor.

As publicações analisadas estão divididas entre 17 países (Alemanha, Áustria, Bélgica, Brasil, Colômbia, Espanha, Estados Unidos, Finlândia, Índia, Itália, Luxemburgo, Nova Zelândia, Portugal, República Eslovaca, Romênia, Suécia e Taiwan). Ao examinar a distribuição geográfica dos estudos no gráfico de barras da Figura 8, é possível observar uma predominância de pesquisas realizadas na Europa, com destaque para a Alemanha.

Figura 8 – Quantidade de publicações por país



Fonte: Elaborado pelo autor.

A predominância de estudos sobre *retrofit* digital originados na Alemanha pode ser explicada por fatores como:

- **Economia Fortemente Industrializada:** a Alemanha tem uma das economias mais industrializadas do mundo, com setores como o automotivo, químico e manufatura mecânica altamente dependentes de maquinário robusto e de longa duração (NAUDÉ; NAGLER, 2022). Assim, ao invés de substituir equipamentos antigos, muitas empresas optam pelo *retrofit* para economizar custos e preservar investimentos anteriores.
- **Cultura de Sustentabilidade e Eficiência:** a cultura alemã valoriza práticas sustentáveis e a otimização de recursos. A prática de *retrofit* reduz o desperdício ao revitalizar máquinas existentes, tornando-as mais eficientes (JASPERT et al., 2021). Políticas ambientais rigorosas também incentivam a modernização de equipamentos para reduzir consumo de energia e emissões (SHENG; CAO; XUE, 2018).
- **Preservação do Patrimônio:** as indústrias alemãs muitas vezes operam com maquinário personalizado e de alta qualidade, que pode ter décadas de uso (ZHONG et al., 2017). A técnica de *retrofit* pode ser uma solução para manter esses equipamentos competitivos.

Os dados contidos na Tabela 3 associam países e publicações. Informações adicionais, como título, tipo de publicação e ano, estão disponíveis na Tabela 6 no apêndice. Tais conteúdos podem ser relacionados por meio da **Identificação do Estudo**, item comum presente em ambas as tabelas.

Tabela 3 – Países e estudos realizados

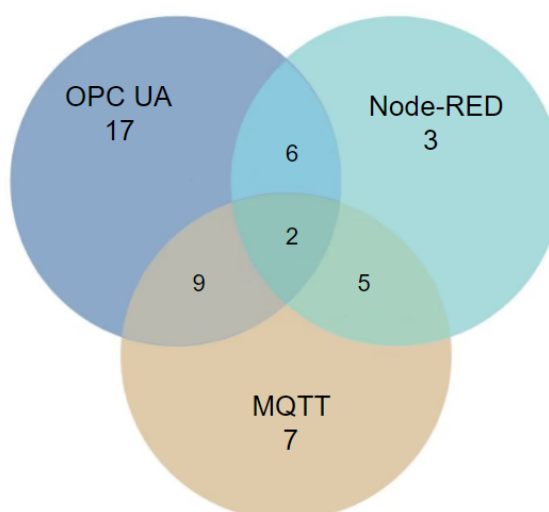
Países	Identificação do Estudo
Alemanha	e-7, e-11, e-15, e-19, e-20, e-26, e-27, e-29, e-31, e-32, e-35, e-38, e-39, e-41, e-45, e-48, e-50, e-53, e-54, e-55, e-56, e-58, e-59
Áustria	e-9, e-24, e-33, e-36, e-42, e-44
Bélgica	e-28, e-51
Brasil	e-14, e-37, e-40, e-52
Colômbia	e-23, e-34, e-46
Espanha	e-6, e-60
Estados Unidos	e-10, e-21
Finlândia	e-5
Índia	e-13, e-15

Países	Identificação do Estudo
Itália	e-12, e-18, e-30
Luxemburgo	e-17
Nova Zelândia	e-22
Portugal	e-8, e-25
República Eslovaca	e-43
Romênia	e-1, e-4, e-47, e-49
Suécia	e-57
Taiwan	e-2, e-3

Fonte: Elaborado pelo autor.

RQ2: Tradicionalmente, a integração entre equipamentos industriais não envolve apenas uma única tecnologia, conforme indicado por Givehchi et al. (2017). Na maioria dos casos, são necessárias múltiplas soluções para que a integração seja efetivamente realizada. Entre os artigos analisados, as tecnologias de comunicação mais utilizadas incluem os protocolos OPC UA, MQTT e a plataforma de integração Node-RED. Dentre essas, o OPC UA destacou-se, sendo mencionado como a escolha primária em 17 artigos, seguido pelo MQTT em 7 artigos, enquanto a plataforma Node-RED foi citada em 3 artigos. Esses dados podem ser visualizados no Diagrama de Venn na Figura 9 a seguir.

Figura 9 – Distribuição das principais plataformas de comunicação



Fonte: Elaborado pelo autor.

Soluções com tecnologias diferentes, como: gêmeos digitais, *toolkits* ou protocolos como: Ethernet, Modbus TCP, propostas baseadas em Wi-Fi e WebSocket, entre outras, tiveram menor incidência nos estudos analisados. No contexto da conectividade entre

equipamentos e plataformas de integração, 20 artigos apresentaram a combinação entre essas três tecnologias. A Tabela 4 inclui a relação entre elas e seus respectivos estudos.

Tabela 4 – Recorrência das tecnologias de conectividade nos estudos

Tecnologias de conectividade	Identificação do Estudo
OPC UA	e-4, e-6, e-8, e-14, e-19, e-31, e-34, e-35, e-37, e-42, e-48, e-49, e-54, e-57, e-58, e-59, e-60
MQTT	e-7, e-18, e-21, e-23, e-25, e-28, e-44
Node-RED	e-1, e-17, e-39
OPC UA e MQTT	e-2, e-5, e-9, e-15, e-29, e-32, e-41, e-45, e-46
OPC UA e Node-RED	e-13, e-26, e-27, e-33, e-47, e-56
MQTT e Node-RED	e-3, e-11, e-10, e-40, e-43
OPC UA, MQTT e Node-RED	e-24, e-50

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os artigos de Bangemann et al. (2016), Givehchi et al. (2017), Kannoth, Schnicke e Antonino (2021) destacam que, para a utilização do protocolo OPC UA em ambientes industriais, é necessário que os equipamentos sejam compatíveis com esse padrão, conforme detalhado na subseção 2.6.1.5 do Capítulo 2. Essa compatibilidade permite a comunicação padronizada entre dispositivos de diferentes fabricantes, isso promove a conectividade em sistemas complexos. Os trabalhos estudados sugerem a adoção do OPC UA como uma solução robusta para aplicações que demandam alta segurança e confiabilidade na troca de dados.

Em projetos de *retrofit*, os quais utilizavam dispositivos IoT, observou-se que o protocolo MQTT foi amplamente utilizado devido à sua eficiência energética e à transmissão de dados em redes de baixa largura de banda, como apontado por Mairal, Muller e Rossi (2022) e Palmeira et al. (2022). Por fim, a plataforma Node-RED tem sido integrada a essas soluções para simplificar processos de conectividade e automação. Com uma abordagem *low-code* e natureza *open source*, a plataforma demonstrou ser uma ferramenta acessível e versátil para integrar dispositivos legados e novos sistemas, como demonstrado nos estudos de Kolla et al. (2022) e Kanaan et al. (2023).

RQ3: Em relação ao Brasil, foram analisados quatro artigos, os quais serão discutidos a seguir.

A pesquisa de Mendonca et al. (2023) definiu uma metodologia para o *retrofit* de sistemas de automação industrial legados no contexto da Indústria 4.0, a qual contemplou atualizações tanto de *hardware* quanto de *software*. A abordagem iniciou-se com a análise do sistema existente, identificou limitações, requisitos e objetivos de modernização, seguida pela definição das tecnologias a serem incorporadas, com foco em conectividade, desempenho e competitividade industrial. A metodologia prevê a integração planejada de tecnologias como IoT, sistemas ciberfísicos, computação em nuvem e gêmeos digitais, além do uso do protocolo OPC UA para assegurar a comunicação entre dispositivos. O estudo é validado por meio de um caso prático, no qual são descritas etapas que vão desde a substituição de componentes obsoletos até testes e validação da solução modernizada, o que garantiu aderência aos princípios de fábrica inteligente

O artigo de Lins e Oliveira (2020) propôs uma estratégia de *retrofit* voltada à transformação de equipamentos industriais legados em sistemas ciberfísicos de produção. A abordagem baseia-se na criação de uma camada intermediária responsável por coletar dados do equipamento por meio de sensores adicionais e interfaces de comunicação, ao encapsular suas funcionalidades em serviços digitais. Essa camada promoveu a virtualização dos ativos físicos e sua integração a uma arquitetura orientada a serviços, o que permitiu a conectividade com sistemas de nível superior. A estratégia foi concebida de forma independente do fabricante ou modelo do equipamento, isso favoreceu reutilização e escalabilidade. Sua implementação fundamentou-se no Modelo Arquitetônico de Referência para a Indústria 4.0 (RAMI 4.0), assim, assegurou alinhamento às dimensões de ciclo de vida, hierarquia e camadas funcionais. A validação ocorreu por meio da aplicação da plataforma em um braço robótico industrial, a qual demonstrou a viabilidade técnica da proposta.

O estudo de Lins et al. (2017) apresentou uma metodologia para o *retrofit* de máquinas CNC alinhada aos princípios da Indústria 4.0, organizada em etapas sequenciais. Inicialmente, realizou-se a análise do contexto operacional da máquina, ao identificar suas limitações tecnológicas e requisitos funcionais. Em seguida, foram definidos os parâmetros de *design* e a arquitetura do sistema, contemplando a aquisição de dados por meio de sensores e dispositivos IoT. A metodologia também estabeleceu um modelo de dados padronizado para permitir comunicação e rastreabilidade, ao incluir a integração de tecnologias como RFID (*Radio Frequency Identification* - Identificação Por Radiofrequência) para monitoramento de peças. Posteriormente, propõe-se a conexão da máquina a uma infraestrutura digital capaz de suportar comunicação em rede e compartilhamento de informações em tempo real. Por fim, o modelo considerou a integração entre sistemas produtivos e recursos humanos, o que viabilizou a transparência, monitoramento e suporte

à tomada de decisão.

No trabalho de Lima, Massote e Maia (2019), a metodologia envolveu a integração de um sensor industrial de medição de energia em uma máquina CNC para coletar dados de consumo em tempo real, conectando-a a uma arquitetura IoT. Os dados medidos foram transmitidos por meio de um *gateway* IoT para a nuvem, onde puderam alimentar um modelo digital de monitoramento e fornecer informações para parceiros externos. Para gerenciar os protocolos de comunicação e a construção das mensagens apropriadas, utilizou-se o *software* Node-RED, enquanto uma aplicação móvel foi desenvolvida para visualização e acompanhamento dos dados energéticos em tempo real. Essa abordagem demonstrou ser uma forma viável de realizar o *retrofit* em máquinas legadas com conectividade e monitoramento alinhados ao conceito de Indústria 4.0.

Os estudos analisados abordam o *retrofit* digital em distintos contextos industriais, como máquinas CNC, braços robóticos e sistemas de automação integrados a arquiteturas ciberfísicas. Embora não tratem diretamente do *retrofit* de CLPs, apresentam estratégias e estruturas tecnológicas aplicáveis à modernização desses controladores, uma vez que os CLPs frequentemente compõem o núcleo de controle dos equipamentos industriais legados. Em comum, observa-se a incorporação de camadas de aquisição de dados, o uso de sensores adicionais, a integração via *gateways* IoT e a adoção de protocolos padronizados, como o OPC UA, para viabilizar a comunicação digital.

Tais elementos são igualmente necessários quando se busca atualizar CLPs antigos para integração com sistemas de nível superior ou com arquiteturas alinhadas à Indústria 4.0. Assim, essas pesquisas oferecem fundamentos metodológicos e técnicos que subsidiam a proposição de estratégias específicas para o *retrofit* de CLPs, especialmente no que se refere à coleta estruturada de dados, sua virtualização e posterior integração com sistemas ciberfísicos.

3.4 Enquete

Para contribuir com as análises realizadas nos trabalhos estudados durante a revisão da literatura, decidiu-se conduzir uma enquete direcionada aos profissionais que atuam na área de Tecnologia Operacional (TO), em particular aqueles que trabalham de forma direta ou indireta com Controladores Lógicos Programáveis antigos nas indústrias brasileiras. Desse modo, ao considerarmos que a coleta de dados em pesquisas qualitativas pode ser feita com amostras menores, como sugerido por Creswell e Miller (2000), foi entrevistado um subconjunto de 23 pessoas, o qual compreendeu 9 especialistas e 14 profissionais operacionais, todos localizados na região interior do estado de São Paulo, Brasil.

Os participantes foram selecionados por conveniência, ou seja, indivíduos disponíveis e dispostos a participar da enquete. Entre os especialistas, três eram professores universitários e seis eram instrutores técnicos, enquanto os profissionais operacionais eram catorze trabalhadores de chão de fábrica. A pesquisa teve como público-alvo indivíduos com experiência prática e conhecimento técnico no contexto de CLPs legados. A distribuição detalhada dos participantes da enquete é apresentada na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5 – Distribuição dos Participantes da Enquete

Categoria	Subcategoria	Instituição/Empresa
Especialistas (9)	Ensino Superior (3)	USP, UFSCar, UNESP
	Ensino Técnico (6)	SENAI, ETEC
Operários de chão de Fábrica (14)	São Carlos (6)	Volkswagen do Brasil, Correntes São Carlos, Electrolux, Faber-Castell, Tapetes São Carlos, Tecumseh do Brasil
	Rio Claro (4)	Whirlpool Brasil, Agroceres, Cerâmica Delta, Owens Corning
	Araraquara (3)	CUTRALE LTDA, Indalfa Plásticos LTDA, LUPO S.A.
	Itirapina (1)	Honda Automóveis do Brasil LTDA

Fonte: Elaborado pelo autor.

O questionário consistiu em quatro perguntas abertas elaboradas para identificar CLPs tradicionalmente empregados, limitações técnicas, protocolos de comunicação e estratégias de integração. As perguntas foram estruturadas para obter tanto informações factuais quanto as percepções dos participantes.

Q1: Quais fabricantes e modelos de CLPs antigos são comumente utilizados nas indústrias do Brasil?

RQ1: Fabricante: Siemens, Schneider, Allen-Bradley, Omron, Weg, Festo e Mitsubishi.

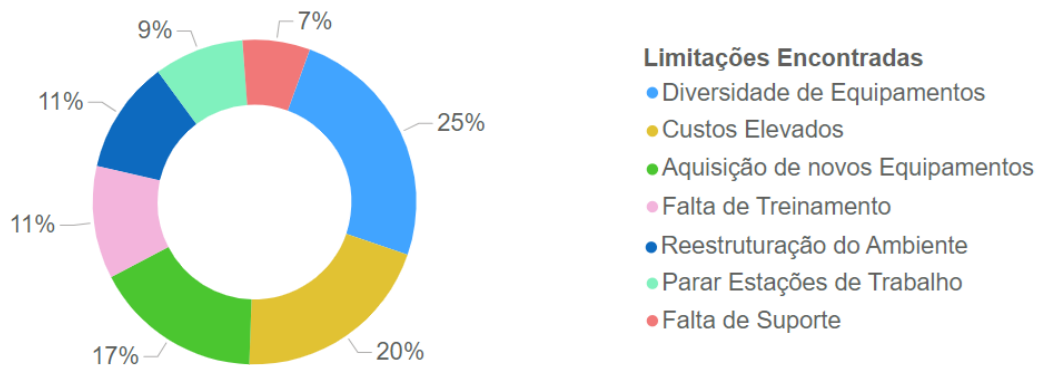
Modelos: S7-1200, S7-1500, V PROCESS UNY 571X4 ETH, MicroLogix 1400, CPM2E, TPW03, CECC e FX3U.

Q2: Quais limitações são encontradas no processo de integração entre CLPs antigos e outros equipamentos? (marque mais de uma opção, se necessário).

- a) Diversidade de Equipamentos
- b) Falta de Suporte
- c) Reestruturação do Ambiente
- d) Parar Estações de Trabalho
- e) Custos Elevados
- f) Aquisição de novos Equipamentos
- g) Falta de Treinamento

RQ2: A maior parte das respostas apontou mais de um fator como limitação, entre os itens mais mencionados, destacaram-se a diversidade de equipamentos e o custo elevado, que geralmente está associado à aquisição de novos dispositivos, à reestruturação do ambiente industrial ou à necessidade de interrupção nas operações das estações de trabalho. A distribuição desses fatores pode ser visualizada proporcionalmente no gráfico de rosca da Figura 10 a seguir.

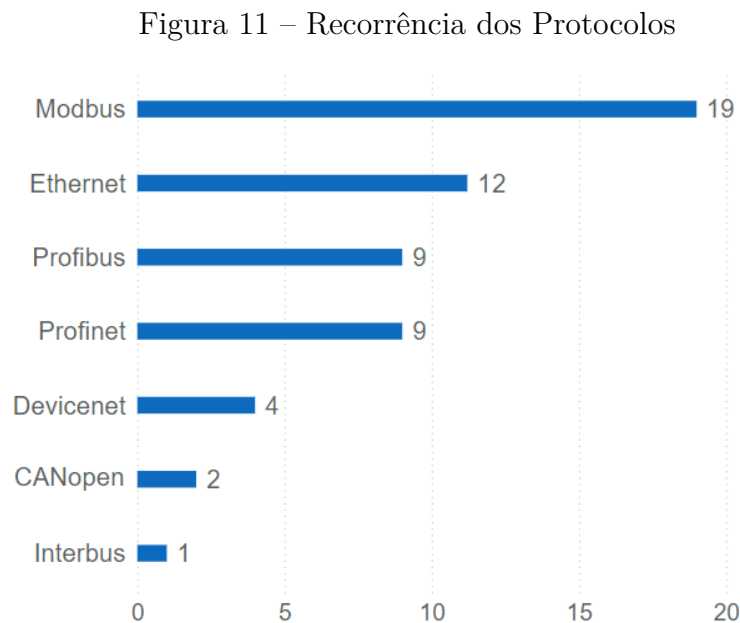
Figura 10 – Limitações Encontradas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Q3: Na indústria brasileira, ao considerar CLPs antigos, quais protocolos são observados com maior frequência?

RQ3: A distribuição apresentada na Figura 11 permite visualizar os protocolos mais frequentemente associados a CLPs legados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Q4: Quais são as suas sugestões ao conduzir a integração entre CLPs antigos e outros equipamentos?

RQ4: A maior parte dos profissionais consultados mencionou a adição de *gateways* baseados em IoT para promover a conectividade entre dispositivos industriais.

Durante as entrevistas, muitos participantes destacaram que os custos associados à modernização dos equipamentos figuram entre os principais fatores a serem considerados, especialmente no contexto de pequenas e médias empresas. Ficou evidente também que poucos conduziram processos de integração entre equipamentos com uma abordagem apoiada exclusivamente em *software*, visto que, ao serem questionados sobre possíveis práticas de *retrofit* digital, a maioria demonstrou conhecer ou utilizar soluções que oferecem a comunicação de sistemas baseada em dispositivos IoT.

Outro aspecto percebido foi que os gestores demandam a atualização das linhas de produção, com exigências como: não interromper as estações de trabalho ou, se necessário, que a paralisação ocorra pelo menor tempo possível.

3.5 Considerações Finais

Na análise dos trabalhos e da enquete realizada, é possível inferir que, ao considerarmos o processo de modernização de equipamentos industriais, algumas ponderações devem ser feitas para nortear ações coerentes e assertivas. Nesse contexto, é fundamental conhecer aspectos como: características e limitações do equipamento, particularmente no caso dos CLPs; os protocolos de comunicação suportados; bem como o custo e o tempo necessários para a conclusão desse processo. Tais informações são determinantes para definir critérios e avaliar o cenário com maior precisão.

Este arcabouço conceitual favoreceu o aprofundamento em pautas que foram posteriormente exploradas nesta pesquisa, assim como na concepção teórica dos experimentos e testes realizados, o que possibilitou a compreensão das técnicas empregadas na proposição desta dissertação. A seguir, no Capítulo 4, será descrita a integração dos métodos mencionados.

4 . METODOLOGIA

A seguir, será apresentada uma proposição inspirada na abordagem descrita no livro *Design Science Research* (DSR) de Dresch, Lacerda e Junior (2020), a qual busca definir diretrizes para articular o rigor acadêmico com soluções práticas. A DSR tem como objetivo o desenvolvimento e a validação de artefatos¹, ou seja, propostas tangíveis para desafios concretos. A metodologia sugere que soluções baseadas nessa diretriz podem ser aplicadas nos contextos em que estão inseridas. Essa característica é relevante para o presente estudo, que busca ir além da teorização ao propor uma perspectiva prática para a modernização de processos fabris. Nesse aspecto, a pesquisa contempla a extração de dados de CLPs (Controladores Lógicos Programáveis) por meio do *retrofit* digital e integração de sistemas apoiada em *low-code*.

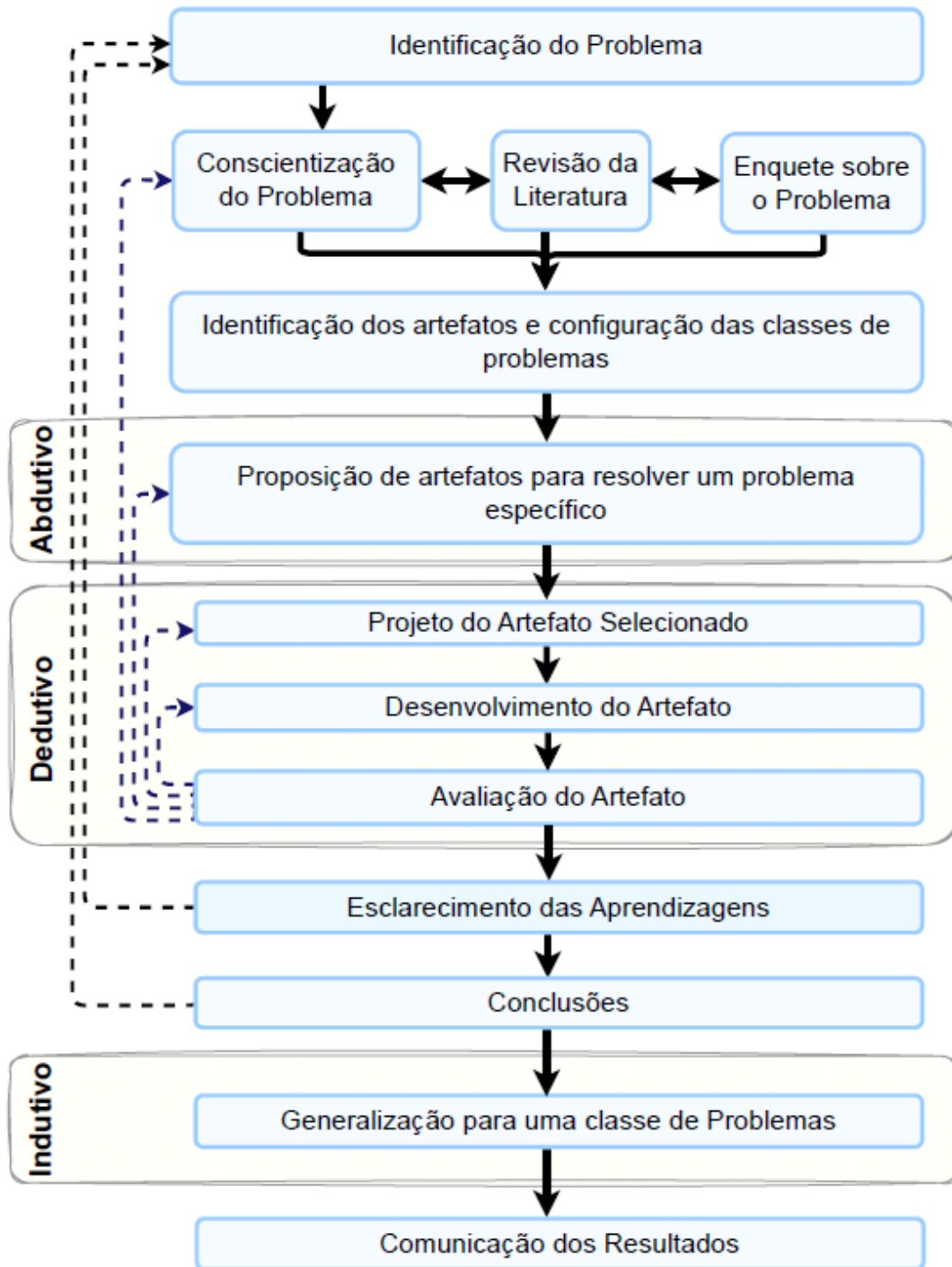
Durante as etapas de aplicação, são utilizados os raciocínios abduutivo, dedutivo e indutivo, os quais ajudam a desenvolver e validar soluções de forma estruturada. A abdução é o ponto de partida; com base em observações e criatividade, criam-se hipóteses iniciais para resolver problemas. Em seguida, a dedução aplica a lógica para testar se essas hipóteses fazem sentido. Por fim, a indução avalia as soluções em experimentos práticos, ao observar padrões que confirmam ou não sua eficácia. Juntas, essas análises asseguram que as soluções propostas sejam coerentes e bem fundamentadas.

Além disso, a metodologia *Design Science Research* também possui um caráter iterativo e multidisciplinar, orientado à evolução incremental do artefato por meio de avaliações sucessivas. Essa característica está alinhada com as expectativas desta proposição. Nessa circunstância, a adoção da DSR incentiva a contribuição tanto para o avanço acadêmico quanto para a implementação de soluções viáveis para o parque industrial de pequenas e médias empresas.

O método apresentado a seguir, ilustrado na Figura 12, é inspirado na proposta de Dresch, Lacerda e Junior (2020) e incorpora uma adaptação que inclui uma etapa adicional intitulada “Enquete sobre o Problema”, com o objetivo de adequar a metodologia ao presente estudo. No modelo sugerido, as setas contínuas representam o fluxo sequencial de execução entre cada etapa, enquanto as setas tracejadas indicam as possíveis realimentações entre etapas correlacionadas, o que favorece ajustes e adequações ao longo do processo de execução.

¹ Interface entre o ambiente interno e externo de um determinado sistema, desenvolvida pelos seres humanos para alcançar um objetivo específico (DRESCH; LACERDA; JUNIOR, 2020).

Figura 12 – Fluxograma desenvolvido com base na proposição de Dresch et al. (2015).



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1 Identificação do Problema

Inicialmente, foi dedicado tempo ao reconhecimento e à identificação do problema. Como motivação, buscou-se compreender, em linhas gerais, os processos mais comuns de

uma linha de produção industrial autônoma, o funcionamento das estações de trabalho, a relação homem-máquina, e os desafios enfrentados para manter as indústrias competitivas, com interesse em pequenas e médias empresas. Para isso, foram estudados os diferentes paradigmas industriais e os estágios de transformação tecnológica e organizacional pelos quais as indústrias passaram e continuam a evoluir, impulsionadas pela necessidade de adaptação e inovação. Esse movimento visa otimizar operações, reduzir custos, melhorar a eficiência e atender às novas demandas do mercado e da sociedade.

Nesse contexto, após uma compreensão ampla do cenário atual, optou-se por estudar a indústria brasileira com foco nas etapas de transição da Indústria 3.0 para a Indústria 4.0, ao considerarmos que a maior parte do parque fabril nacional ainda não atende às exigências da Indústria 4.0 (NARA et al., 2021). Assim, ao analisar automações industriais competitivas, observou-se que os CLPs demonstram ser equipamentos amplamente utilizados por sua capacidade de controlar e monitorar máquinas, sistemas e processos fabris (PAPULOVÁ; GAŽOVÁ; ŠUFLIARSKÝ, 2022).

O procedimento de atualização de equipamentos industriais antigos ganha relevância no contexto brasileiro, em particular nas pequenas e médias empresas que enfrentam restrições financeiras, limitações tecnológicas e baixa maturidade digital, fatores que dificultam a substituição integral de seus sistemas produtivos (ELHUSSEINY; CRISPIM, 2022; BAIIO; CARRER, 2022). Ao considerarmos que a atualização completa para padrões compatíveis com a Indústria 4.0 frequentemente exige elevados investimentos e a renovação de equipamentos (YIN; STECKE; LI, 2018), o *retrofit* apresenta-se como alternativa estratégica para modernizar a infraestrutura fabril sem a necessidade de substituição total dos ativos (STOCK; SELIGER, 2016). Em especial no caso dos CLPs, cuja expectativa de vida útil pode ultrapassar duas décadas (CARLO et al., 2021), a longevidade desses dispositivos reforça a necessidade de soluções que garantam sua atualização funcional e integração a arquiteturas mais recentes (RUPPRECHT et al., 2021).

Na modernização de CLPs, há a possibilidade de adicionar novos equipamentos para favorecer a captura de dados ou adotar soluções baseadas em *software*, que envolvem a adaptação de programas existentes e a utilização de protocolos de comunicação suportados por esses dispositivos, como o Modbus², integrando-os a sistemas mais modernos (GIVEHCHI et al., 2017). A integração tecnológica constitui uma etapa fundamental no contexto da Indústria 4.0. Nesse sentido, este estudo propõe a mitigação dos custos associados ao processo de *retrofit* industrial, por meio de uma abordagem predominantemente digital, que demanda mínima intervenção física, utilizando *gateways* de baixo custo para viabilizar a extração de dados de equipamentos que não dispõem de suporte nativo aos padrões atuais de redes industriais.

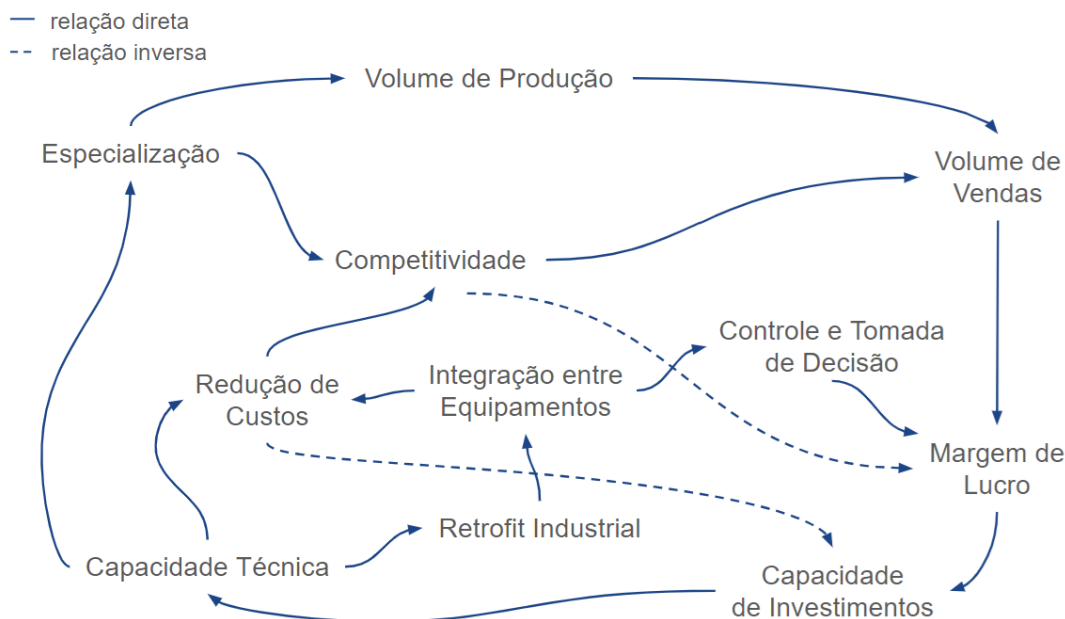
² Um dos protocolos de comunicação mais antigos usados na conectividade em sistemas de automação industrial (FOVINO et al., 2009).

A fase inicial de compreensão e identificação do problema, assim como o arcabouço teórico e técnico que norteiam a pesquisa, foram apresentados nos Capítulos 1 e 2 desta dissertação.

4.2 Conscientização do Problema

No decorrer da etapa de compreensão, optou-se por uma estratégia fundamentada em uma estrutura sistemática, a qual, de acordo com Senge (2018), é uma representação das relações do tipo causa e efeito, que contribui para identificar as associações entre os elementos do problema. Assim, a ilustração da Figura 13 compreende um modelo de interdependência entre diferentes aspectos do processo de produção industrial, onde cada componente (por exemplo, volume de vendas, margem de lucro, capacidade técnica e competitividade) está conectado por relações de causa e efeito. Essas interações refletem como a evolução ou regressão de um fator afeta diretamente ou inversamente outros componentes no sistema, o que comprova a dinamicidade da produção industrial. A representação na Figura 13 a seguir foi desenvolvida de acordo com as asserções apresentadas por Dresch et al. (2015).

Figura 13 – Produção Industrial



Fonte: Elaborado pelo autor.

As relações diretas indicam que um fator exerce impacto direto e positivo sobre outro. Ou seja, quando o primeiro fator aumenta, o segundo também tende a aumentar. Por exemplo, o crescimento no volume de vendas afeta positivamente a margem de lucro. Já a relação inversa, como entre a competitividade e a margem de lucro, ou entre a redução de custos e a capacidade de investimentos, demonstra como a otimização de um elemento

pode comprometer outro. Por exemplo, existe uma relação inversa entre a redução de custos e o potencial de investir: quanto mais a empresa economiza no curto prazo, menor é sua capacidade de realizar novos investimentos.

A abordagem sistêmica favoreceu a compreensão das inter-relações entre processos industriais e serviu como um modelo para entender as fases de produção, em particular como o *retrofit* pode influenciar de maneira positiva o desempenho e a eficiência ao promover a integração de equipamentos. Isso contribui para um maior controle e para a tomada de decisões, ao longo da análise do problema, ficou evidente que o *retrofit* é uma alternativa viável para garantir a conectividade de sistemas industriais. Contudo, é importante destacar que essa estratégia possui potencialidades e limitações inerentes à capacidade dos equipamentos aos quais será aplicada.

A compreensão do problema está relacionada à revisão da literatura e às ponderações observadas na enquete realizada. Isso indica que a análise deve ser considerada um componente dinâmico, que se ajusta à medida que novos conhecimentos são incorporados.

4.3 Revisão da Literatura

Os trabalhos analisados estão disponíveis em periódicos, como *IEEE Xplore*, *Scopus*, *Science Direct* e *ACM - Association for Computing Machinery*, os quais se mostram relevantes nas áreas de engenharia e tecnologia, pois reúnem estudos atualizados que influenciam práticas e inovações no setor (AMPATZOGLOU; STAMELOS, 2010). Em particular, as pesquisas consideradas durante a revisão da literatura abordaram temas relacionados à integração de equipamentos industriais legados, com ênfase na utilização de *software*. O protocolo OPC UA se destacou como o mais utilizado nas comunicações entre dispositivos que suportam tal padrão. Algumas razões para essa predominância são: a capacidade de facilitar a conectividade entre diferentes sistemas, a segurança na troca de dados, a escalabilidade e flexibilidade para suportar uma variedade de dispositivos (IMTIAZ; JASPERNEITE, 2013).

De maneira adicional, soluções baseadas em plataformas *open source*, como Node-RED, emergiram nos últimos anos como alternativas viáveis para conectar equipamentos e capturar dados. Por meio da integração com diversos protocolos, essas plataformas se consolidam como opções adaptáveis e eficazes (TORRES et al., 2020). No contexto de *retrofit* apoiado pela IoT, o protocolo MQTT se destacou como o mais recorrente, demonstrando versatilidade e eficiência na comunicação entre dispositivos. Essas evidências foram observadas na análise da revisão da literatura realizada no Capítulo 3, que também destacou que a integração de equipamentos legados favorece a transição da Indústria 3.0 para a 4.0.

O *retrofit* é particularmente oportuno em países como o Brasil, onde muitas

indústrias ainda se encontram em estágios iniciais ou intermediários de adoção da Indústria 4.0, enfrentando barreiras tecnológicas, organizacionais e financeiras que limitam a plena integração de sistemas e processos (REIS; JÚNIOR, 2024). A revisão da bibliografia estudada sustentou a premissa de realizar a integração entre diferentes equipamentos e protocolos de comunicação. Assim, ao longo da análise dos trabalhos, ficou clara a proeminência da temática *retrofit* no ambiente científico e como pesquisas acadêmicas podem nortear ações práticas.

4.4 Enquete

A realização da enquete teve como principal motivação avaliar as percepções e os desafios enfrentados pelos profissionais da área de Tecnologia Operacional (TO) em relação à modernização e integração de equipamentos nas indústrias brasileiras, com foco principal em CLPs. A análise foi desenvolvida em uma amostra de 23 indivíduos, sendo 9 especialistas (divididos entre 3 professores de nível superior e 6 de nível técnico) e 14 profissionais que atuam diretamente no chão de fábrica. O objetivo foi aproximar a teoria observada na revisão literária à realidade concreta. A partir das respostas obtidas, foi possível não apenas aprofundar a compreensão sobre a dinâmica atual das indústrias, mas também identificar questões críticas que influenciam o processo de inovação, como os custos envolvidos e a preferência por soluções que minimizem o impacto nas operações diárias.

Nesse contexto, a maioria dos profissionais ressaltou que o custo da modernização é um dos principais fatores de decisão, em especial para pequenas e médias empresas. Outro ponto observado foi que poucos mencionaram a adoção de uma abordagem de integração baseada exclusivamente em *software*. Os gestores, por sua vez, destacaram uma particular preocupação com a atualização das linhas de produção, ao sugerir que as estações de trabalho não deveriam ser interrompidas ou que o tempo de parada deveria ser minimizado. Assim, a enquete se mostrou um instrumento "dinâmico", passível de ajustes conforme o método proposto for implementado, com novas edições realizadas para validar e aprimorar as soluções com base nas ponderações dos participantes.

4.5 Identificação dos Artefatos e Configuração das Classes de Problema

Nesta seção são apresentados os componentes fundamentais que orientam o desenvolvimento e a aplicação de soluções para desafios práticos, observados nas seções anteriores.

4.5.1 Identificação de Tecnologias Potenciais para Composição do Artefato

Para identificar tecnologias candidatas à composição do artefato, no contexto de *retrofit* digital e integração de sistemas associados a CLPs legados, avaliamos elementos que atuam como interfaces entre o sistema de automação existente e as necessidades do mercado.

4.5.2 Protocolo de Comunicação OPC UA

- **Descrição:** padrão de comunicação industrial introduzido em 2008, voltado à conectividade entre dispositivos e sistemas heterogêneos, desde que compatíveis com sua especificação (BARTNITZKI, 2017).
- **Objetivo:** possibilitar a comunicação padronizada, segura e escalável entre equipamentos industriais e sistemas externos.

4.5.3 Plataformas de Integração Open Source e Low-Code

- **Descrição:** utilização de plataformas de integração de dados baseadas em código aberto e com abordagem *low-code*, como Node-RED e BIPES, que permitem orquestrar fluxos de informação entre dispositivos industriais e serviços externos.
- **Objetivo:** viabilizar a captura, o processamento e a redistribuição de dados provenientes de CLPs, facilitando a integração com serviços em rede e aplicações IoT.

A identificação dessas tecnologias delimita o espaço de possíveis intervenções voltadas à modernização de CLPs legados. Sob a perspectiva da DSR, tais elementos não são apenas recursos tecnológicos disponíveis, mas candidatos a compor a solução projetada para a classe de problema investigada.

4.5.4 Configuração da Classe de Problema

Na DSR, a classe de problema representa o conjunto de situações recorrentes que demandam intervenção por meio de artefatos. Neste estudo, a classe de problema está associada às limitações técnicas encontradas na modernização e integração de sistemas de automação industrial legados, em particular aqueles baseados em CLPs.

4.5.5 Necessidade de Conectividade

- **Problema:** grande parte das pequenas e médias indústrias no Brasil opera com equipamentos legados que não oferecem suporte nativo a padrões modernos de comunicação (REIS; JÚNIOR, 2024), o que dificulta a integração entre sistemas.

- **Mecanismo de Solução:** protocolos padronizados de comunicação, como o OPC UA, podem mitigar essa limitação ao fornecer uma camada comum de conectividade.

4.5.6 Captura de Dados

- **Problema:** dificuldade na coleta, estruturação e disponibilização de dados oriundos de CLPs, em específico quando os equipamentos em operação não são compatíveis com protocolos modernos.
- **Mecanismo de Solução:** plataformas de integração como Node-RED e BIPES permitem intermediar a comunicação entre protocolos legados e serviços modernos de armazenamento ou visualização.

4.6 Proposição de Artefatos para Resolver um Problema em Específico

Embora OPC UA e plataformas de integração sejam tecnologias já consolidadas no mercado, nesta pesquisa elas não são tratadas como artefatos isolados, mas como componentes estruturais de um artefato composto de *retrofit* digital. Assim, a contribuição desta dissertação não consiste na criação de uma nova tecnologia, mas na proposição de um modelo estruturado que integra esses elementos para resolver a classe de problema identificada.

A partir da delimitação da classe de problema, esta seção apresenta a proposição de artefatos concebidos como parte da solução projetada. Sob a perspectiva da *Design Science Research*, o *retrofit* digital é tratado como um artefato composto por métodos, configurações e tecnologias que permitem estender a vida útil de sistemas industriais legados (JASPERT et al., 2021). A proposta concentra-se na modernização predominantemente por meio de *software*, explorando a adaptação de códigos existentes e a incorporação de mecanismos de conectividade compatíveis com os recursos técnicos dos CLPs analisados.

4.6.1 Análise de Viabilidade

- **Descrição:** proposição de um procedimento sistemático para avaliar a viabilidade técnica do *retrofit* digital em CLPs legados.
- **Objetivo:** verificar se os recursos de *hardware*, *firmware* e comunicação disponíveis permitem intervenções baseadas predominantemente em atualização de *software*.

4.6.2 Atualizar Instruções e Código da Aplicação

- **Descrição:** adaptação ou reestruturação do código existente no CLP, incluindo ajustes em rotinas de comunicação.

- **Objetivo:** adequar o *software* do CLP, de modo a propiciar a extração dos dados.

4.6.3 Protocolo de Comunicação OPC UA

- **Descrição:** entre as tecnologias identificadas na etapa anterior, o protocolo OPC UA é incorporado ao artefato quando suportado pelos dispositivos analisados. Dessa forma, sua adoção ocorre nos casos em que o CLP ou dispositivos intermediários ofereçam suporte ao padrão.
- **Objetivo:** estabelecer um mecanismo de conectividade compatível com arquiteturas industriais modernas (DERHAMY et al., 2017).

4.6.4 Plataformas de Integração Open Source e Low-Code:

- **Descrição:** utilização de plataformas de integração como camada intermediária entre CLPs e sistemas externos, uma vez que tais ferramentas possibilitam a comunicação entre diversos dispositivos e protocolos.
- **Objetivo:** operacionalizar a captura e o encaminhamento de dados, reduzir a necessidade de desenvolvimento extensivo de *software* proprietário.

4.7 Projeto do Artefato Selecionado

Enquanto a seção anterior apresentou a arquitetura conceitual do artefato e delimitou seus componentes estruturais para a solução da classe de problema identificada, esta seção dedica-se ao detalhamento técnico de sua implementação. Sob a perspectiva da *Design Science Research*, esta etapa representa a transição da proposição conceitual para a especificação operacional do artefato. Assim, os componentes previamente definidos; análise de viabilidade, atualização do código da aplicação, mecanismos de conectividade baseados em OPC UA e o uso de plataformas de integração *open source* e *low-code*; passam a ser descritos em termos de sua estrutura interna, rotinas de execução, critérios de implementação e mecanismos de validação. Dessa forma, evidencia-se como esses elementos são integrados de maneira sistemática para garantir utilidade, viabilidade técnica e aplicabilidade em contexto industrial real.

4.7.1 Análise de Viabilidade

Essa etapa tem como finalidade examinar as condições técnicas e operacionais necessárias para a modernização de CLPs legados por meio de intervenções predominantemente baseadas em *software*. As subseções seguintes apresentam os procedimentos, critérios e instrumentos utilizados nessa análise.

- **Descrição:** realiza-se um estudo estruturado, fundamentado na análise de manuais, *datasheets* e documentação técnica dos CLPs legados, permitindo identificar recursos disponíveis, limitações de *hardware* e possibilidades de integração com tecnologias contemporâneas.
- **Objetivo:** avaliar a viabilidade da atualização de CLPs antigos considerando aspectos técnicos e operacionais, tais como suporte a protocolos de comunicação, capacidade de processamento, limitações em *hardware* além de identificar riscos e desafios associados ao processo de *retrofit*.
- **Rotina de Execução**
 - **Etapas**
 1. **Revisão de manuais e *datasheets*:** análise da documentação técnica dos CLPs legados para identificação de recursos disponíveis e restrições operacionais.
 2. **Análise de compatibilidade:** verificação da compatibilidade entre os protocolos suportados pelos equipamentos e as tecnologias contemporâneas de integração.
 3. **Estudo de caso:** avaliação de cenários práticos para identificar benefícios, limitações e impactos da modernização baseada em *software*.
 4. **Relatório de viabilidade:** elaboração de um relatório técnico capaz de indicar se o *retrofit* digital é uma alternativa viável e sob quais condições.
- **Ferramentas e Tecnologias**
 - Documentação técnica dos fabricantes.
 - Ferramentas de simulação de processos industriais para testar a integração dos CLPs atualizados com o restante da fábrica (Siemens Tecnomatix Plant Simulation, AnyLogic, FlexSim, entre outras).
 - *Softwares* de apoio à análise de custos e desempenho do projeto.

4.7.2 Atualizar Instruções e Código da Aplicação

- **Descrição:** implementa-se a modificação dos códigos existentes e a realização de ajustes nas configurações dos CLPs legados, com o propósito de viabilizar a integração com outros dispositivos e sistemas.
- **Objetivo:** adequar o *software* dos CLPs ao processo de *retrofit*, permitindo a transmissão, captura e disponibilização de dados por meio dos protocolos suportados pelos equipamentos, priorizando soluções baseadas em *software*.

- **Projeto do Artefato**

- **Etapas**

1. **Análise do código existente:** compreensão da lógica de controle implementada e identificação dos pontos que necessitam de adaptação para suportar a troca de dados.
2. **Configuração para estabelecer conectividade:** habilitação e parametrização das funcionalidades de comunicação disponíveis no CLP.
3. **Testes de integração:** validação da troca de informações em ambiente simulado ou controlado, assegurando a integridade dos dados e o funcionamento adequado do sistema.

- **Ferramentas e Tecnologias**

- Ambiente de desenvolvimento (CODESYS, TIA Portal, TPW-PCLINK, entre outros).
- Protocolos suportados pelos CLPs, predileção ao OPC UA.
- Simuladores e ferramentas de teste para validação do sistema antes da aplicação em ambiente industrial.

4.7.3 Protocolo de Comunicação OPC UA

- **Descrição:** este componente propõe a utilização do protocolo OPC UA nos CLPs que suportarem esse padrão, conforme identificado na análise de viabilidade. O OPC UA é adotado por favorecer a conectividade entre dispositivos e sistemas heterogêneos em ambientes industriais.
- **Objetivo:** implementar o protocolo OPC UA como meio de comunicação entre CLPs legados e sistemas modernos, garantindo uma troca de dados segura, escalável e padronizada.

- **Estrutura Operacional**

- **Etapas**

1. **Configuração inicial do protocolo:** habilitação do suporte ao OPC UA no ambiente de desenvolvimento do CLP.
2. **Implementação no código do CLP:** adaptação do programa do CLP para disponibilizar variáveis e dados por meio do OPC UA.
3. **Testes de conectividade:** validação da comunicação com sistemas de terceiros, assegurando consistência e confiabilidade na troca de dados.

- **Ferramentas e Tecnologias**

- Ferramentas de diagnóstico e monitoramento para OPC UA (*UA Expert*).
- CLPs com suporte nativo ou configurável ao protocolo OPC UA.

4.7.4 Plataformas de Integração Open Source e Low-Code

- **Descrição:** contempla o uso de plataformas de integração *open source* e *low-code* para gerenciar fluxos de dados entre CLPs legados e sistemas externos, permitindo a coleta, o processamento e a visualização das informações.
- **Objetivo:** facilitar a integração dos CLPs com sistemas de nível superior por meio de soluções flexíveis e de baixo custo, viabilizando o *retrofit* mesmo em cenários com restrições de *hardware* e conectividade.

- **Procedimentos de Implementação**

- **Etapas**

1. **Instalação e configuração:** instalar o Node-RED em um servidor local ou na nuvem, configurando-o para se comunicar com os CLPs por meio de protocolos disponíveis, como OPC UA, Profibus, Modbus, entre outros. Se a conexão direta entre o CLP e o servidor não for viável, um dispositivo IoT poderá ser utilizado como intermediário, neste caso, o BIPES será adotado como ferramenta de apoio.
2. **Criação de fluxos de dados:** desenvolver estruturas para captura e processamento de dados provenientes de contadores, temporizadores e variáveis de processo.

- **Ferramentas e Tecnologias**

- Node-RED e BIPES como principais ferramentas de desenvolvimento.
- Protocolos de comunicação (OPC UA, Profibus, Modbus, entre outros).
- Linguagens de programação que favoreçam a integração (Java, Python, C++, entre outras).
- Sistemas de armazenamento e visualização de dados (MySQL, InfluxDB, Grafana, Power BI entre outros).

4.8 Desenvolvimento do Artefato

Nesta etapa, focou-se na implementação do artefato proposto, com ênfase na integração de equipamentos legados ao ambiente digital, com o objetivo de promover a

captura de dados e melhorar o gerenciamento e controle industrial. Para isso, utilizamos o Node-RED como plataforma de integração e automação, capaz de interagir tanto com o protocolo OPC UA quanto com outros protocolos suportados pelos CLPs, conforme definido na fase de análise técnica.

Dessa forma, foi conduzido um levantamento detalhado sobre o CLP a ser integrado, utilizando manuais técnicos e *datasheets* para identificar as capacidades nativas de comunicação do dispositivo. Em relação ao protocolo, sempre que possível, a comunicação foi implementada via OPC UA, por ser um padrão amplamente utilizado na conectividade de sistemas industriais e alinhado aos objetivos da Indústria 4.0 (GONZÁLEZ et al., 2019). Nos casos em que o equipamento não oferecer suporte ao OPC UA, a solução perpassa por adequação ao protocolo suportado nativamente, como Modbus, Profibus, Ethernet ou outros, de forma a garantir a congruência com as plataformas adotadas.

Ao considerar circunstâncias em que a conexão direta entre o CLP e o servidor não é viável, a solução compreende o uso de dispositivos de arquitetura aberta e baixo custo, comumente empregados em aplicações de IoT (MARTIKKALA, 2024), que atuam como intermediários entre o CLP e o servidor (KINGSTON et al., 2024). Esses dispositivos incluem, por exemplo, plataformas baseadas em microcontroladores, como variações de ESP, amplamente utilizadas em soluções embarcadas e de integração. Nesse contexto, adota-se a plataforma BIPES como ambiente de desenvolvimento e execução das aplicações, permitindo a integração com diferentes protocolos de comunicação, entre eles o MQTT, para o estabelecimento da comunicação com o servidor (SILVA, 2020). A proposta de desenvolvimento foi estruturada de modo a garantir a uniformização dos dados capturados, facilitando sua análise posterior.

O artefato apresentado permite não apenas a digitalização de processos que utilizam CLPs legados, mas também contribui para a criação de uma base que pode favorecer a evolução de infraestruturas industriais, frequentemente associadas ao paradigma da Indústria 3.0, em direção a abordagens alinhadas aos princípios da Indústria 4.0. O monitoramento contínuo dos dados capturados possibilita uma maior visibilidade sobre a operação dos equipamentos, o que pode ampliar o controle gerencial e subsidiar ações proativas baseadas em dados.

Ressalta-se, no entanto, que essa evolução depende de fatores adicionais, como a infraestrutura existente, o nível de integração entre sistemas e a adoção de outras tecnologias complementares. Nesse sentido, a abordagem proposta atua como um elemento facilitador, ao contribuir para a melhoria contínua dos fluxos produtivos e para o avanço da transformação digital em contextos industriais específicos.

4.9 Avaliação do Artefato

A validação da proposição desenvolvida envolveu estratégias técnicas e práticas voltadas à verificação da aplicabilidade da solução proposta. Para isso, foram desenvolvidos experimentos controlados e protótipos funcionais, apresentados de forma detalhada no Capítulo 5. Em virtude disso, foram considerados critérios relacionados à conectividade, coleta de dados e segurança cibernética, os quais são requisitos primários ao se tratar do *retrofit* de sistemas ciberfísicos em ambientes industriais (HELU et al., 2016).

A avaliação do artefato foi conduzida por meio de experimentos controlados e protótipos funcionais, estratégia comum na *Design Science Research* para validar a utilidade e a viabilidade técnica de artefatos tecnológicos. A análise da conectividade foi efetuada com base na integração do CLP Siemens S7-1500 utilizando OPC UA e Node-RED, demonstrando a capacidade do artefato de operar em ambientes industriais com dispositivos de diferentes gerações. Em um teste prático, o sistema funcionou de forma estável por mais de 24 horas, sem apresentar falhas, o que demonstrou a robustez da solução e sua adequação para aplicações contínuas em processos industriais.

Ao considerarmos cenários nos quais o CLP não possui suporte ao protocolo OPC UA, foi adotado o CLP WEG TPW03, ajustado para operar com o protocolo Modbus RTU em conjunto com a plataforma Node-RED. Essa configuração possibilitou a integração eficiente do dispositivo a um servidor, promovendo um ambiente otimizado para a coleta e o processamento de dados. Durante os testes realizados, o sistema demonstrou um desempenho estável, o que evidencia a flexibilidade da solução em atender a dispositivos com tecnologias legadas. Essa abordagem revelou-se eficaz na unificação de dados provenientes de dispositivos heterogêneos, ao assegurar a consistência e a qualidade da comunicação.

Um terceiro experimento foi conduzido com o CLP WEG TPW03, no qual a conexão direta ao servidor via cabo foi substituída por uma configuração intermediada por um dispositivo IoT com comunicação *wireless*. O equipamento IoT foi conectado ao CLP via Modbus RTU e programado com a plataforma BIPES. Ao receber os dados do CLP, o dispositivo os envia ao servidor Node-RED por meio do protocolo MQTT, assim, eles são capturados e armazenados para posterior análise. Essa arquitetura demonstrou a viabilidade de integrar dispositivos legados a sistemas contemporâneos, com destaque para a flexibilidade da solução. O desempenho obtido durante os experimentos realizados indicou a estabilidade e a robustez da proposta no contexto avaliado.

Com o apoio de especialistas, como professores da área de Tecnologia Operacional (TO), buscou-se validar cada experimento e entender os impactos da comunicação entre diferentes protocolos e equipamentos na coleta e análise de dados. Durante essa fase, foi constatado que a latência, uma métrica tradicionalmente utilizada para comparar o desempenho de dispositivos e protocolos, apresentaria variações significativas devido às

diferenças entre os dispositivos e às tecnologias de comunicação adotadas. Por exemplo, ao compararmos padrões de comunicação por meio de interfaces físicas, como RS232 e Ethernet, no contexto de *retrofit*, observa-se que diferentes tecnologias apresentam comportamentos distintos em termos de latência e taxa de transmissão. A conectividade entre tecnologias legadas e modernas requer uma atenção especial, uma vez que as tecnologias mais antigas tendem a ter uma taxa menor na transmissão de dados e maior suscetibilidade a interferências. Esse ponto foi abordado pelos especialistas e também observado no trabalho de Figueroa-Lorenzo, Añorga e Arrizabalaga (2020).

A segurança cibernética também deve ser um ponto de atenção ao considerarmos ambientes críticos, em especial ao utilizar protocolos como o Modbus, que é amplamente reconhecido por suas vulnerabilidades (FERST et al., 2018). A necessidade de mitigar os riscos associados ao uso de tecnologias legadas foi identificada como um aspecto importante para garantir a viabilidade de sistemas ciberfísicos antigos em ambientes industriais modernos. O Node-RED demonstra ser flexível e capaz de suportar a implementação de soluções de segurança, conforme observado por Ferencz e Domokos (2019). De igual modo, o BIPES apresenta uma arquitetura extensível e permite o desenvolvimento de novos blocos programáveis, o que viabiliza incorporar funcionalidades específicas como mecanismos de segurança (JUNIOR et al., 2020b). Isso reforça a proposta de que tais plataformas podem servir como soluções centrais na transição de dispositivos e sistemas da Indústria 3.0 para a 4.0.

4.10 Esclarecimento das Aprendizagens

Ao longo do desenvolvimento e da avaliação do artefato, foram obtidas aprendizagens significativas, tanto no nível técnico quanto no processo de concepção e implementação de soluções voltadas à modernização da infraestrutura industrial. Uma das principais aprendizagens foi a importância de executar uma análise detalhada dos equipamentos legados, com base em manuais e *datasheets*. Durante a revisão bibliográfica, ficou evidente que, embora o protocolo OPC UA seja amplamente utilizado e recomendado para a Indústria 4.0, muitos dispositivos antigos não são compatíveis nativamente com esse padrão. Isso reforçou a necessidade de se orientar por materiais técnicos para identificar os protocolos suportados e adequar a integração.

Outra contribuição relevante foi a flexibilidade proporcionada por plataformas como Node-RED e BIPES. Tais ferramentas simplificam a conectividade entre dispositivos legados e modernos. Com uma abordagem baseada em *low-code*, ambas oferecem benefícios consideráveis, como a facilidade de uso e a baixa curva de aprendizado. Todavia, essa simplicidade não isenta o desenvolvedor da necessidade de um planejamento cuidadoso em relação à escalabilidade e à complexidade do ambiente. Isso ocorre pois, à medida que o projeto se expande, a organização e a manutenção dos blocos tornam-se fundamentais para

o desempenho da aplicação. Logo, a falta de atenção ao *design* da solução pode resultar em desafios na gestão.

Adicionalmente, ao considerarmos a integração de diferentes tecnologias de comunicação, é importante analisar o meio físico envolvido, como os cabos de comunicação. Tecnologias antigas, como os padrões RS232 e RS485, possuem limitações quando comparadas a propostas mais modernas, como Ethernet. Esse fator pode impactar diretamente a velocidade e a confiabilidade da comunicação entre os dispositivos. Nesse contexto, percebemos a importância de avaliar a infraestrutura física de comunicação ao considerar a frequência e o volume de dados trocados.

Além disso, o processo de validação do experimento, com o apoio de profissionais da área de Tecnologia Operacional (TO), destacou a importância de incluir usuários operacionais no desenvolvimento de soluções tecnológicas. A perspectiva desses profissionais foi relevante para compreender como o artefato poderia ser melhorado do ponto de vista da usabilidade e da eficiência no ambiente industrial. Isso demonstrou que, além da avaliação técnica de desempenho, é fundamental envolver os usuários finais para ajustar a solução às necessidades reais e expectativas do chão de fábrica.

4.11 Conclusões

A proposta demonstrou ser uma solução viável e eficaz para a modernização de equipamentos industriais, ao contribuir de maneira significativa para a transição da Indústria 3.0 para a Indústria 4.0. O artefato apresentado oferece uma abordagem flexível e adaptável, capaz de conectar dispositivos de diferentes gerações, garantindo a captura de dados essenciais para o controle e a tomada de decisões. Ao longo do processo, foi possível concluir que, embora o protocolo OPC UA seja a principal alternativa para a comunicação em ambientes industriais modernos, sua ausência em muitos CLPs legados não representa um obstáculo insuperável. A utilização de outros protocolos suportados pelo Node-RED, bem como a aplicação do BIPES em dispositivos IoT, permite que equipamentos antigos sejam incluídos no processo de digitalização e conectividade.

A adoção do BIPES mostrou-se particularmente relevante em cenários de IoT, sobretudo por se tratar de uma plataforma de programação visual voltada ao desenvolvimento de aplicações em dispositivos embarcados. Essa característica permite programar microcontroladores e dispositivos intermediários de forma ágil e eficiente, além de viabilizar a integração com protocolos amplamente utilizados em arquiteturas de IoT, como o MQTT. Dessa forma, dispositivos legados, muitas vezes incompatíveis com padrões atuais, podem ser conectados a sistemas modernos de coleta e processamento de dados por meio de dispositivos intermediários programados com o BIPES, ampliando o alcance da digitalização industrial. A simplicidade e o foco em sistemas embarcados tornam o BIPES uma alternativa acessível e de grande relevância para aplicações que demandam

conectividade e integração em ambientes de IoT.

A facilidade de integração e a flexibilidade proporcionadas pelo Node-RED também foram outros pontos de destaque, demonstrando que a plataforma pode ser uma ponte eficiente entre tecnologias legadas e os novos paradigmas da Indústria 4.0. No entanto, ficou claro que o sucesso do projeto depende de uma análise cuidadosa e de planejamento, especialmente no que diz respeito à complexidade crescente à medida que mais dispositivos e fluxos são adicionados ao ambiente. A realização de avaliações com profissionais de Tecnologia Operacional (TO) também trouxe uma conclusão importante: as soluções tecnológicas devem sempre considerar o usuário final e suas necessidades no ambiente de produção. As ponderações desses profissionais não apenas validaram a funcionalidade do artefato, mas também trouxeram percepções valiosas sobre usabilidade, o que contribuiu para ajustes que melhoraram a qualidade da solução.

Por fim, o artefato desenvolvido neste projeto configura uma contribuição para iniciativas de modernização industrial, ao propor uma abordagem para a integração de CLPs legados em um ambiente digital. Nesse sentido, viabiliza o aproveitamento de ativos industriais existentes enquanto as empresas se preparam para os desafios e oportunidades associados à Indústria 4.0. A solução proposta, ao mesmo tempo em que busca atender a demandas imediatas, também pode favorecer a evolução gradual da infraestrutura industrial, alinhando-a às demandas de um mercado em constante transformação.

4.12 Generalização para uma Classe de Problemas

O artefato desenvolvido neste projeto pode ser generalizado para uma ampla classe de problemas relacionados à modernização de sistemas legados em ambientes industriais, em específico no contexto da integração de equipamentos de automação, como Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), em iniciativas de digitalização e automação. A situação problema é caracterizada pela necessidade de conectar dispositivos de gerações anteriores às infraestruturas modernas de comunicação e monitoramento, ao habilitar a captura e análise de dados em tempo real, uma das etapas essenciais para o avanço em direção à Indústria 4.0.

A solução proposta, baseada na integração de protocolos de comunicação industrial, como OPC UA e outros, em conjunto com o uso de plataformas flexíveis como o Node-RED e BIPES, oferece uma abordagem que pode ser aplicada a diferentes cenários industriais. Tal proposição mostra-se adequada em indústrias que utilizam uma variedade de CLPs, muitas vezes de fabricantes e gerações diversificados, em que a comunicação entre esses dispositivos e sistemas mais recentes representa um desafio central.

No âmbito da DSR, essa generalização demonstra que o artefato desenvolvido não resolve apenas um caso específico de *retrofit* de CLPs legados, mas pode ser adaptado

para solucionar problemas similares em outros contextos industriais. A solução ressalta o papel das tecnologias intermediárias, como o Node-RED e BIPES, que atuam como ponte entre sistemas legados e novas tecnologias emergentes, ao garantir que o investimento existente em infraestrutura seja preservado enquanto as indústrias adotam novas práticas de digitalização e conectividade. Assim, o problema enfrentado por indústrias que desejam modernizar seus processos sem a substituição de equipamentos antigos pode ser resolvido, o que consolida este artefato como uma solução factível para problemas de *retrofit* digital industrial.

4.13 Comunicação dos Resultados

A comunicação dos resultados constitui uma etapa importante para disseminar os aprendizados e avanços alcançados durante o desenvolvimento do artefato, além de promover discussões e possíveis validações junto às comunidades acadêmica e industrial. Nesse sentido, os resultados deste trabalho podem ser compartilhados com diferentes públicos-alvo, por meio de estratégias de comunicação adequadas a cada contexto.

Os resultados da pesquisa podem ser divulgados em periódicos especializados na área de automação industrial. A submissão a revistas técnicas e científicas pode contribuir para ampliar a visibilidade da pesquisa e da metodologia empregada, além de estimular discussões sobre o *retrofit* de sistemas legados e a integração de equipamentos industriais com plataformas modernas de comunicação.

Além das publicações acadêmicas, os resultados também podem ser apresentados em *workshops*, seminários técnicos e outros eventos voltados a profissionais da área de automação e Tecnologia Operacional (TO). Considerando o caráter aplicado da proposta, os resultados obtidos podem contribuir para discussões sobre estratégias de modernização de sistemas industriais que utilizam equipamentos legados, especialmente em contextos nos quais se buscam soluções tecnicamente viáveis e economicamente acessíveis para integração ao ecossistema da Indústria 4.0.

As estratégias de comunicação visam garantir a ampla disseminação dos resultados, tanto para apresentar a pesquisa em diferentes contextos quanto para incentivar a adoção da proposta no setor industrial, ao considerarmos a crescente necessidade de modernização de sistemas legados e o avanço da transformação digital.

4.14 Considerações Finais

No desenvolvimento da metodologia, é importante destacar a DSR (*Design Science Research*), abordagem na qual se baseia a proposição deste capítulo. Tal metodologia se mostrou adequada aos objetivos da pesquisa, que buscavam associar teoria e prática. Assim, para a implementação das propostas apresentadas, foi necessária a compreensão

técnica e analítica dos códigos e protocolos suportados pelos equipamentos. A integração entre os sistemas foi apoiada nas ferramentas de *software* Node-RED e BIPES, em razão de características como flexibilidade, adaptabilidade, baixa curva de aprendizado e natureza *open source* de ambas as plataformas.

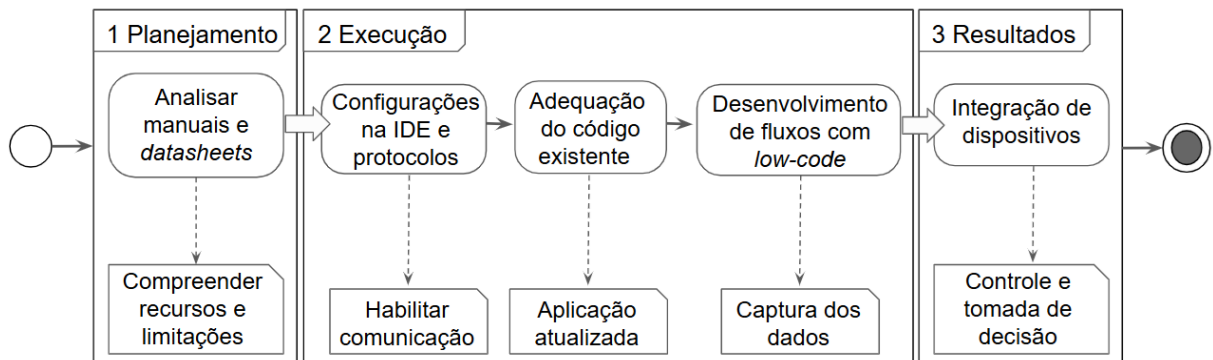
A avaliação dos experimentos pelos especialistas e profissionais da área de Tecnologia Operacional (TO) foi um ponto essencial para o desenvolvimento de melhorias e de refinamento de cada solução. O envolvimento desses colaboradores não apenas enriqueceu a pesquisa ao incluir percepções sobre usabilidade e aplicabilidade, como também reforçou o fundamento da prática colaborativa dentro dos processos da DSR.

No próximo capítulo, serão apresentados os experimentos realizados durante a pesquisa, com detalhes sobre os cenários de teste e as implementações técnicas. Esses experimentos, além de validar a metodologia proposta, também fornecerão uma análise mais aprofundada sobre a efetividade das soluções sugeridas e os desafios encontrados durante o processo de modernização dos CLPs.

5 . RESULTADOS

A seguir, apresenta-se a estratégia adotada para a condução dos experimentos, a qual busca comprovar a viabilidade da metodologia proposta no Capítulo 4. Para tanto, tal processo foi estruturado em três etapas: planejamento, execução e resultados, conforme ilustrado na Figura 14 a seguir.

Figura 14 – Método utilizado para experimentação



Fonte: Elaborado pelo autor.

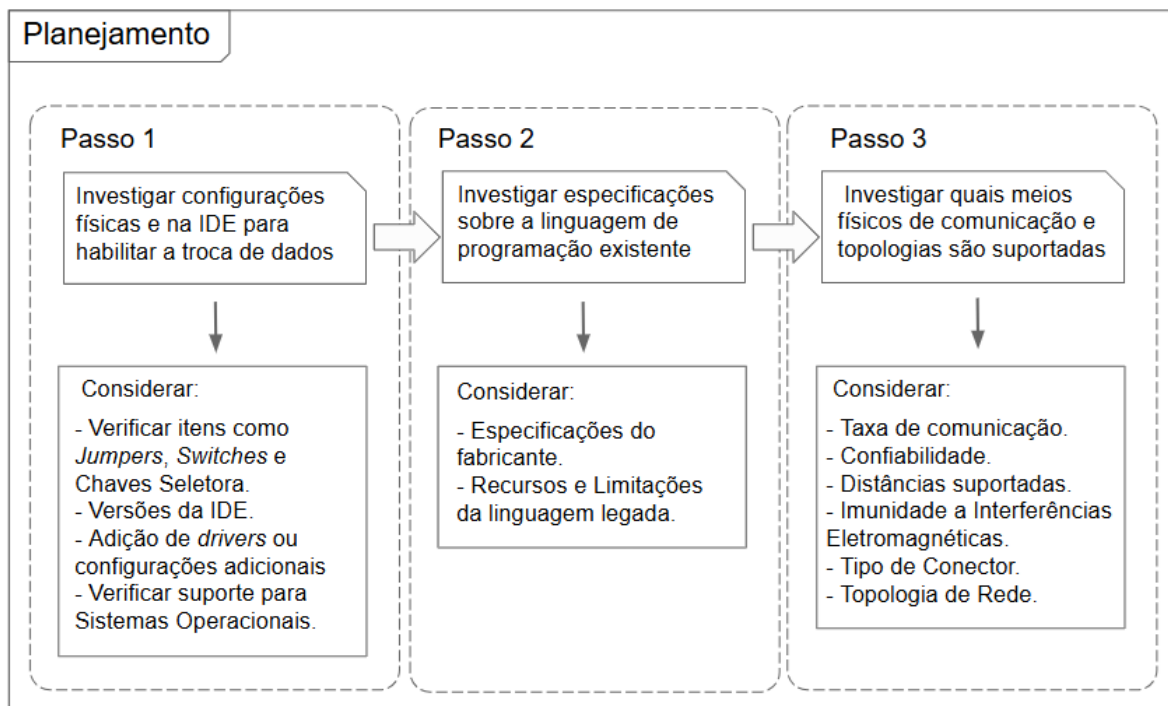
Os procedimentos foram organizados em uma sequência estruturada, seguindo um modelo baseado no BPMN (*Business Process Model and Notation* - Modelo de Processo de Negócios e Notação), para proporcionar uma compreensão clara e direta dos passos seguidos durante o desenvolvimento do *retrofit* digital industrial, particularmente destinado aos CLPs. Essa abordagem foi adotada para que o fluxo de ações — desde o planejamento até a execução e obtenção de resultados — seja interpretado de maneira intuitiva.

Cada etapa desta sequência (Planejamento, Execução e Resultados) representa um conjunto de operações as quais visam promover a integração entre equipamentos e captura de dados. Nas seções subsequentes, cada uma dessas fases será discutida em detalhe, abrangendo os aspectos técnicos e metodológicos específicos que guiaram o desenvolvimento dos experimentos.

5.1 Planejamento

O planejamento consiste na investigação de fatores técnicos nos manuais e *datasheets* do equipamento, para compreender especificações de como realizar a troca de dados e garantir a eficácia do processo de integração. Essa fase contempla a análise de configurações tanto físicas quanto nas IDEs (*Integrated Development Environment* - Ambiente de Desenvolvimento Integrado), além de uma avaliação cuidadosa da linguagem de programação e meios de comunicação disponíveis. Esse planejamento serve para definir os recursos e limitações do sistema, orientando os ajustes e configurações necessárias à compatibilidade do CLP com o ambiente digital proposto. A sequência de passos adotada na fase de planejamento pode ser observada na ilustração da Figura 15 a seguir.

Figura 15 – Planejamento antes de aplicar o *retrofit* digital



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na sequência da análise apresentada na figura 15, observa-se que o planejamento detalhado abrange tanto elementos de *hardware* quanto de *software*. A verificação de *jumpers*, *switches*, chaves seletoras, versões da IDE destina-se a garantir que o CLP esteja configurado de maneira apropriada para a troca de dados, a instalação de *drivers*¹ quando necessário, bem como a verificação de compatibilidade e suporte para os sistemas operacionais utilizados. Em complemento a isso, compreender as especificações da linguagem e as topologias de comunicação viáveis assegura uma base sólida para a execução dos

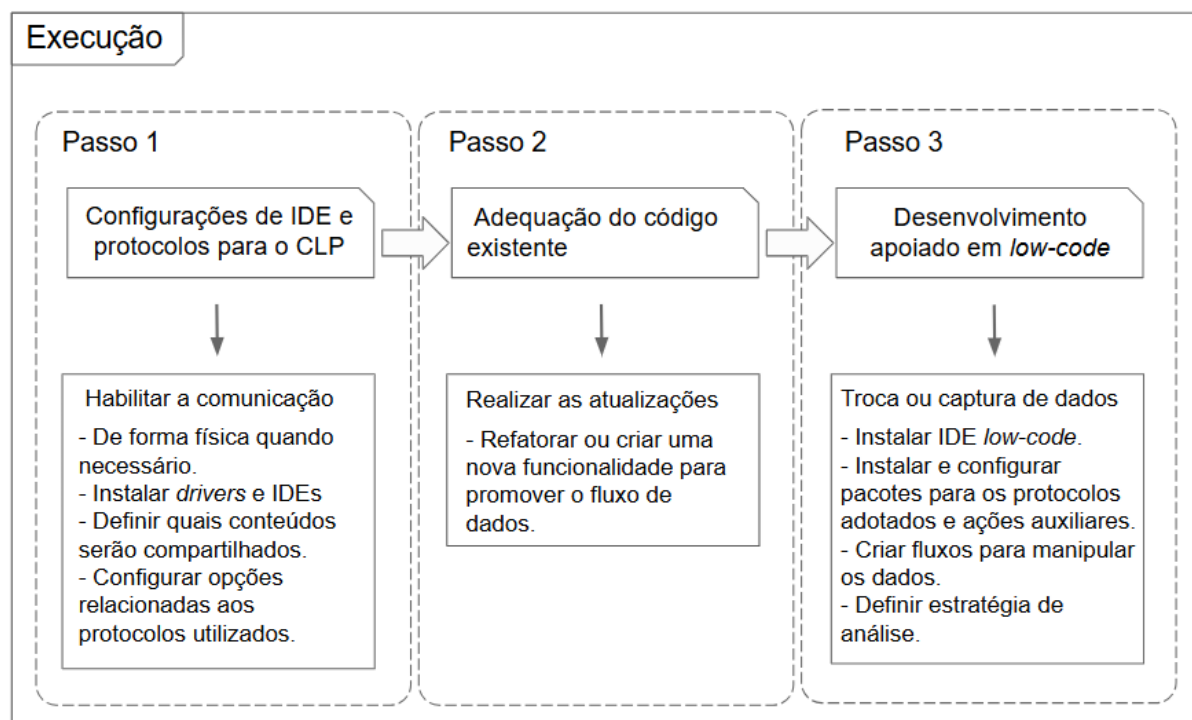
¹ são componentes de *software* responsáveis por permitir que o Sistema Operacional ou aplicações se comuniquem corretamente com dispositivos de *hardware* ou protocolos específicos.

experimentos subsequentes. Essas ações iniciais possibilitam uma adequação precisa ao ambiente, assim, proporcionam maior segurança e eficiência ao processo de integração e coleta de dados.

5.2 Execução

Tal etapa propõe-se a implementar as ações definidas na fase de planejamento, com foco inicial nas configurações da IDE e nos protocolos de comunicação associados ao CLP, bem como na adaptação e adequação do código legado para assegurar a conectividade. Em seguida, será desenvolvida uma aplicação voltada à captura e troca de dados, utilizando plataformas de *software low-code* para simplificar a integração e a manipulação dos dados, com mínima dependência de código, conforme ilustrado na Figura 16 a seguir.

Figura 16 – Execução do *retrofit* digital



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os procedimentos perpassam por habilitar a comunicação de forma física e garantir a compatibilidade com *software* por meio de *drivers*. Durante essa etapa, podem ser utilizadas máquinas virtuais, se necessário, para realizar o *downgrade* de sistemas e possibilitar a compatibilidade com aplicações antigas. A atualização do código, seja

por meio de refatoração ou por meio da implementação de novas rotinas ou blocos de função, deve assegurar que o programa atenda aos padrões IEC 61131-3, respeitando as particularidades de cada fabricante como citado na seção 2.4 do Capítulo 2.

O uso de ferramentas *low-code* na captura e manipulação de dados acrescenta versatilidade à solução, pois *softwares* como o Node-RED e o BIPES permitem o desenvolvimento de fluxos personalizados e de estratégias de armazenamento adequadas à infraestrutura proposta. Para isso, é essencial a instalação de pacotes compatíveis com os protocolos e demais funcionalidades necessárias para obter e preparar os dados, representados como nós ou blocos que devem ser conectados e posteriormente programados quando oportuno.

5.3 Resultados

Ao final das etapas de planejamento e execução, alcança-se a conectividade entre dispositivos, possibilitada pelo desenvolvimento de fluxos apoiados em plataformas *low-code* voltadas à integração de protocolos e à captura e manipulação de dados provenientes dos CLPs. Tais soluções centralizam a comunicação e facilitam a conectividade entre diferentes tecnologias, independentemente do fabricante ou do protocolo empregado. Esse processo sugere uma base para o *retrofit* digital, ao permitir que os dados obtidos sejam armazenados em diferentes formatos, como arquivos locais, bancos de dados ou servidores em nuvem, de acordo com as necessidades da aplicação e com a infraestrutura disponível na empresa.

Os dados adquiridos podem ser armazenados e utilizados por diferentes tecnologias, como o InfluxDB, destinado ao armazenamento de séries temporais (VASILE; AVOLIO; SOLOVIEV, 2023), e o Grafana, voltado à visualização de dados empregados na supervisão e no controle de processos (BAJPAI, 2023). Essas ferramentas podem ser conectadas a soluções como o BIPES e o Node-RED, ampliando a integração com plataformas de análise e monitoramento. A interconectividade obtida favorece a aplicação de modelos analíticos, que auxiliam a tomada de decisão baseada em indicadores.

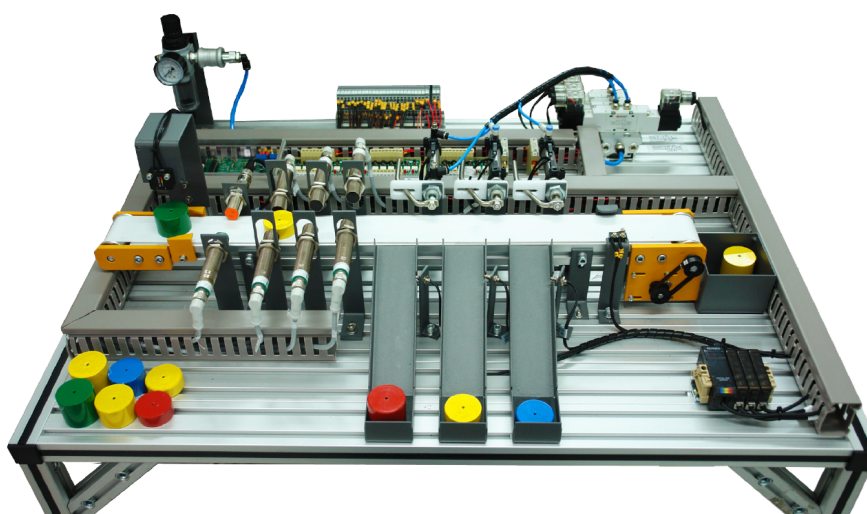
Por fim, o sucesso no processo de modernização requer um planejamento contínuo voltado às próximas fases de organização, manipulação e aproveitamento dos dados obtidos. Cabe à equipe de desenvolvimento — ou ao setor responsável — definir a melhor estratégia para a utilização dessas informações, ao considerar tanto as demandas atuais quanto as possibilidades futuras de expansão. A abordagem proposta introduz um roteiro prático e sistemático para o *retrofit* digital industrial, em especial no caso de CLPs. Assim, a digitalização de sistemas de controle legados possibilita a incorporação de novas tecnologias e uma gestão mais inteligente dos processos industriais.

5.4 Estudo de Caso

A separação de componentes representa uma etapa importante na otimização de operações industriais, pois promove maior precisão operacional, redução de falhas e aprimoramento da produtividade (MEHTA; REDDY, 2014). Esse processo, amplamente utilizado em linhas de montagem e logística, baseia-se na identificação e classificação de objetos conforme características específicas, como altura, peso ou tipo de material (SHRESTHA et al., 2020). Sob essas circunstâncias, a mesa seletora demonstra ser um equipamento apropriado, por ser um dispositivo didático que simula o funcionamento de sistemas de transporte e classificação de peças.

Dessa forma, os experimentos serão conduzidos em uma mesa didática De Lorenzo, composta por uma esteira transportadora, sensores e atuadores, que reproduzem o funcionamento de um sistema de transporte e segmentação de itens, como podemos observar na Figura 17 a seguir.

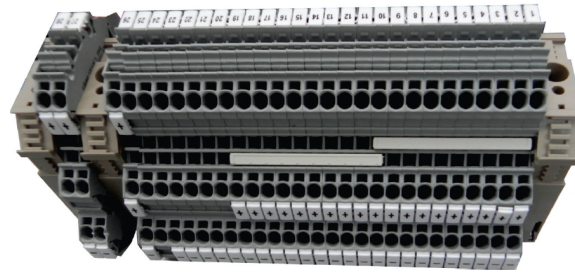
Figura 17 – Mesa Seletora



Fonte: Elaborado pelo autor.

A mesa seletora comunica-se diretamente com o Controlador Lógico Programável (CLP), o qual, por meio da linguagem de programação Ladder, coordena os sensores e atuadores para identificar, classificar e separar as peças de forma automática. A ligação elétrica entre a mesa e o CLP é realizada por meio de uma borneira, conforme apresentado na Figura 18 a seguir.

Figura 18 – Borneira



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tal componente serve como um ponto de conexão centralizado, onde os cabos dos sensores, atuadores e fontes de alimentação da esteira podem ser conectados e organizados. A borneira facilita o acesso aos pontos de conexão elétrica, por meio do uso de bornes para fixar os fios com segurança e assegurar a transmissão de sinais e energia entre os componentes da mesa seletora.

A escolha do CLP como elemento central do sistema justifica-se por sua flexibilidade, robustez e ampla aplicabilidade em diversos setores da indústria (VOGEL-HEUSER et al., 2017). Isso se deve ao fato de que os CLPs oferecem suporte a protocolos industriais amplamente adotados, o que permite a integração com tecnologias emergentes e contribui em avanço aos conceitos da Indústria 4.0, como conectividade e tomada de decisão baseada em dados (MORGAN et al., 2021).

A relevância acadêmica e prática deste estudo reside na demonstração de que conceitos técnicos e teóricos podem ser aplicados de forma concreta e adaptável, conforme proposto pela metodologia *Design Science Research* (DSR) descrita no Capítulo 4, a qual orienta a criação e validação de soluções práticas e flexíveis para problemas reais. A adoção e a conformidade dessa abordagem serão aprofundadas nas próximas seções nos experimentos desenvolvidos. Nessa perspectiva, cada implementação explora diferentes métodos de integrações, contribuindo para a demonstração da viabilidade do *retrofit* digital em âmbito industrial.

5.4.1 Experimento 1: Separação de Peças com CLP Siemens S7-1500

O objetivo deste experimento é capturar, em tempo real, os dados de contagem gerados durante o processo de identificar e classificar peças entre metálicas, não metálicas; realizar a separação das peças metálicas em três categorias de altura e, por fim, contabilizar todas as peças processadas. Os dados coletados serão armazenados para análises futuras e para a geração de *dashboards*. A comunicação entre servidor e CLP ocorre por meios físicos, como o cabo de par trançado Ethernet, o que garante conectividade e suporte à tomada de decisão.

5.4.1.1 Configuração do Experimento

Nessa primeira investigação, será utilizado o CLP Siemens modelo S7-1500 (fabricado em 2013), ilustrado na Figura 19, para controlar a distribuição dos objetos na mesa seletora e executar a separação das peças.

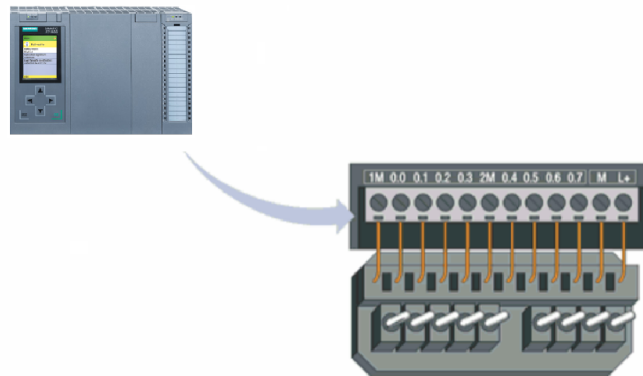
Figura 19 – CLP Siemens S7-1500



Fonte: Elaborado pelo autor.

No contexto desse estudo, há uma borneira integrada à mesa seletora e outra ao CLP, conforme ilustrado na Figura 20. A conectividade é alcançada por meio de fios de energia os quais acionam sensores e atuadores com base na lógica do código da aplicação.

Figura 20 – CLP integrado à borneira



Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo o manual do CLP S7-1500 SIEMENS (2018), a IDE TIA Portal em sua versão 14 é compatível com Sistemas Operacionais da plataforma Windows 7, 8, 10 e 11. Para assegurar a integridade e a disponibilidade dos dados, são necessárias algumas configurações específicas na IDE, como a habilitação de opções relacionadas à integração com o protocolo OPC UA, bem como a ativação das instruções GET e PUT.

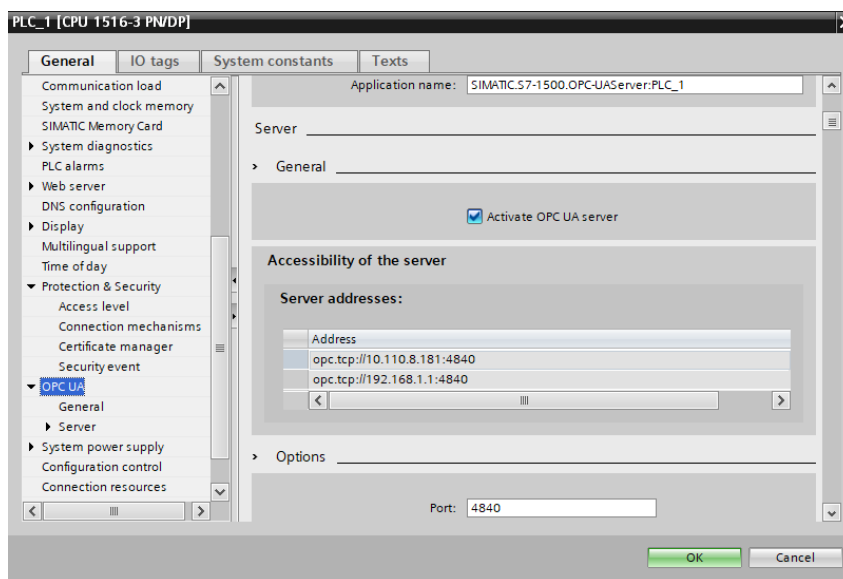
De forma adicional, será realizada a comunicação com uma IHM (Interface Homem-Máquina) por meio do protocolo Profinet, sendo necessário definir quais variáveis permitirão o compartilhamento de dados. No caso da comunicação com o Node-RED, utiliza-se o nó OPC UA para viabilizar a troca de informações. As variáveis selecionadas devem ser configuradas como globais e habilitadas para leitura e escrita, respeitando as diretrizes estabelecidas pelo fabricante.

Para garantir a confiabilidade do experimento, o código desenvolvido em Diagrama Ladder deverá seguir a norma IEC 61131-3. Além disso, a aplicação da metodologia *Design Science Research*, apresentada no Capítulo 4, guiará as ações relacionadas à configuração e avaliação do experimento, com a realização de ajustes a partir das considerações de especialistas. A instalação e configuração do Node-RED, bem como sua integração com a IDE TIA Portal v14 em ambiente Windows 11 garantem compatibilidade entre as plataformas, estabelecendo uma base tecnológica para a coleta e análise de dados em tempo real. Essa estrutura contribui para uma experiência prática, com potencial para simular cenários contemporâneos da automação industrial.

5.4.1.2 Integração e Comunicação

Para iniciar a comunicação entre o CLP Siemens S7-1500 e o computador, com o objetivo de capturar dados dos sensores, é necessário realizar configurações no TIA Portal para habilitar o protocolo OPC UA, como podemos observar Figura 21 a seguir.

Figura 21 – Configurações para protocolo OPC UA



Fonte: Elaborado pelo autor.

No TIA Portal, também será necessário ativar algumas opções de comunicação para garantir que as variáveis de interesse, como as de contagem dos sensores, estejam

configuradas para leitura e escrita, conforme ilustrado na Figura 22 a seguir.

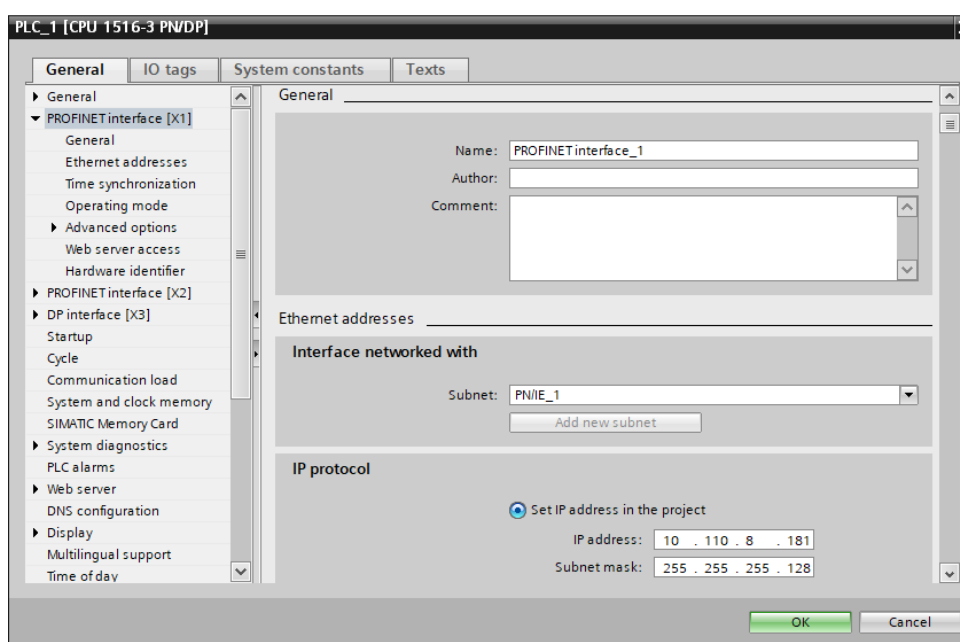
Figura 22 – Configurações para habilitar variáveis de captura

	Name	Tag table	Data type	Address	Retain	Accessible from HMI/OPC UA	Writable from HMI/OPC UA	Visible in HMI engineering
25	bob_aux_4	Default tag table	Bool	%M1.3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
26	cv_ctu_pc_plast	Default tag table	Word	%MW20	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
27	cv_ctu_pc_met_g	Default tag table	Word	%MW22	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
28	cv_ctu_pc_met_m	Default tag table	Word	%MW24	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
29	cv_ctu_pc_met_p	Default tag table	Word	%MW26	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
30	sens_fim_curso	Default tag table	Bool	%I1.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Fonte: Elaborado pelo autor.

No caso dessa aplicação também foram definidas integrações com a IHM (Interface Homem-Máquina), isso exigiu que algumas configurações relacionadas à comunicação baseada no protocolo Profinet fossem efetuadas no TIA Portal, conforme observado na Figura 23, pois tal protocolo é requisitado na comunicação com a IHM.

Figura 23 – Configurações para habilitar rede Profinet



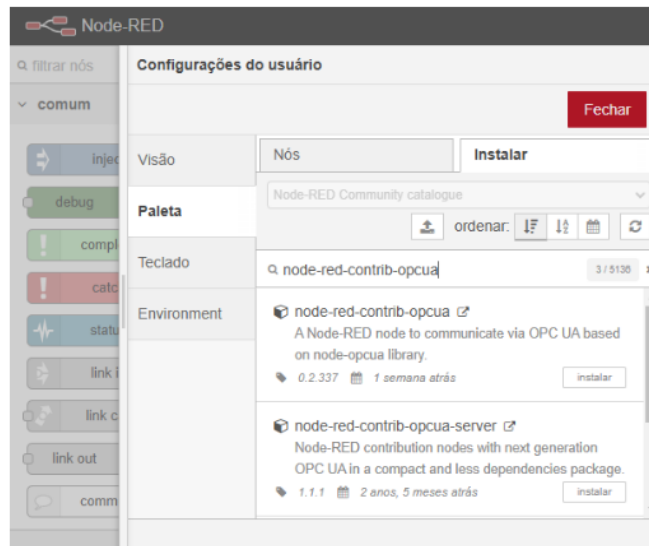
Fonte: Elaborado pelo autor.

Após as configurações e adequações relacionadas aos protocolos Profinet e OPC UA, foi refatorado um código destinado ao CLP, o qual segue com implementação em Diagrama Ladder; a documentação está contida no Apêndice, no item .2.

Por fim, passa-se à configuração do Node-RED. Para isso, foi instalado o pacote **node-red-contrib-opcua**, necessário à captura de dados do CLP. Além do pacote destinado ao protocolo OPC UA, também foram integrados blocos como o **node-red-**

contrib-moment, que permite a obtenção da data e hora atuais, o que assegura o registro temporal dos dados no momento da leitura. Uma das etapas da instalação de pacotes pode ser observada na Figura 24 a seguir.

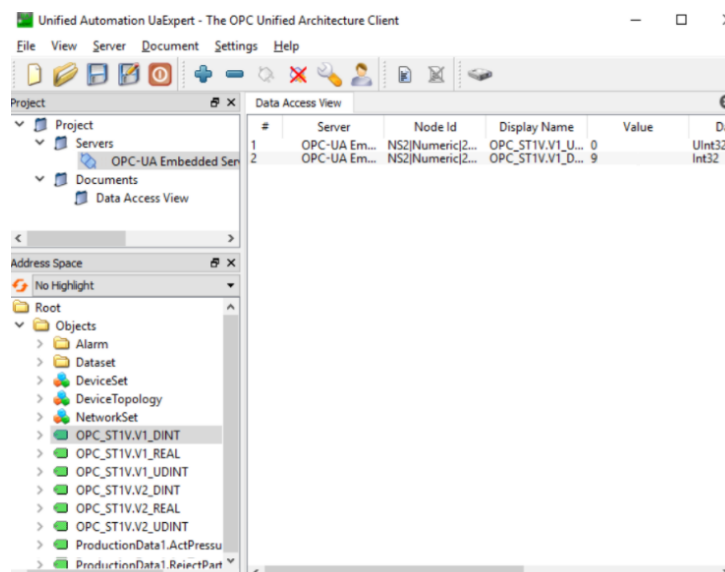
Figura 24 – Adição do pacote OPC UA



Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante a etapa de desenvolvimento e validação de conectividade entre Node-RED e CLP, o *software* OPC UA *Expert* foi utilizado para averiguar a acessibilidade dos dados provenientes dos blocos contadores, conforme ilustrado na Figura 25. Tal funcionalidade facilita investigar a comunicação e contribui para a identificação e resolução de possíveis problemas de comunicação nas fases iniciais de testes.

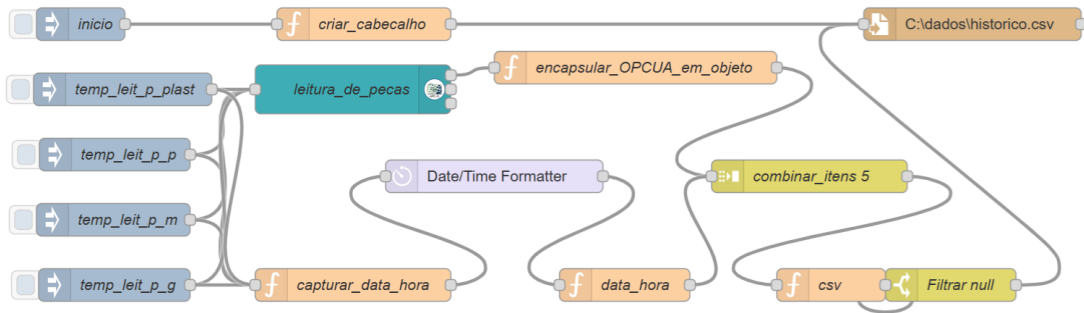
Figura 25 – Validação de dados com OPC UA Expert



Fonte: Elaborado pelo autor.

A estruturação dos fluxos de dados no Node-RED envolveu a configuração de nós específicos para a captura e o processamento das informações provenientes dos sensores. Os nós, concebidos como blocos modulares com interface intuitiva e estratégia *low-code*, foram utilizados para facilitar a implementação e o gerenciamento das funcionalidades. Tais fluxos podem ser observados na Figura 26 a seguir.

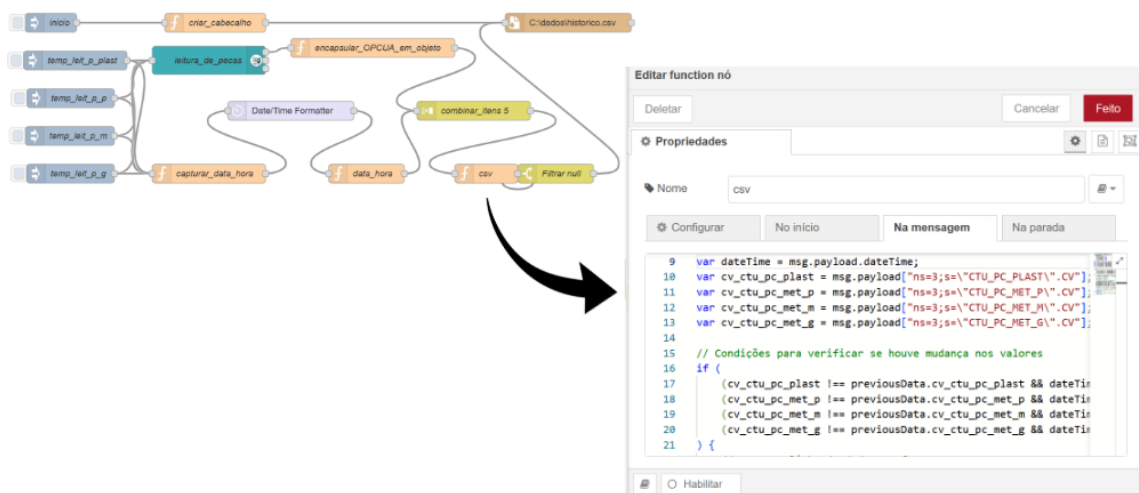
Figura 26 – Fluxo de Integração Node-RED



Fonte: Elaborado pelo autor.

O Node-RED também permite a personalização dos nós por meio da linguagem de programação JavaScript. Esse recurso foi explorado para desenvolver funções personalizadas, as quais permitiram salvar os dados processados em arquivos no formato CSV local. A ilustração apresentada na Figura 27 exemplifica a funcionalidade destinada a estruturar e organizar o conteúdo no formato CSV.

Figura 27 – Programação nó CSV

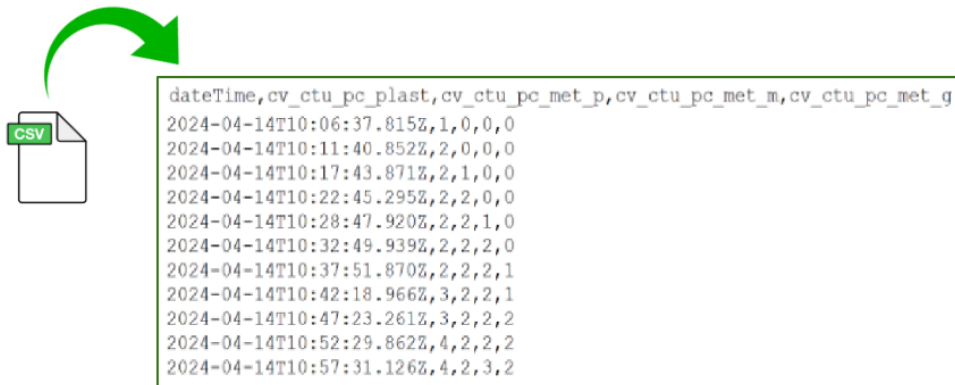


Fonte: Elaborado pelo autor.

A escolha pelo formato CSV justifica-se por sua simplicidade e compatibilidade com diversas plataformas de análise de dados, além de contribuir para testes e validações

ao longo do desenvolvimento. O CSV facilita a consulta direta dos dados capturados e permite que outros *softwares* e sistemas realizem verificações ágeis e precisas, mesmo sem a necessidade de um banco de dados estruturado. Essa simplicidade torna o CSV uma escolha inicial para armazenar os dados do experimento, que, posteriormente, poderão ser exportados para outros ambientes de análise. A Figura 28 ilustra a organização dos dados no formato CSV.

Figura 28 – Conteúdo do arquivo CSV



Fonte: Elaborado pelo autor.

Esse padrão de arquivo pode ser utilizado para alimentar um banco de dados, realizar arquivamento e permitir consultas mais complexas, caso o projeto evolua para uma análise de longo prazo ou integração com sistemas corporativos. Essa abordagem estruturada de captura e armazenamento dos dados simplifica o processo de monitoramento e facilita a visualização e interpretação das informações.

5.4.1.3 Resultados e Discussões

A análise da comunicação entre os dispositivos evidenciou um processo bem-sucedido na conexão entre o CLP Siemens S7-1500 e o Node-RED, via protocolo OPC UA. A integração contou com o suporte da documentação técnica, que orientou as configurações e contribuiu para a adaptação às demandas do experimento. Durante a implementação, o sistema foi configurado de modo a reconhecer variáveis e efetuar a troca de dados com o Node-RED, o que demonstrou a solidez da plataforma de programação do CLP e sua compatibilidade com a ferramenta de captura de dados.

Na avaliação da coleta e armazenamento, os dados obtidos pelo Node-RED, referentes à contagem dos itens detectados na esteira da mesa seletora, foram registrados continuamente em um arquivo CSV no decorrer de 24 horas em um ambiente controlado. Nesse período, o sistema se manteve estável, sem perda de conexão ou erros de leitura, o que reforça a eficácia do protocolo OPC UA e da rede configurada para esse tipo de experimento. A escolha pelo formato CSV se mostrou apropriada para essa fase, pois

permitiu não apenas a verificação rápida dos dados, mas também sua fácil manipulação, o que possibilita análises posteriores.

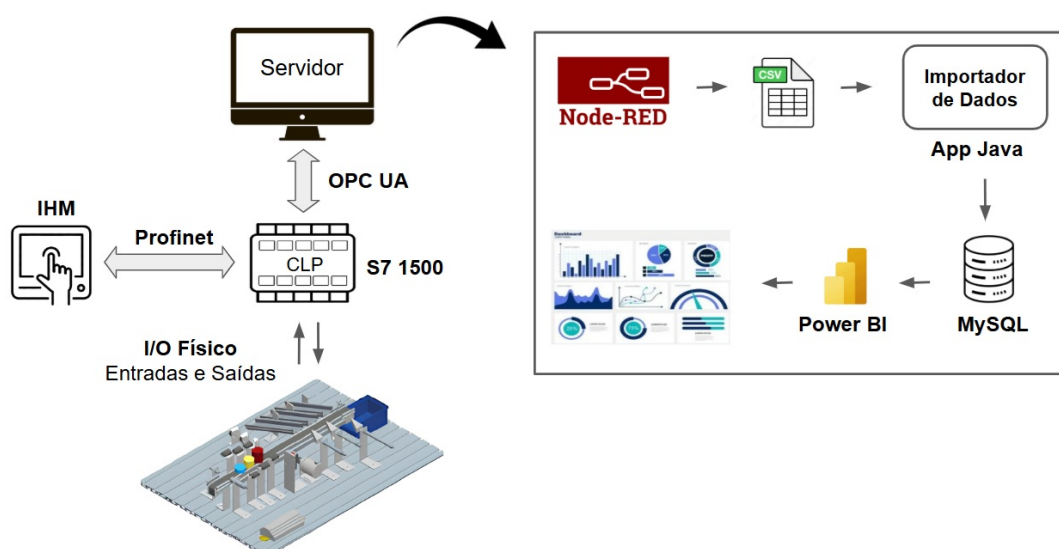
5.4.1.4 Proposta de Utilização

Foi elaborada uma prova de conceito com o propósito de demonstrar a utilização de dados coletados em formato CSV, ao longo do processo de monitoramento e análise. Para tanto, desenvolveu-se uma aplicação em linguagem de programação Java, a qual adotou o paradigma de POO (Programação Orientada a Objetos) e o padrão arquitetural MVC (*Model View Controller*). Essa aplicação, estruturada em camadas, implementou um fluxo no qual os dados do arquivo CSV foram extraídos e processados pela camada *Model*, responsável pela gestão das interações com o banco de dados MySQL.

A camada *Controller* coordenou a lógica e o fluxo de dados entre as camadas, assim, garantiu que as operações de leitura, manipulação e inserção de dados no banco fossem executadas de forma adequada. A camada *View* incumbiu-se de apresentar mensagens de status e relatórios simplificados, fornecendo uma interface básica para a execução da prova de conceito.

O banco de dados relacional MySQL foi configurado para receber esses dados e servir como fonte para ferramentas de análise, tais como o Power BI, que pôde estabelecer conexão direta por meio de um *plugin*, o que resultou em atualizações de *dashboards* de maneira instantânea após a coleta. A proposta desenvolvida evidenciou a aplicabilidade de uma solução escalável e integrável com ferramentas de Business Intelligence (BI), as quais são capazes de acessar os dados para análises contínuas, aprimorar o monitoramento do sistema. A Figura 29 ilustra o processo de integração entre as tecnologias.

Figura 29 – Processo de integração até o *dashboard*



Fonte: Elaborado pelo autor.

A aplicação Java, o script SQL para configuração do banco de dados, o código em Diagrama Ladder desenvolvido para o CLP Siemens S7-1500, os fluxos implementados no Node-RED e um modelo de arquivo no formato CSV estão disponibilizados no GitHub (NASCIMENTO, 2026a) para consulta e reutilização.

5.4.2 Experimento 2: Separação de Peças com CLP WEG TPW03 30 HR-A via cabo

O objetivo da segunda investigação, assim como no primeiro experimento, foi controlar a distribuição dos objetos em uma mesa didática e realizar a separação das peças com base na detecção do tipo de material e da altura. De forma automatizada, buscou-se identificar se os itens eram do tipo metálico ou não metálico. No caso das peças catalogadas como metálicas, procurou-se classificá-las e contabilizá-las de acordo com três diferentes critérios de altura. Para as não metálicas, pretendeu-se apenas realizar a sua quantificação, resultando, ao final, em quatro categorias distintas.

A comunicação entre o computador, que atuou como servidor, e o CLP também utilizou meios físicos; neste caso, foi empregado o próprio cabo de comunicação do CLP. Os dados foram capturados em tempo real e armazenados para posterior exploração, com o objetivo de subsidiar ações e estratégias.

5.4.2.1 Configuração do Experimento

O CLP adotado neste experimento foi o modelo TPW03 30 HR-A, fabricado pela WEG (2023a). Conforme indicado em sua etiqueta de identificação, apresentada na Figura 30, o dispositivo foi produzido em 2008. Essa informação indica tanto o ano de fabricação quanto o período de disponibilidade do modelo no mercado.

Figura 30 – CLP WEG TPW03 30 HR-A



Fonte: Elaborado pelo autor.

Atualmente, o CLP TPW03 30 HR-A pode ser classificado como um equipamento legado, com arquitetura mais simples em comparação às gerações mais recentes, como a

série TPW04, que permanece no catálogo de produtos do fabricante WEG (2024). De acordo com o manual, o dispositivo não é compatível com o protocolo OPC UA; no entanto, dispõe de suporte ao padrão Modbus, o qual atende aos requisitos de conectividade com sistemas externos. A IDE empregada para sua programação é a TPW-PCLINK v1.12, que mantém compatibilidade entre o modelo TPW03 e versões mais recentes do equipamento. Essa característica contribui para a continuidade de uso do equipamento em sistemas contemporâneos da série TPW.

O manual de programação disponibilizado pela WEG (2023b) informa que, para habilitar a comunicação com um computador, é necessária a instalação do *driver* CH341SER, compatível com os sistemas operacionais Windows 7, 8, 10 e 11. O CLP pode operar nos modos *master* e *slave*. Para este experimento, ele foi configurado como *slave*, isso permitiu que outro dispositivo capturasse os dados de contagem. Por sua vez, o cabo serial TPW-302MC, tradicionalmente utilizado para transferir a programação ao CLP, foi adotado na obtenção de dados via protocolo Modbus. Essa possibilidade de fluxo de dados também é mensurada na documentação dos modelos TPW03.

O código em Diagrama Ladder foi desenvolvido conforme a norma IEC 61131-3, referência internacional para linguagens de programação de CLPs (IQBAL; KHAN; KHAN, 2013). Adotou-se, como no primeiro experimento, a metodologia DSR (Design Science Research), apresentada no Capítulo 4, a qual orienta a sistematização e avaliação do experimento. A instalação do *driver* CH341SER, disponibilizado pela DRIVERSCAPE (2024), em conjunto com o ambiente TPW-PCLINK v1.12 e a plataforma Node-RED, executada no sistema operacional Windows 11, assegurou a compatibilidade entre os *softwares*, estabelecendo a infraestrutura necessária para a coleta de dados para a classificação e contagem de peças.

A configuração descrita estabeleceu uma base para experimentações práticas que se aproximam de situações reais da automação industrial. Ao integrar dispositivos legados com tecnologias atuais por meio de protocolos amplamente conhecidos, como o Modbus, assim, esse estudo permitiu simular condições operacionais verossímeis ao âmbito fabril.

5.4.2.2 Integração e Comunicação

A documentação do TPW03 especifica que a transferência de dados para leitura deve ser realizada por meio de endereços de memória predefinidos. Neste caso, utilizou-se o endereço D8321, um registrador especial dedicado à configuração dos parâmetros da comunicação serial, como taxa de transmissão, bits de parada e paridade. Essa configuração está associada ao uso do cabo TPW-302MC, que dispõe do conector Mini DIN de 8 pinos em uma extremidade e, na outra, interface serial RS-232. Ressalta-se que as conexões seriais têm sido gradualmente substituídas por padrões mais modernos, como USB, de modo que muitos dispositivos já não empregam essa tecnologia (CHARAN; KULKARNI,

2023). Por essa razão, foi integrado ao cabo TPW-302MC um adaptador para USB, conforme ilustrado na Figura 31 a seguir.

Figura 31 – Cabo Mini DIN de 8 pinos para RS-232 e Cabo conversor Serial para USB



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para configurar o uso do endereço de memória D8321 no código Ladder², foi necessário implementar um conjunto de instruções que incluiu a definição desse endereço como segundo parâmetro para a função MOV, responsável pela transferência de dados entre posições de memória.

De modo complementar, foram definidos os valores relativos à taxa de velocidade de comunicação, aos *bits* de paridade, ao *stop bit* e ao comprimento de dados, que podem ser combinados e convertidos em um formato hexadecimal ou decimal numérico — como no caso do valor decimal obtido em K121, utilizado para representar uma configuração específica de comunicação serial. Esse valor foi adotado como o primeiro parâmetro da função MOV, o que garantiu a transferência correta dos dados de leitura ao registrador D8321 e permitiu a comunicação entre o CLP e o computador servidor. A Figura 32 ilustra esse trecho de código em Diagrama Ladder.

Figura 32 – Habilitar a comunicação via endereço D8321



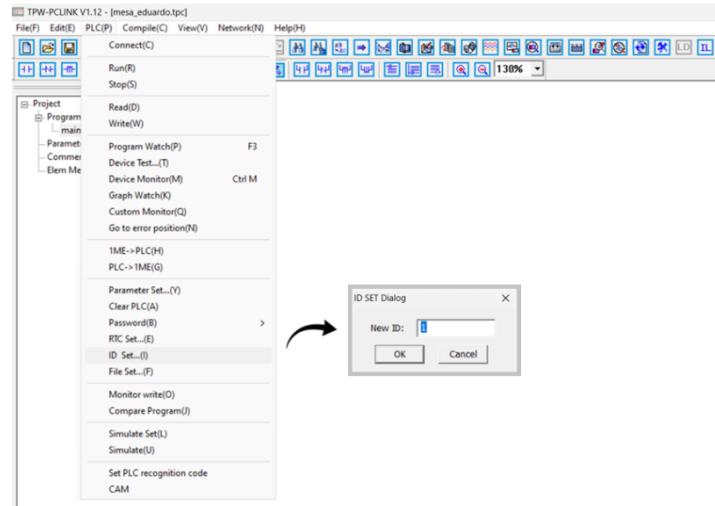
Fonte: Elaborado pelo autor.

O trecho em Diagrama Ladder apresentado na Figura 32, evidencia a necessidade de ajustes na codificação para viabilizar a conectividade com outros dispositivos. Diante disso, para completar a configuração, é necessário acessar a guia superior da IDE TPW-PCLINK,

² O código Ladder completo está disponível no apêndice, item .3.

na opção PLC, e alterar a função 'ID Set' para o valor 1. De acordo com o manual, essa modificação adequa o comportamento do CLP, configurando-o para atuar como *slave*. Conforme ilustrado na Figura 33 a seguir.

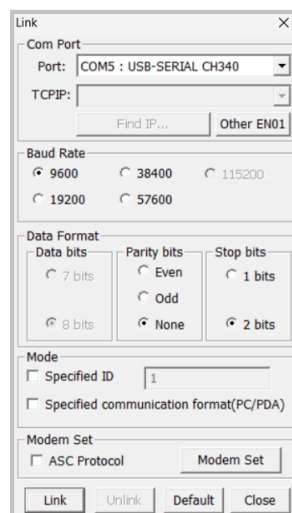
Figura 33 – Configurações para que o CLP funcione como *slave*



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para que as alterações sejam permissíveis, é requerido que o CLP já esteja devidamente conectado à IDE. Como pode ser observado na ilustração da Figura 34 a seguir.

Figura 34 – Habilitar Conexão CLP

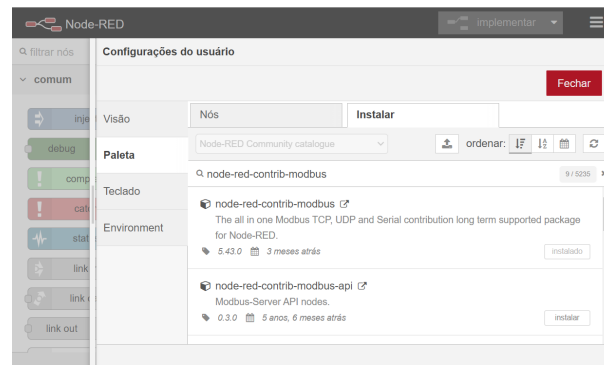


Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a configuração do CLP, efetuou-se a instalação de componentes ao Node-RED. Para isso, foi adicionado o pacote **node-red-contrib-modbus**, apropriado para promover

a comunicação via protocolo Modbus. Da mesma forma, também foram integrados à plataforma os módulos **node-red-contrib-moment** e **node-red-node-mysql**, que proporcionaram respectivamente, a obtenção do instante da leitura e o armazenamento dos registros com as informações da peça no banco de dados MySQL. A Figura 35 ilustra uma dessas etapas.

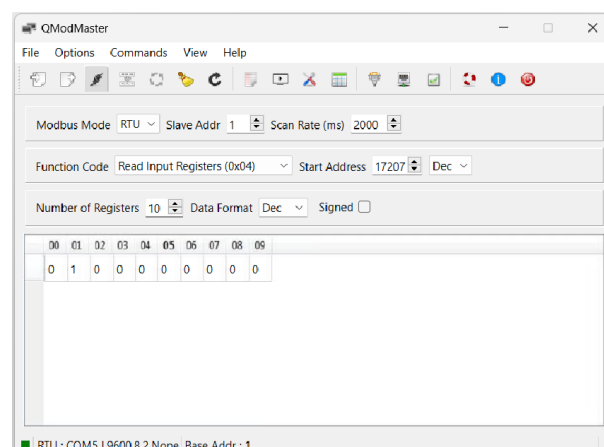
Figura 35 – Adição do pacote Modbus



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na fase de desenvolvimento e validação da conectividade entre o Node-RED e o CLP, o *software* QModMaster³ foi utilizado para verificar o acesso aos dados provenientes do processo de contagem. Essa ferramenta auxiliou na análise da comunicação entre equipamentos e contribuiu para identificação de possíveis problemas relacionados ao tráfego de dados nos estágios iniciais nos testes de conectividade. A Figura 36 ilustra o registro de leitura de uma peça capturado pelo QModMaster.

Figura 36 – Validação da comunicação com QModMaster

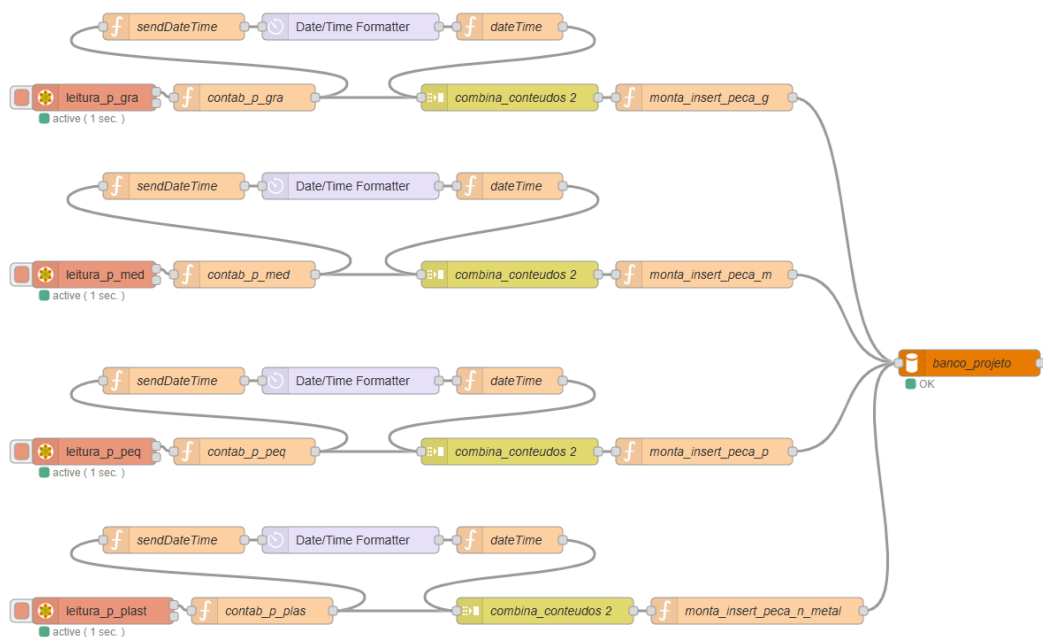


Fonte: Elaborado pelo autor.

³ *Software* de plataforma *Open Source*, foi utilizado para verificar a conectividade entre dispositivos que se comunicam via protocolo Modbus.

Na etapa seguinte, tendo em vista que a conectividade entre computador e CLP já havia sido validada, foi necessário estabelecer o fluxo de dados por meio da criação de nós específicos para a leitura da porta COM, captura, processamento e armazenamento das informações provenientes dos sensores. Na plataforma Node-RED, os nós são caracterizados por blocos que podem ser conectados, seguindo uma abordagem *low-code*, a fim de facilitar a implementação e o gerenciamento das funcionalidades. A Figura 37 ilustra os fluxos para cada categoria analisada.

Figura 37 – Fluxo para a Leitura, Captura, Processamento e Armazenamento dos Dados



Fonte: Elaborado pelo autor.

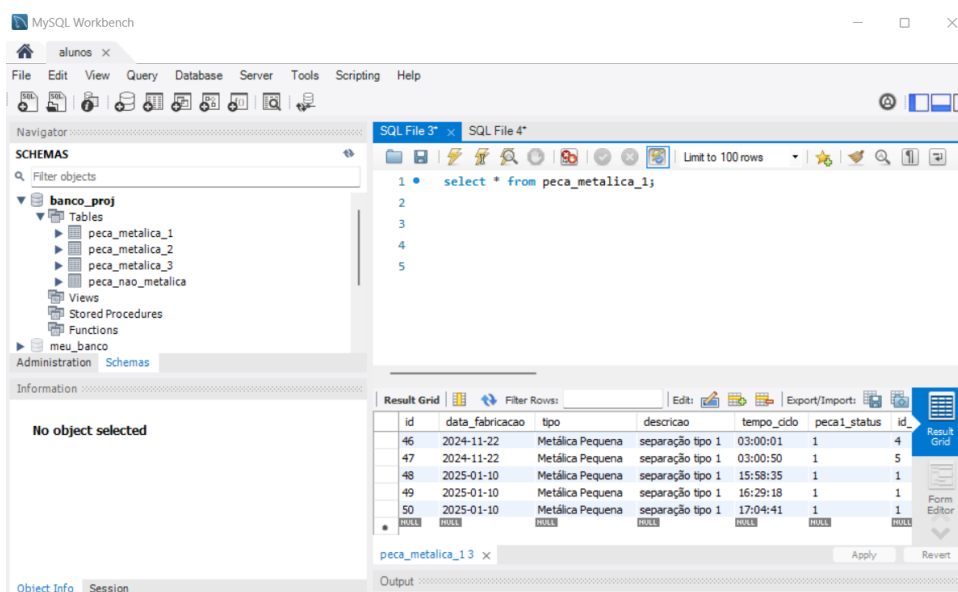
A estrutura apresentada acima, desenvolvida em Node-RED, viabilizou as etapas de leitura, captura, processamento e armazenamento dos dados provenientes da identificação de peças classificadas segundo diferentes critérios. Logo, cada linha do fluxo representa uma rota de dados correspondente a um tipo específico de peça — grande, média, pequena e não metálica. Para cada categoria, o fluxo foi iniciado por um nó de entrada, responsável por realizar a leitura da peça. Em seguida, um contador específico registrou a ocorrência do evento. Em paralelo, o horário de leitura foi obtido por meio do nó **sendDateTime**, formatado com o auxílio do **Date/Time Formatter**, e combinado com as demais informações.

Depois disso, os dados foram organizados no formato apropriado para inserção no banco de dados. Por fim, as rotas convergiram para o nó **banco_projeto**, responsável por realizar a gravação dos dados no sistema de armazenamento. O fluxo, desenvolvido de forma modular, garantiu que cada tipo de peça fosse tratado de maneira independente, ao

que o Node-RED estabeleça a comunicação de forma estável.

A utilização de um banco de dados possibilita o armazenamento seguro e escalável, atendendo tanto às demandas atuais quanto ao crescimento futuro do sistema. Concomitantemente, assegura o suporte a análises. Neste experimento, foi utilizado o MySQL, um dos sistemas gerenciadores de bancos de dados mais adotados no mercado (RAWAT; PURNAMA et al., 2021). A ilustração apresentada na Figura 39 exemplifica a persistência dos dados já armazenados no SGBD MySQL.

Figura 39 – Banco de Dados Operacional



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tal *software* é uma solução *open source*, com uma vasta comunidade de suporte, possui compatibilidade com diversas linguagens de programação e integração com ferramentas de análise, o que o torna uma escolha estratégica para projetos que exigem flexibilidade e confiabilidade.

5.4.2.3 Resultados e Discussões

A integração entre o CLP WEG TPW03 30 HR-A e o servidor com Node-RED demonstrou ser um procedimento bem-sucedido. O protocolo de comunicação adotado foi o Modbus; optou-se por esse padrão devido à ausência de suporte ao OPC UA pelo equipamento. A documentação técnica foi fundamental, pois forneceu diretrizes detalhadas sobre parametrização, endereçamento de memória, sistemas operacionais suportados, tipos de interfaces e conexões disponíveis. Assim, compreender os recursos, limitações e potencialidades do dispositivo foi determinante para que a configuração do sistema fosse conduzida de modo satisfatório.

Na avaliação da captura e armazenamento dos dados, os resultados indicaram que as informações referentes à contagem dos itens detectados na esteira da mesa seletora foram armazenadas continuamente em um banco de dados MySQL ao longo de 24 horas de funcionamento em laboratório. Durante todo o período de teste, o sistema manteve-se estável, sem interrupções na conexão ou erros de leitura, reforçando a confiabilidade da solução adotada. A escolha pelo banco de dados MySQL revelou-se estratégica ao considerarmos a facilidade de integração com o Node-RED por meio do nó **node-red-node-mysql**, que simplifica a configuração e o envio de dados para o banco.

O modelo desenvolvido apresentou vantagens em termos de escalabilidade e flexibilidade, ao permitir que o sistema seja expandido para armazenar grandes volumes de dados ou se adapte a diferentes cenários de análise. A estruturação direta no banco de dados não apenas melhora a organização e a consulta das informações, mas também simplifica a integração com outras ferramentas de análise avançada, o que consolida a proposta como uma solução robusta e versátil para experimentos e aplicações futuras.

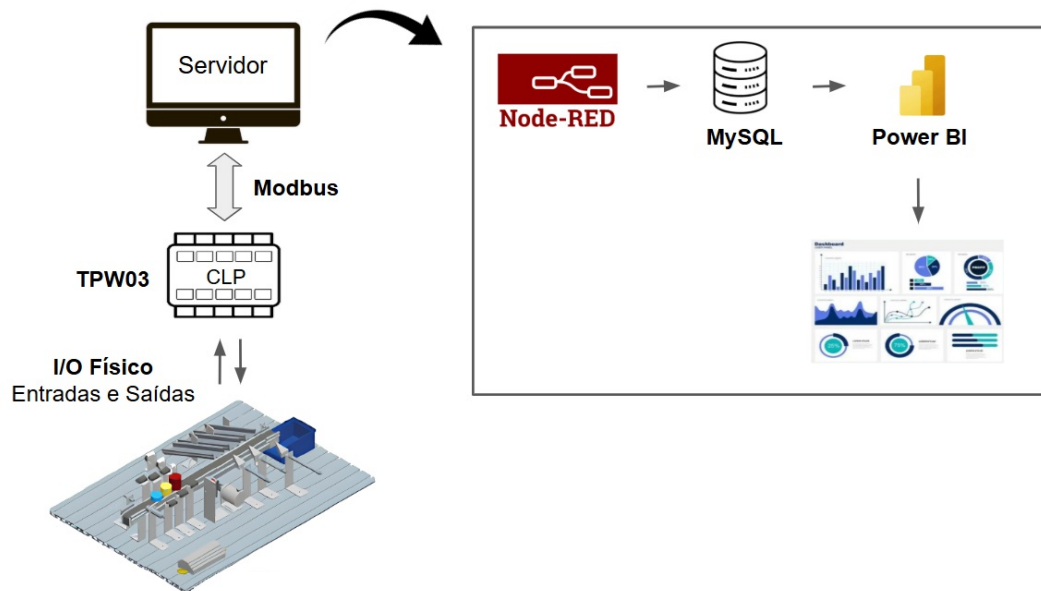
5.4.2.4 Proposta de Utilização

Foi criada uma prova de conceito com o objetivo de demonstrar o uso dos dados coletados e armazenados no banco de dados para monitoramento e análise. Desse modo, foi elaborado um experimento que integrou um CLP TPW03 30 HR-A da WEG a um computador servidor. O CLP foi configurado para funcionar como *slave*; sua programação foi desenvolvida em Diagrama Ladder com base na norma IEC 61131-3, e sua conexão com o servidor ocorre por meio de cabo com interface RS-232 e conversor USB. No lado do servidor, foram utilizadas a plataforma Node-RED e o banco MySQL para captura e armazenamento dos dados.

O banco relacional MySQL foi configurado para receber esses dados e servir como fonte para ferramentas de análise, como o Power BI, que pode se conectar diretamente por meio de um *plugin*, gerando análises em tempo real. Tal prova de conceito reforça

a aplicabilidade de uma solução escalável e integrável com ferramentas de BI (*Business Intelligence*), que podem acessar os dados para diagnóstico contínuo, aprimorando o controle e o monitoramento do sistema. A Figura 40 ilustra o processo de integração entre as tecnologias.

Figura 40 – Processo de integração até o *dashboard*



Fonte: Elaborado pelo autor.

O *script* SQL com as configurações do banco de dados, o código em Diagrama Ladder desenvolvido para o CLP TPW03, os fluxos implementados no Node-RED e o arquivo com *dashboards* desenvolvidos em Power BI estão disponibilizados no GitHub para consulta e reutilização. O repositório pode ser acessado para consulta detalhada conforme disponibilizado por (NASCIMENTO, 2026b).

5.4.3 Experimento 3: Separação de Peças com CLP WEG TPW03 30 HR-A via wireless

O objetivo da terceira investigação, assim como nos casos anteriores, é supervisionar a distribuição dos objetos em uma mesa didática e efetuar a separação das peças a partir da detecção da altura e do tipo de material. A lógica de controle em Diagrama Ladder foi mantida, logo, temos a classificação das peças com base em suas propriedades físicas, distinguindo-as entre materiais metálicos e não metálicos. As unidades identificadas como metálicas são, então, selecionadas e quantificadas segundo três faixas distintas de altura. Por sua vez, as unidades não metálicas são apenas contabilizadas, sem manipulação adicional. Como resultado, o procedimento gera quatro categorias possíveis.

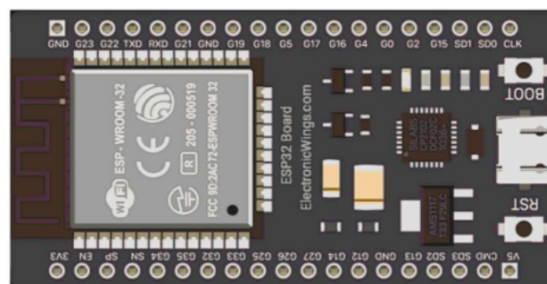
A princípio, foi estabelecida a comunicação entre o CLP e o microcontrolador ESP32⁴ por meio de conexão física, utilizou-se o cabo do próprio TPW03, acoplado a um módulo conversor e conectado ao ESP32. Assim, a experimentação foi dividida em duas etapas, na primeira o microcontrolador conectou-se via Wi-Fi a um *Access Point*, responsável por gerenciar a troca de dados sem fio com o computador servidor. Os dados capturados do CLP foram transmitidos em tempo real e armazenados em um banco de dados para subsidiar decisões operacionais e estratégias de controle apoiada em *dashboards*. Na segunda análise, a proposta concentrou-se na captura e no tratamento dos dados para exibição imediata em um painel de gestão, sem a etapa de persistência.

5.4.3.1 Configuração do Experimento

Neste estudo, manteve-se o uso do CLP modelo TPW03 30 HR-A, fabricado pela WEG. O padrão de comunicação utilizado para garantir a conectividade entre o CLP e o microcontrolador ESP32 foi o protocolo Modbus, conforme recomendado na documentação do equipamento. As configurações relativas à programação, à IDE, ao *driver*, aos sistemas operacionais, bem como à adoção do cabo de comunicação, permaneceram inalteradas em relação ao segundo experimento. Da mesma forma, o CLP foi mantido no modo *slave*, como previamente definido.

A principal distinção neste panorama de pesquisa foi a introdução do microcontrolador ESP32, ilustrado na Figura 41, que assumiu a função de *master*, ao estabelecer uma comunicação direta com o CLP TPW03 30 HR-A.

Figura 41 – Microcontrolador ESP32



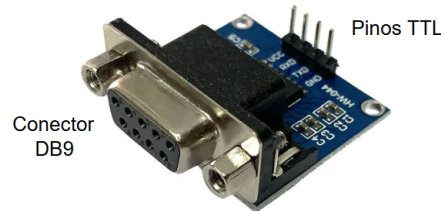
Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesse cenário de integração, o microcontrolador atuou como elemento intermediário entre o CLP e o computador servidor, foi responsável pela aquisição dos dados de contagem. A integração entre o ESP32 e o CLP foi realizada por meio do cabo TPW-302MC do controlador e do protocolo Modbus, conectado a um módulo conversor de porta serial

⁴ Microcontrolador com Wi-Fi e *Bluetooth* integrados, utilizado em aplicações embarcadas e IoT.

DB9 RS232-TTL (MAX3232), ilustrado na Figura 42, o qual adaptou os níveis de sinal e possibilitou a comunicação serial entre os dois dispositivos.

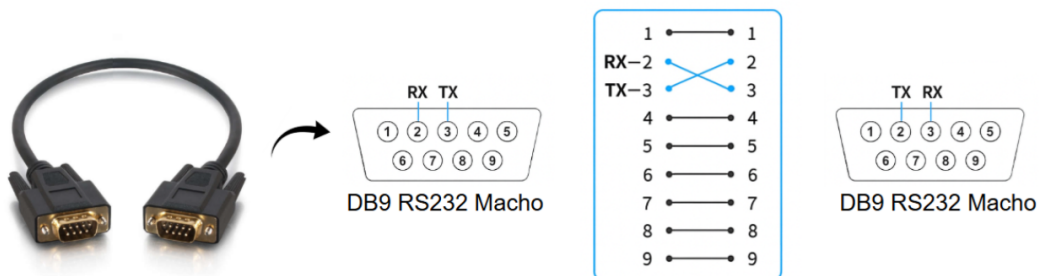
Figura 42 – Módulo conversor RS232-TTL



Fonte: Elaborado pelo autor.

A conexão entre o CLP TPW03 e o módulo conversor RS232-TTL exigiu a utilização de um cabo DB9 RS232 padrão macho-macho. A ilustração apresentada na Figura 43 exemplifica a inversão dos sinais entre o receptor (RX) e o transmissor (TX), necessária para a comunicação dos equipamentos.

Figura 43 – Cabo inversor



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em âmbito de *software*, foram desenvolvidas duas abordagens exploradas com microcontrolador ESP32, tendo em ambas o BIPES (2026) como ferramenta de desenvolvimento. Assim, em um primeiro momento, com o intuito de expandir as funcionalidades e a integração do sistema, foram empregadas também o Node-RED, responsável por promover a conectividade entre diferentes tecnologias; o MySQL, destinado ao armazenamento estruturado dos dados; e o Power BI, utilizado para a construção de *dashboards* interativos. Esses *softwares* foram adotados na elaboração de uma alternativa de estudo de caso baseada na persistência de dados, assegurando o processamento, a organização e a apresentação das informações. Dessa forma, garantiu-se que os dados coletados pudessem ser integrados, analisados e disponibilizados de maneira sistemática.

Em um segundo momento, considerando um cenário de simplificação da arquitetura, foi desenvolvida uma estratégia alternativa, a qual empregou exclusivamente um microcontrolador ESP32, com o BIPES como principal plataforma, em razão de sua flexibilidade e capacidade de integrar desenvolvimento, monitoramento e visualização de dados em um único ambiente. Essas características possibilitaram a implementação de código em MicroPython por meio de blocos pré-programados, seguindo uma estratégia *low-code*. Adicionalmente, os recursos nativos da ferramenta viabilizaram a criação de *dashboards* hospedados no próprio servidor do BIPES. Nesse contexto, os dados coletados foram enviados, processados e exibidos em tempo real, de forma centralizada e acessível via *browser*, sem a necessidade de outros *softwares*.

Por fim, no que se refere aos protocolos de comunicação, foram incorporados o Modbus, responsável por definir a conectividade entre o microcontrolador e o CLP, e o padrão MQTT, que estabeleceu a conexão entre o microcontrolador e o servidor. O uso conjunto dessas tecnologias promoveu a integração entre os dispositivos e contribuiu para a transmissão confiável dos dados. Esse mecanismo garantiu que as informações fossem disponibilizadas em tempo real e mantivessem consistência entre equipamentos e aplicações.

5.4.3.2 Integração e Comunicação

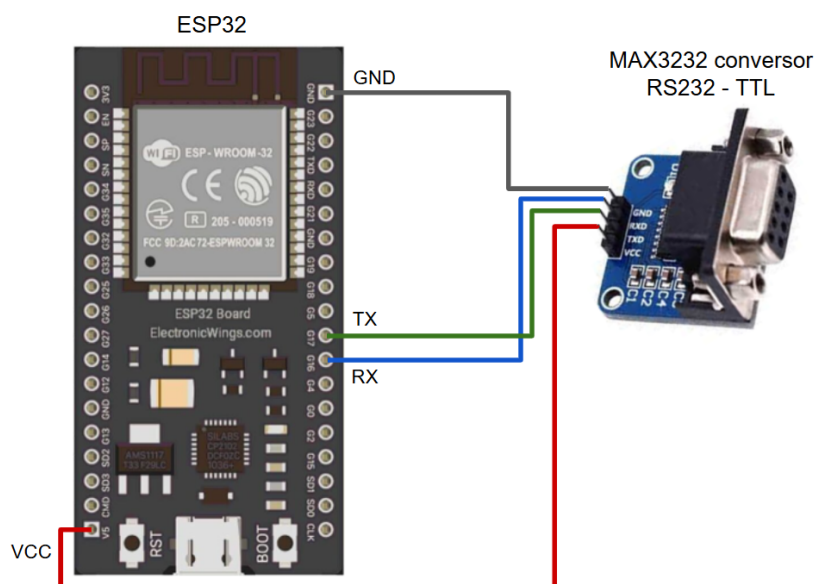
Foram mantidas as configurações definidas no experimento anterior quanto aos parâmetros da comunicação serial do CLP TPW03, incluindo o uso do registrador D8321, responsável por permitir a captura dos dados, também foram preservadas a taxa de transmissão, paridade, bits de parada, comprimento de dados e protocolo de comunicação. A lógica de programação em Diagrama Ladder também permaneceu inalterada. Nessa perspectiva, a principal distinção desta proposição esteve na interface física de conexão: ao contrário da comunicação direta com o computador, realizada anteriormente por meio de um cabo com conversor USB, adotou-se o uso do microcontrolador ESP32 como interface de comunicação intermediária.

O cabo TPW-302MC continuou sendo empregado para a conexão com a porta Mini-DIN de 8 pinos do CLP. Na outra extremidade, foi conectado ao conversor RS232-TTL, compatível com os níveis lógicos exigidos pelo ESP32. O uso do módulo conversor MAX3232 garantiu a conectividade entre o TPW03 e o microcontrolador ESP32. Tal conexão é alcançada por meio dos pinos de transmissão e recepção de dados, TX e RX, respectivamente. Nesta implementação, utilizaram-se os pinos GPIO 16 (RX) e GPIO 17 (TX) do ESP32 para estabelecer essa comunicação serial.

O módulo conversor RS232-TTL (MAX3232) pode ser alimentado de maneira direta pelo ESP32, uma vez que opera com tensões de 3V a 5V, sendo compatível com a

alimentação fornecida pelo microcontrolador. Essa configuração pode ser visualizada na Figura 44 a seguir:

Figura 44 – Integração entre microcontrolador ESP32 e módulo conversor MAX3232



Fonte: Elaborado pelo autor.

O desenvolvimento do *script* para a comunicação entre o microcontrolador ESP32 e o CLP TPW03 foi realizado com o apoio da plataforma BIPES. Desse modo, por intermédio de simples operações de arrastar e conectar blocos, foi possível criar fluxos lógicos completos para tarefas como leitura e escrita em pinos, conexões UART⁵, conexão Wi-Fi e publicação via protocolo MQTT, entre outras funcionalidades. A abordagem visual reduziu a complexidade da implementação ao permitir que o foco permanecesse na lógica dos processos e não na linguagem de programação. A seguir, são detalhadas duas propostas elaboradas no contexto desta investigação.

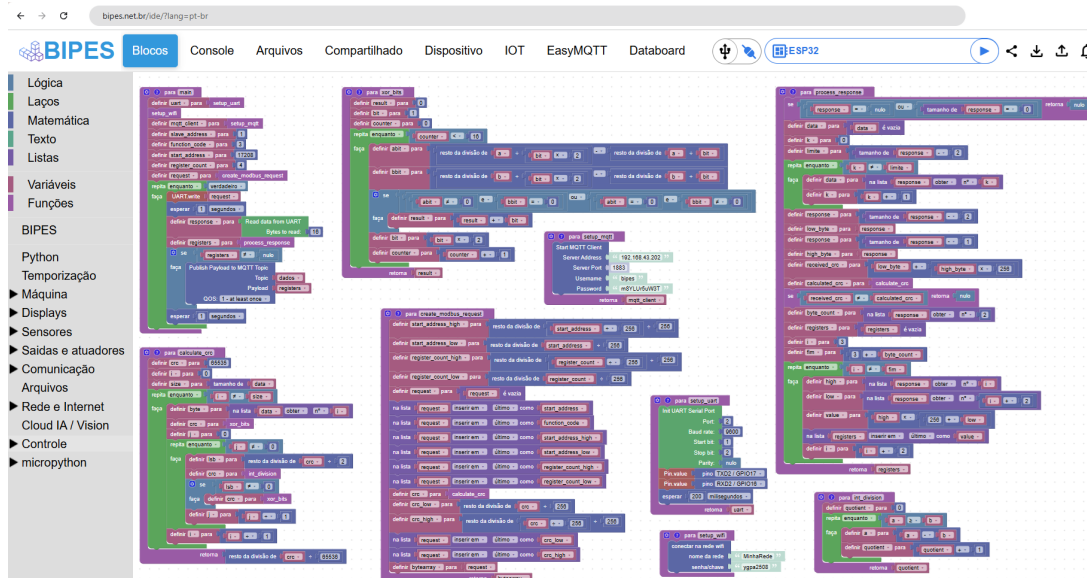
⁵ *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*: interface de comunicação serial assíncrona utilizado para transmissão dados por meio dos pinos TX e RX (GUPTA, 2019)

5.4.3.3 Cenário 1 – Persistência e Integração de Dados

A investigação foi conduzida com base em uma arquitetura composta pelos *softwares* BIPES, Node-RED, MySQL e Power BI, as quais, em conjunto, exploraram funcionalidades complementares para estabelecer um fluxo de dados contínuo e estruturado. Nessa configuração, o BIPES foi utilizado para a programação do ESP32, enquanto o Node-RED atuou como intermediário na comunicação entre dispositivos e serviços, já o MySQL ficou responsável pela persistência e organização dos dados coletados e o Power BI, pela construção de *dashboards*. A sinergia entre as ferramentas possibilitou a criação de um ambiente unificado para coleta, tratamento, armazenamento e visualização de informações.

Na interface do BIPES encontram-se blocos previamente definidos que contemplam funções lógicas, estruturas condicionais, laços de repetição e operações matemáticas, além de elementos específicos para comunicação serial e via rede, integração com protocolos como MQTT, e controle de sensores e atuadores. Essa organização facilitou a implementação de funcionalidades complexas sem a necessidade de digitação direta do código, permitindo ao usuário construir fluxos de execução de maneira visual e intuitiva. A Figura 45 exemplifica a criação dos blocos por meio do recurso *drag and drop*, com auxílio dos elementos disponibilizados pela paleta da ferramenta.

Figura 45 – Blocos para a comunicação entre o microcontrolador ESP32 e o CLP TPW03



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na guia **Arquivos**, a ferramenta gerou automaticamente o código em MicroPython correspondente ao fluxo desenvolvido na guia **Blocos**. Conforme pode ser observado na ilustração da Figura 46 a seguir.

Figura 46 – Código MicroPython gerado de maneira automática

```

51 def main():
52     global uart, result, registers, mqtt_client, start_address_high, bytearray2, crc, quotient, bit, data, start_address_low, i, counter, k, register_count_high,
53     uart = setup_uart()
54     setup_wifi()
55     mqtt_client = setup_mqtt()
56     slave_address = 1
57     function_code = 3
58     start_address = 17208
59     register_count = 4
60     request = create_modbus_request()
61     while True:
62         machine.UART.UART.write(request)
63         time.sleep(1)
64         response = uart.read(16)
65         registers = process_response()
66         if registers != None:
67             mqtt_client.publish(dados, registers,qos=1)
68         time.sleep(1)
69
70 # Descreva esta função...
71 def xor_bits():
72     global uart, result, registers, mqtt_client, start_address_high, bytearray2, crc, quotient, bit, data, start_address_low, i, counter, k, register_count_high,
73     result = 0
74     bit = 1
75     counter = 0
76     while counter < 16:
77         abit = a % (bit * 2) - a % bit
78         bbit = b % (bit * 2) - b % bit
79         if abit != 0 and bbit == 0 or abit == 0 and bbit != 0:
80             result = result + bit
81         bit = bit * 2
82         counter = counter + 1
83     return result
84
85 # Descreva esta função...
86 def process_response():
87     global uart, result, registers, mqtt_client, start_address_high, bytearray2, crc, quotient, bit, data, start_address_low, i, counter, k, register_count_high,
88     if response == None or len(response) == 0:
89         return None
90     data = not len(data)
91     k = 0
92     limite = len(response) - 2

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

A ferramenta permitiu, de forma intuitiva, a criação de um esboço funcional para a comunicação Modbus via interface UART e envio de dados por meio do protocolo MQTT, eliminando a necessidade de escrever todo o código manualmente. O *script* produzido de maneira automática forneceu uma estrutura coerente, com as principais funções já pré-definidas, o que acelerou significativamente a etapa de codificação.

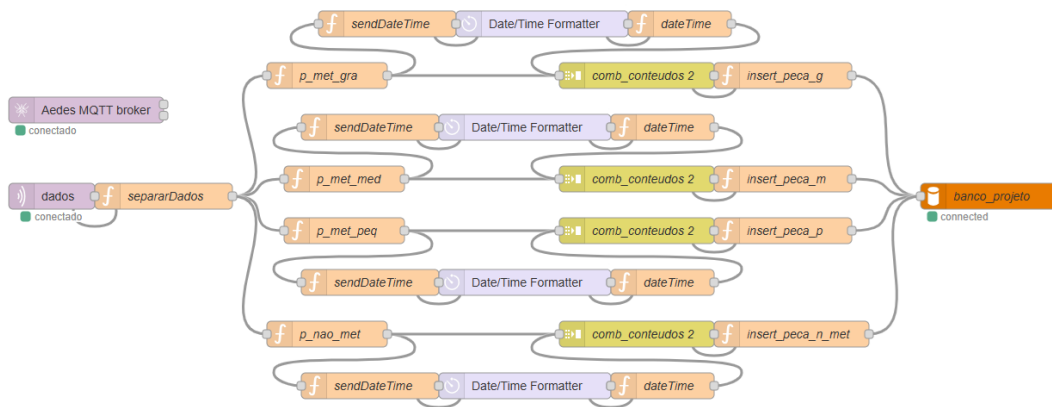
A partir desse *script* gerado, foram realizadas alterações pontuais, com foco em melhorar a legibilidade, modularidade e eficiência do programa. A lógica central criada pelo BIPES foi preservada, sendo ajustada para uma estrutura mais organizada, com o uso de funções parametrizadas, eliminação de variáveis globais, tratamento adequado do CRC⁶ e rotinas de publicação. Dessa forma, a implementação fornecida pela plataforma BIPES não apenas facilitou o início do desenvolvimento, como também serviu de alicerce confiável para a construção da versão final do código em MicroPython.

No contexto do servidor, a aplicação desenvolvida no experimento anterior, implementada em Node-RED, foi adaptada nesta etapa com a inclusão do pacote **node-red-contrib-aedes**, responsável pela configuração do *Aedes MQTT Broker* diretamente no ambiente da ferramenta. Com essa alteração, o próprio Node-RED passou a operar como **servidor MQTT**, eliminando a dependência de um *broker* externo. Assim, em conjunto com o nó **mqtt in**, a arquitetura tornou-se capaz de receber os dados transmitidos pelo microcontrolador ESP32 por meio do protocolo MQTT, utilizando uma rede local estabelecida via *Access Point* — neste caso, um roteador convencional.

⁶ *Cyclic Redundancy Check*: método de detecção de erros utilizado em comunicações seriais, como Modbus, UART, etc.

A lógica previamente desenvolvida para o tratamento dos dados foi mantida, logo, a aplicação continuou a realizar a separação dos valores recebidos, o registro do horário da transmissão e a inserção no banco de dados MySQL. Como ilustrado na Figura 47, essa sequência incluiu funções de formatação de data e hora, organização por tipo de peça, e posterior armazenamento.

Figura 47 – Fluxo para a Leitura, Captura, Processamento e Armazenamento dos Dados



Fonte: Elaborado pelo autor.

Todas as transformações de dados e regras de processamento foram programadas em JavaScript, linguagem adotada pelo Node-RED para configuração dos nós de função. Dessa maneira, o sistema manteve-se modular e adaptável, o que permitiu eventuais ajustes pontuais de forma simplificada. Ressalta-se que o banco de dados MySQL continuou sendo utilizado neste experimento, sem alterações na estrutura definida no experimento anterior.

5.4.3.3.1 Resultados e Discussões

A integração entre o CLP WEG TPW03 30 HR-A e o servidor executando o Node-RED, mediada por um microcontrolador ESP32 programado na plataforma BIPES, demonstrou-se uma solução versátil. A comunicação entre o CLP e o ESP32 foi estabelecida via protocolo Modbus, enquanto a interface entre o ESP32 e o servidor ocorreu via protocolo MQTT, utilizando conectividade Wi-Fi. A documentação técnica disponível, tanto do TPW03 quanto do ESP32, orientou a parametrização, o endereçamento de memória e a definição das interfaces compatíveis, o que permitiu configurar e integrar os equipamentos de forma satisfatória.

Os dados referentes à contagem dos itens processados pela esteira da mesa seletora foram capturados e armazenados continuamente em um banco de dados MySQL, ao longo

de 24 horas de operação ininterrupta em ambiente laboratorial. A ausência de falhas de comunicação explicitou a robustez da proposta, bem como sua viabilidade para aplicações de monitoramento baseadas em Internet das Coisas (IoT).

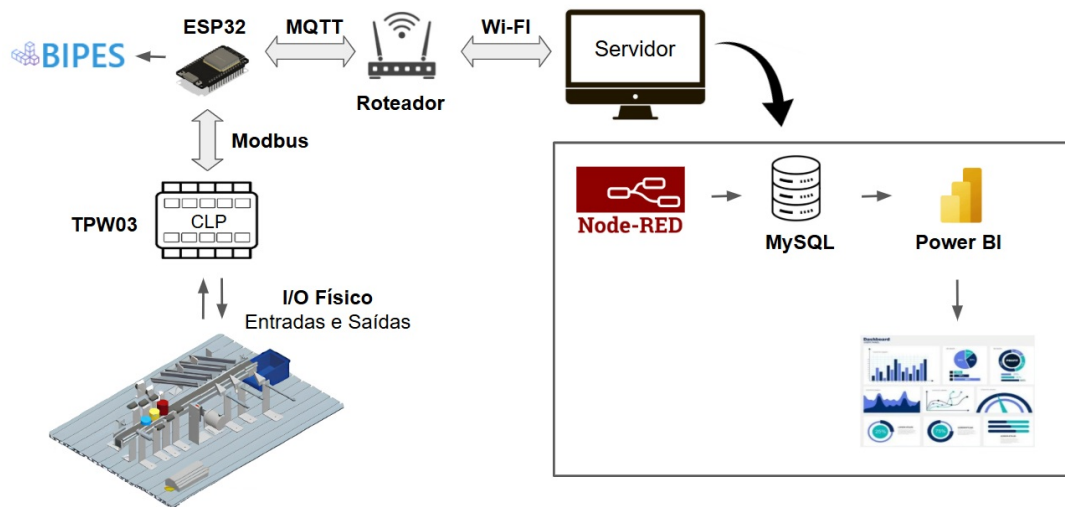
O modelo desenvolvido apresenta vantagens em termos de flexibilidade e integração entre diferentes tecnologias, demonstrando sua aplicabilidade em cenários industriais que demandam monitoramento contínuo e comunicação eficiente entre dispositivos heterogêneos. A utilização do microcontrolador ESP32, programado com uma solução apoiada na plataforma BIPES e conectado ao servidor por meio do protocolo MQTT, garantiu a transmissão de dados sem fio de modo confiável. Em complemento, a utilização do protocolo Modbus entre o CLP e o microcontrolador assegurou compatibilidade com o ambiente legado.

A organização modular da solução permite adaptações futuras, como a incorporação de novos sensores ou a migração para outros ambientes, o que caracteriza o modelo como uma alternativa viável para sistemas de supervisão baseados em Internet das Coisas (IoT). Nesse contexto, os resultados obtidos ressaltam a viabilidade técnica e prática de estratégias de *retrofit* industrial, ao promoverem a atualização de sistemas fabris sem a necessidade de substituição completa dos equipamentos existentes.

5.4.3.3.2 Proposta de Utilização

Foi desenvolvida uma prova de conceito com o propósito de demonstrar a aplicação de dados adquiridos e armazenados em banco de dados. O experimento consistiu na integração de um CLP TPW03 30 HR-A com um microcontrolador ESP32, responsável pela transmissão dos dados via conexão Wi-Fi a um computador configurado como servidor de recebimento e armazenamento. O CLP foi programado conforme a norma IEC 61131-3, utilizando a linguagem Diagrama Ladder, e configurado para operar como dispositivo *slave* na comunicação serial.

A conexão física entre o CLP e o ESP32 foi realizada por meio do cabo TPW-302MC, com interface RS-232, interligado a um módulo conversor RS232-TTL (MAX3232). A partir do microcontrolador, os dados foram encaminhados ao servidor por meio do protocolo MQTT, onde o Node-RED foi empregado para a captura das informações e sua inserção em um banco de dados MySQL, configurado como repositório central. Esse banco de dados viabilizou a integração com ferramentas de *Business Intelligence*, como o Power BI, possibilitando a geração de *dashboards* para fins de diagnóstico, controle operacional e tomada de decisão baseada em dados. A Figura 48 ilustra a arquitetura de integração entre os componentes e tecnologias envolvidas no experimento.

Figura 48 – Processo de integração até o *dashboard*

Fonte: Elaborado pelo autor.

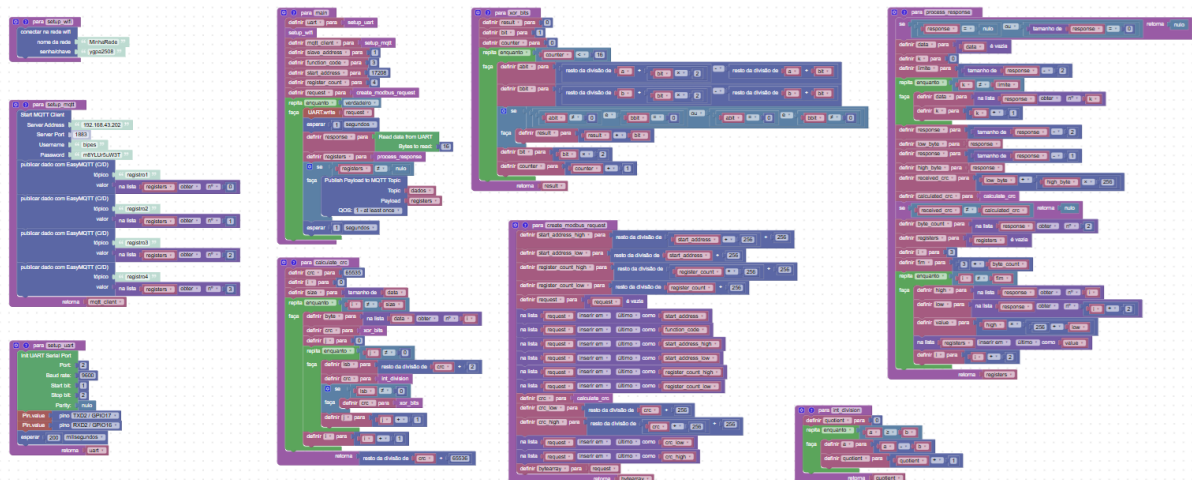
O repositório de código-fonte disponibilizado no GitHub compreende os principais componentes desenvolvidos no contexto deste experimento, ao abranger: o *script* SQL utilizado para a configuração do banco de dados; o código em Diagrama Ladder implementado para o CLP TPW03; os blocos de programação estruturados na plataforma BIPES, bem como sua respectiva transposição para MicroPython; os fluxos de automação desenvolvidos no Node-RED; e o arquivo de projeto com os *dashboards* interativos construídos no Power BI. O material está acessível para fins de consulta e reutilização, podendo ser obtido por meio do repositório correspondente (NASCIMENTO, 2026c).

5.4.3.4 Cenário 2 – Processamento e Visualização com o BIPES

No segundo cenário, a análise evidencia a versatilidade da plataforma BIPES, que é utilizada de forma integral: tanto para a concepção do código em MicroPython, desenvolvido por meio de uma abordagem *low-code*, quanto para a criação de *dashboards* hospedados em seu próprio servidor. Essa configuração representa uma alternativa simplificada e de desenvolvimento ágil, ao sintetizar todas as etapas em uma única ferramenta. Como consequência, os dados capturados, a partir do CLP TPW03, são processados pelo microcontrolador ESP32 e exibidos diretamente em um painel de gestão em tempo real, sem etapas adicionais de persistência de dados.

A partir dessa perspectiva, o código desenvolvido, ilustrado na Figura 49, baseou-se na estrutura previamente elaborada na primeira implementação, mas incorporou a adição de uma função *publisher* MQTT, responsável por enviar periodicamente as mensagens com os dados coletados para um tópico específico, neste caso, ao *broker* do próprio BIPES. Essa modificação tornou possível a comunicação à aba IoT da interface.

Figura 49 – Adição de blocos para *publisher* MQTT



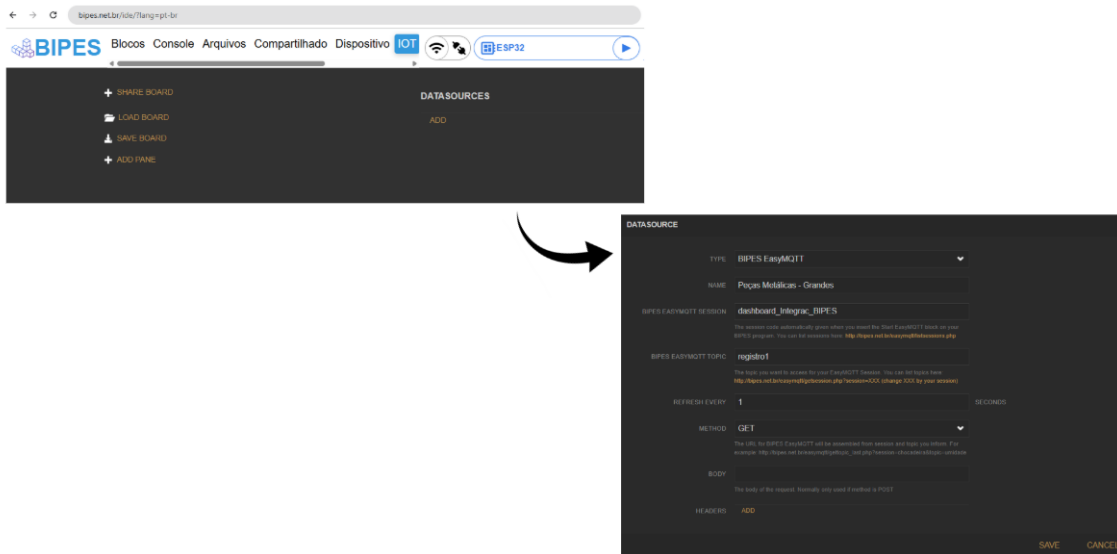
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na aba IoT da plataforma, é possível configurar um *subscriber* para a recepção dos dados transmitidos. Para isso, realizou-se a definição de um *data source*, no qual se especificou o tipo de conexão empregada — neste caso, o BIPES EasyMQTT —, além de parâmetros complementares como o nome, a sessão, o tópico correspondente ao *publisher* previamente configurado, o intervalo de atualização e o método de acesso, que, neste caso, foi definido como GET ⁷ para a captura dos dados disponibilizados no *broker* do BIPES.

⁷ O método GET é uma requisição do protocolo HTTP utilizada para solicitar dados de um servidor ou serviço, o qual retorna as informações disponíveis sem modificar o estado do recurso.

As etapas de configuração podem ser observadas na Figura 50 a seguir.

Figura 50 – Exemplo: Configuração de um *Data Source*



Fonte: Elaborado pelo autor.

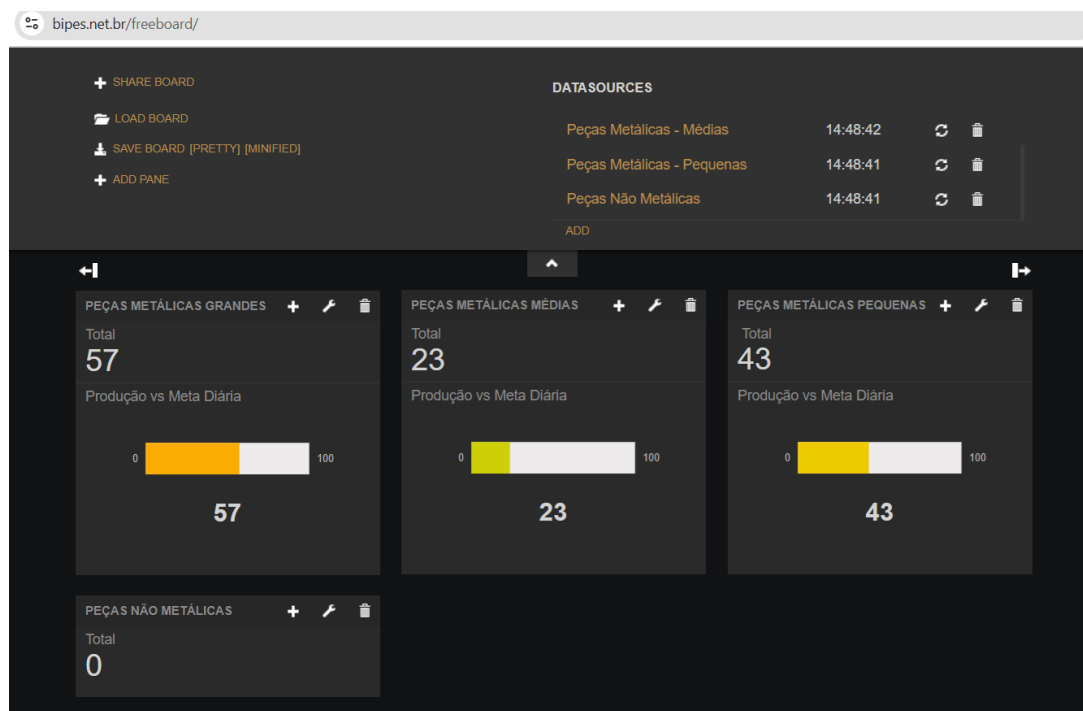
A facilidade na adição e integração de novos blocos, bem como na realização de modificações, reforça o caráter intuitivo do BIPES. A plataforma se destaca pela simplicidade de uso e agilidade na implementação de soluções. Tal flexibilidade permite que pequenas alterações em uma base já existente sejam suficientes para ampliar ou adaptar o uso da ferramenta em diferentes contextos. No experimento demonstrado, bastaram poucos ajustes para transformar de modo significativo o cenário anterior, tornando-o mais alinhado ao processo de captura e visualização imediata dos dados.

5.4.3.4.1 Resultados e Discussões

Nesta proposta de validação, a configuração física de integração permaneceu a mesma, com o CLP WEG TPW03 30 HR-A e o microcontrolador ESP32. Em oposição ao experimento anterior, o qual utiliza ferramentas diversificadas, toda a comunicação e visualização dos dados foram centralizadas no BIPES, sem a necessidade de armazenamento em banco de dados externo. A comunicação entre o CLP e o ESP32 continuou a ser realizada via protocolo Modbus, enquanto a transmissão sem fio de dados para os painéis de monitoramento *online* foi viabilizada pelo BIPES, mantendo o uso do MQTT como mecanismo de publicação e assinatura (*publisher/subscriber*), gerenciado pelo servidor da própria plataforma.

Essa versão reduzida destacou a facilidade de ajuste e o caráter integrável do BIPES, ao permitir que os dados provenientes da esteira da mesa seletora fossem processados e exibidos imediatamente em *dashboards*, sem etapas adicionais de configuração ou armazenamento. A Figura 51 representa o controle e gestão das peças identificadas.

Figura 51 – Painel de Gestão



Fonte: Elaborado pelo autor.

Esta implementação evidenciou o desenvolvimento dinâmico, a baixa curva de aprendizado e a flexibilidade para realizar pequenas modificações em uma implementação *low-code* previamente existente, enquanto foi mantida a coerência com a estrutura modular já estabelecida. Sob essa perspectiva, a abordagem apresentada demonstrou que soluções de supervisão e monitoramento em tempo real podem ser desenvolvidas de maneira eficiente para ambientes industriais.

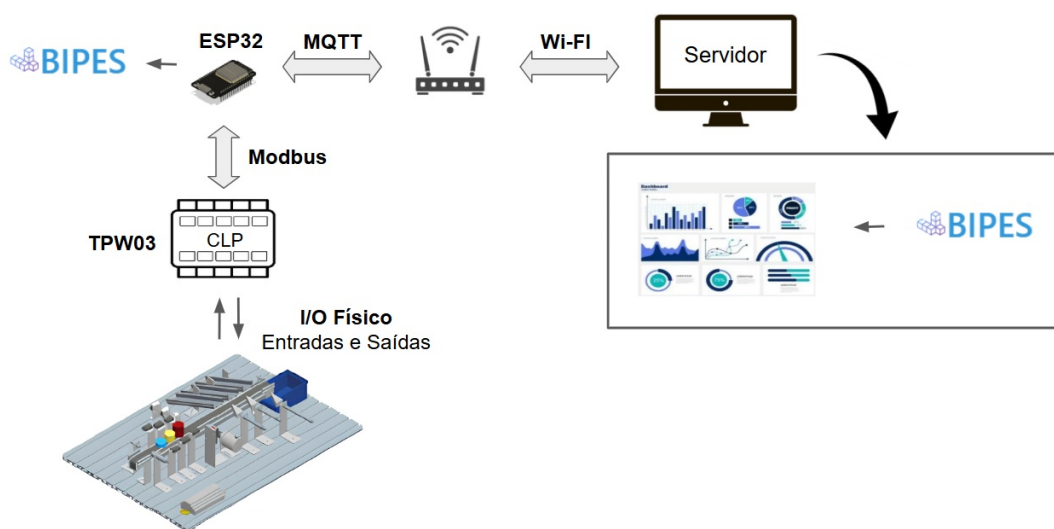
5.4.3.4.2 Proposta de Utilização

Uma prova de conceito foi desenvolvida para demonstrar a utilização dos dados coletados em tempo real, com uso integral apenas do BIPES nas etapas de programação, comunicação e visualização. O experimento manteve a configuração física entre o CLP TPW03 30 HR-A e o microcontrolador ESP32, programado em MicroPython diretamente no BIPES. Nesse arranjo, o ESP32 ficou responsável pela leitura dos dados do CLP via

protocolo Modbus e pelo envio interno, via MQTT, para os *dashboards* também hospedados na plataforma.

A conexão física entre o CLP e o ESP32 seguiu a mesma do cenário anterior, utilizando o cabo TPW-302MC com interface RS-232 e conversor RS232-TTL (MAX3232). Diferentemente da versão anterior, não houve armazenamento em banco de dados externo; todos os dados capturados foram processados e exibidos em um painel de gerenciamento, proporcionando visualização e acompanhamento de maneira imediata. A ilustração na Figura 52 exemplifica esse fluxo.

Figura 52 – Processo de integração até o *dashboard*



Fonte: Elaborado pelo autor.

O repositório de código-fonte inclui os blocos de programação estruturados no BIPES, sua transposição para MicroPython, bem como os fluxos de configuração dos *dashboards*. Todo o material permanece acessível para consulta e reutilização em (NASCIMENTO, 2026d). Isso permite que a base desenvolvida seja adaptada a novas implementações ou experimentos de monitoramento.

5.5 Considerações Finais

As investigações desenvolvidas neste trabalho foram sustentadas pela metodologia *Design Science Research* (DSR), apresentada no Capítulo 4. Este método científico mostrou-se apropriado por permitir a construção e avaliação de artefatos tecnológicos aplicados a problemas reais no contexto industrial. Diferentemente de abordagens puramente descritivas ou explicativas, a DSR orienta o pesquisador na concepção, construção, implementação e avaliação de soluções. Sua aplicação possibilitou não apenas a experimentação,

mas também a reflexão sistemática sobre os resultados obtidos, ao proporcionar um elo entre a prática e a produção de conhecimento acadêmico.

Neste capítulo, foram conduzidos diferentes experimentos com o objetivo de avaliar o *retrofit* industrial aplicado a CLPs, apoiado em tecnologias *low-code*. O primeiro utilizou o modelo Siemens S7-1500, protocolo OPC UA, Node-RED, MySQL e Power BI. O segundo explorou o WEG TPW03 30 HR-A, protocolo Modbus, Node-RED, MySQL e Power BI. O terceiro empregou comunicação sem fio, na qual um microcontrolador ESP32 foi programado com *script* MicroPython apoiado pelo BIPES e atuou como intermediário entre o CLP TPW03 e o servidor. O protocolo Modbus efetuou a comunicação entre o CLP e o ESP32, enquanto o MQTT foi responsável pela transmissão dos dados ao servidor. Esse experimento contemplou dois cenários: no primeiro, os dados foram enviados ao Node-RED, armazenados no MySQL conectado ao Power BI; no segundo, não houve persistência, e o microcontrolador estabeleceu comunicação de forma direta com a plataforma *online* do BIPES, na qual foram exibidas as informações por meio de *dashboards*, abordagem que se mostra adequada para aplicações de monitoramento em tempo real ou prototipagem, nas quais não há necessidade de armazenamento histórico dos dados.

Os resultados dos experimentos demonstraram que é tecnicamente viável integrar CLPs legados que ainda dispõem de recursos de comunicação, mesmo que baseados em padrões mais antigos, a tecnologias digitais contemporâneas por meio de plataformas *low-code*. A adoção de protocolos como OPC UA, Modbus e MQTT reforçou o caráter prático de soluções fundamentadas na documentação dos equipamentos, evidenciando a possibilidade de atualização de sistemas industriais sem a substituição do CLP legado, ainda que, em alguns casos, mediante a adição de dispositivos auxiliares. Dessa forma, as investigações realizadas indicam caminhos promissores para a implementação de estratégias de *retrofit* industrial com ênfase na digitalização.

As ferramentas *low-code* exploradas nesta pesquisa mostraram-se relevantes para a conectividade entre sistemas, ao viabilizarem a comunicação de equipamentos legados por meio de alternativas eficazes e economicamente acessíveis. As plataformas contribuíram para reduzir a complexidade do desenvolvimento e facilitar a integração entre os dispositivos, em contraste com as exigências técnicas das linguagens de programação convencionais. Outro aspecto relevante é que essas ferramentas permitiram a implementação de soluções em menos tempo e com uma curva de aprendizado menor. Nessas circunstâncias, os resultados reforçam o potencial das plataformas *low-code* como facilitadoras de estratégias de *retrofit* industrial e da modernização progressiva de sistemas fabris.

6 . CONCLUSÃO

O presente capítulo tem como objetivo sintetizar os principais resultados desta pesquisa, com destaque da importância do *retrofit* digital aplicado a Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) legados. Serão revisitadas as contribuições técnicas e práticas obtidas, com ênfase na integração de CLPs antigos, apoiada em plataformas digitais *low-code*. Ressalte-se ainda que este capítulo contempla aspectos relacionados à continuidade da digitalização industrial, ao incluir a necessidade de mão de obra qualificada, evidenciar os desafios encontrados ao longo do desenvolvimento desta pesquisa, e o papel das instituições de ensino na formação de profissionais. Por fim, são apresentadas diretrizes para pesquisas futuras e indicadas oportunidades de expansão, à luz das tendências tecnológicas.

6.1 Estudo Aplicado: Integração de CLPs com Plataformas Digitais Low-Code

Esta pesquisa teve como propósito investigar e desenvolver uma abordagem de *retrofit* digital para Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) legados e aos equipamentos, máquinas e células industriais associadas, com a finalidade de facilitar a integração com as tecnologias contemporâneas. Em um cenário industrial brasileiro no qual a maioria das pequenas e médias empresas utiliza maquinário com mais de uma década de uso, a modernização sem a necessidade de substituição completa dos equipamentos apresenta-se como uma alternativa para a manutenção da competitividade e a promoção da sustentabilidade. Assim, este trabalho não apenas contextualizou a importância do *retrofit* industrial, mas também forneceu orientações práticas para tal transição, concentrando-se na adaptação via *software* e na conectividade de sistemas.

A metodologia empregada, baseada no *Design Science Research* (DSR), permitiu articular o rigor acadêmico com a busca por soluções práticas e tangíveis para obstáculos reais do ambiente industrial. Por meio de um processo iterativo, que incluiu a identificação do problema, a revisão bibliográfica sistemática, a realização de uma enquete com especialistas da área de Tecnologia Operacional (TO), o desenvolvimento experimental de artefatos e, finalmente, a avaliação por meio de experimentos controlados, foi possível construir uma fundamentação para as propostas aqui apresentadas. Os resultados obtidos evidenciam a aplicabilidade do *retrofit* digital industrial apoiado em plataformas digitais *low-code*, ao demonstrar a eficácia das práticas analisadas.

- **Experimento 1:** o CLP Siemens S7-1500 (fabricado em 2013) estabeleceu comunicação cabeada via protocolo OPC UA com o servidor Node-RED. A operação manteve-se estável durante 24 horas e a coleta contínua de dados em formato CSV demonstrou a confiabilidade da integração, o que permitiu efetuar análises subsequentes e criar *dashboards*.

- **Experimento 2:** o CLP WEG TPW03 30 HR-A (fabricado em 2008), foi conectado por meio de ligação cabeada via protocolo Modbus ao servidor Node-RED. A documentação técnica foi fundamental para a parametrização e o endereçamento de memória, o que garantiu a captura contínua de dados do CLP. Posteriormente, os dados foram armazenados em um banco de dados MySQL. O experimento foi validado durante 24 horas sem falhas, o que evidenciou a flexibilidade da solução para dispositivos com tecnologias legadas.
- **Experimento 3:** estendeu a abordagem aplicada ao WEG TPW03, ao incorporar uma arquitetura de conectividade sem fio. Nesse contexto, utilizou-se um microcontrolador ESP32 que executou código em MicroPython gerado a partir da plataforma BIPES, e atuou como intermediário na comunicação entre o CLP, via Modbus, e a transmissão dos dados para o Node-RED por meio do protocolo MQTT. Esse cenário foi dividido em duas propostas: uma com persistência de dados em MySQL para *dashboards* via Power BI, e outra com processamento e visualização imediata em um painel de gestão no próprio BIPES. A flexibilidade, agilidade de desenvolvimento e baixa curva de aprendizado das plataformas *low-code* reduziram de maneira significativa a necessidade de conhecimento avançado em linguagens tradicionais de programação e, concomitantemente permitiram a criação de fluxos de dados robustos e escaláveis.

A pesquisa reforçou que, embora o OPC UA seja o protocolo preferencial para ambientes industriais modernos, a ausência de suporte nativo em CLPs antigos não inviabiliza sua conectividade. A adoção de outros protocolos, como Modbus, aliada à mediação por dispositivos IoT de baixo custo e plataformas *low-code* constitui uma alternativa eficaz e economicamente acessíveis para promover a integração entre diferentes tecnologias. Em complemento, a avaliação realizada com profissionais da área de Tecnologia Operacional (TO) evidenciou a importância de considerar a perspectiva do usuário final e os custos envolvidos, em especial para pequenas e médias empresas, que tradicionalmente buscam soluções para minimizar a interrupção dos processos produtivos.

6.2 Desafios Encontrados

Durante o desenvolvimento e a implementação das abordagens propostas nesta pesquisa, foram identificados alguns desafios técnicos e operacionais relacionados à integração de sistemas legados com tecnologias contemporâneas. Tais entraves são comuns em cenários de modernização industrial, em particular quando se busca realizar processos de *retrofit* digital sem substituir integralmente os equipamentos existentes.

Uma das primeiras barreiras observadas está relacionada à conectividade entre dispositivos e sistemas distintos. A integração entre CLPs legados, microcontroladores,

ferramentas *low-code* e de análise de dados exige o uso de diferentes protocolos de troca de dados, como Modbus e MQTT. Embora essas tecnologias sejam amplamente difundidas em âmbito fabril, sua adoção pode demandar ajustes específicos em cada ambiente, em particular quando os equipamentos apresentam limitações inerentes ao *hardware* ou ao *firmware*.

Outro aspecto a ser considerado refere-se à agregação entre tecnologias desenvolvidas em diferentes níveis de abstração. Enquanto plataformas como Node-RED e BIPES oferecem recursos que simplificam a criação de fluxos de dados e o acoplamento entre aplicações, a comunicação com dispositivos industriais pode exigir conhecimentos adicionais sobre endereçamento de registradores, temporização de leitura e demais elementos técnicos envolvidos. Dessa forma, mesmo em ambientes que utilizam soluções apoiadas em *low-code*, ainda é necessário um entendimento técnico mínimo dos protocolos e dispositivos envolvidos.

Também foram identificados obstáculos associados à confiabilidade do tráfego de dados em arquiteturas que utilizam transmissão sem fio. Assim, fatores como estabilidade da rede, latência de transmissão e possíveis perdas de pacotes podem impactar o fluxo contínuo de informações. Ainda que esses elementos não inviabilizem a solução proposta, eles devem ser considerados no dimensionamento e na adequação das estratégias de rede adotadas.

Cabe ainda destacar que a integração entre sistemas industriais tradicionais e plataformas digitais frequentemente envolve pontos de atenção como a etapa de configuração inicial, compatibilidade entre ferramentas e padronização de dados. No entanto, apesar dessas dificuldades, os experimentos realizados demonstraram que, com planejamento adequado e uso de tecnologias acessíveis, é possível desenvolver soluções viáveis para a modernização de sistemas industriais baseados em CLPs legados.

6.3 Limitações do Trabalho

Apesar dos resultados alcançados e das contribuições apresentadas, este trabalho possui algumas limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados e na generalização das soluções propostas.

A primeira delas refere-se ao escopo experimental. As validações foram conduzidas em cenários controlados, com um conjunto específico de equipamentos, como CLPs legados e microcontroladores. Por consequência, os dados obtidos podem não refletir com precisão o comportamento dos sistemas em plantas industriais de grande escala ou em ambientes com maior heterogeneidade de ativos.

Outro ponto relevante é a abrangência dos protocolos analisados. Embora tenham sido explorados padrões consolidados, como Modbus, MQTT e OPC UA, outras alternativas

vigentes no contexto da Indústria 4.0 não foram incluídas. Assim, a integração com determinados ecossistemas pode demandar adaptações adicionais não contempladas neste estudo. Em complemento, a avaliação qualitativa baseou-se em um grupo delimitado de especialistas e profissionais de Tecnologia Operacional (TO), o que sugere cautela ao transpor as conclusões para diferentes perfis de usuários ou contextos fabris.

Destaca-se, ainda, a ausência de uma análise de desempenho em longo prazo. Aspectos como escalabilidade, tolerância a falhas, segurança cibernética e manutenção contínua não foram explorados extensivamente, sendo recomendados como tópicos para investigações futuras.

Por fim, ressalta-se que o uso de plataformas *low-code*, embora favoreça a agilidade no desenvolvimento, pode impor restrições em cenários que exijam controle granular sobre o código, otimização rigorosa de performance ou customizações de baixo nível. Nessa perspectiva, a adoção dessas ferramentas deve ser ponderada conforme os requisitos específicos de cada aplicação.

6.4 Mão de Obra Qualificada e Instituições de Ensino

A implementação de iniciativas de *retrofit* industrial, especialmente no contexto do *retrofit* digital e da integração com tecnologias associadas à Indústria 4.0, demanda a atuação de profissionais qualificados capazes de compreender tanto os sistemas legados quanto as novas arquiteturas de conectividade e processamento de dados (RUPPRECHT et al., 2021). Embora a disponibilidade de tecnologias e metodologias seja um fator importante para a modernização industrial, sua aplicação efetiva depende diretamente da existência de recursos humanos capacitados para planejar, implementar, manter e evoluir essas soluções (TRAN et al., 2022).

Em ambientes industriais nos quais ainda predominam equipamentos e práticas associadas à Indústria 3.0, é comum que técnicos e engenheiros possuam um perfil mais voltado à operação e manutenção de sistemas tradicionais. Nesse cenário, a atualização de competências torna-se um elemento relevante para viabilizar processos de modernização que envolvem conceitos como conectividade, integração de dados e utilização de plataformas digitais. Nesse contexto, instituições de ensino e formação profissional desempenham papel estratégico na preparação de profissionais capazes de atuar nessa transição tecnológica.

No Brasil, organizações como o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) contribuem para a formação técnica alinhada às demandas da indústria. De forma complementar, as Escolas Técnicas Estaduais (ETECs) ampliam a oferta de formação técnica, enquanto instituições de ensino superior oferecem cursos de graduação tradicionais, como Engenharia Elétrica, Engenharia de Computação e Engenharia Mecatrônica, além de cursos superiores de tecnologia voltados à automação industrial, sistemas embarcados e

áreas correlatas. Em conjunto, esses diferentes níveis de formação, somados a cursos de extensão e programas de capacitação continuada, ampliam as oportunidades de qualificação e requalificação profissional necessárias para atender às demandas emergentes da indústria.

A articulação entre educação profissional, ensino superior e setor produtivo pode, portanto, favorecer a disseminação de competências relacionadas à modernização de sistemas industriais, contribuindo para ampliar a adoção de práticas de *retrofit industrial*, especialmente aquelas voltadas à integração digital de equipamentos e processos produtivos.

6.5 Trabalhos Futuros

A jornada de pesquisa e desenvolvimento de soluções para o retrofit digital é contínua e rica em oportunidades. Com base nos resultados e aprendizados desta dissertação, identificamos possíveis direções para trabalhos futuros:

- **Análise de desempenho em larga escala:** avaliar a solução proposta em ambientes industriais reais com maior volume de dados e número de dispositivos conectados, a fim de aferir a escalabilidade, latência e confiabilidade em cenários mais complexos. Isso pode incluir o ajuste dos fluxos de dados no Node-RED e BIPES para garantir máxima eficiência em tempo real.
- **Desenvolvimento de plugins e módulos personalizados:** criar e disponibilizar novos blocos específicos para Node-RED e BIPES, os quais facilitem a integração com uma gama ainda maior de CLPs legados e outros dispositivos industriais proprietários, com a finalidade de ampliar o alcance das soluções baseadas em *low-code*.
- **Integração com Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina:** explorar a aplicação de algoritmos de *Machine Learning* para análise preditiva dos dados coletados, permitindo manutenção preditiva, otimização de processos e identificação de anomalias em tempo real, com a transformação dos dados brutos em conhecimento aplicável.

REFERÊNCIAS

- AGHENTA, L. O.; IQBAL, T. Design and implementation of a low-cost, open source iot-based scada system using esp32 with oled, thingsboard and mqtt protocol. *AIMS Electronics and Electrical Engineering*, American Institute of Mathematical Sciences (AIMS), v. 4, n. 1, p. 57–86, 2019.
- AGUIRREZABAL, I. A. *Hierarchical Component-based programming of control systems*. Tese (Doutorado) — Wien, 2018.
- Agência Sebrae. *Abertura de micro e pequenas empresas tem alta de 6,6% em 2023*. 2023. Acessado: 6-ago-2024. Disponível em: <

- BAIO, A. A.; CARRER, M. J. Adoption of industry 4.0 technologies: an analysis of small and medium-sized companies in the state of são paulo, brazil. *Gestão & Produção*, SciELO Brasil, v. 29, p. e122, 2022.
- BAJPAI, M. Building time-series data monitoring pipeline from the cloud to grafana. *International Journal For Multidisciplinary Research*, v. 5, n. 1, p. 10–36948, 2023.
- BAKHTARI, A. R. et al. Industry 4.0 implementation challenges in manufacturing industries: an interpretive structural modelling approach. *Procedia computer science*, Elsevier, v. 176, p. 2384–2393, 2020.
- BANGEMANN, T. et al. Integration of classical components into industrial cyber–physical systems. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 104, n. 5, p. 947–959, 2016.
- BANSAL, S.; KUMAR, D. Iot ecosystem: A survey on devices, gateways, operating systems, middleware and communication. *International Journal of Wireless Information Networks*, Springer, v. 27, n. 3, p. 340–364, 2020.
- BARTNITZKI, T. Mining 4.0: Importance of industry 4.0 for the raw materials sector. *Artif. Intell*, v. 2, n. 1, p. 25–31, 2017.
- BASEM, M. Comparing plc, software containers and edge computing for future industrial use: a literature review. 2022.
- BASNIGHT, Z. et al. Firmware modification attacks on programmable logic controllers. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, Elsevier, v. 6, n. 2, p. 76–84, 2013.
- BAYLE, J. *C programming for Arduino*. [S.l.]: Packt Publishing Ltd, 2013.
- BELLINI, P.; NESI, P.; PANTALEO, G. Iot-enabled smart cities: A review of concepts, frameworks and key technologies. *Applied Sciences*, MDPI, v. 12, n. 3, p. 1607, 2022.
- BETTLER, J. et al. Case studies of iec 61850 process bus systems using goose and sampled values: Recent installations and research. In: *proceedings of the 47th Annual Western Protective Relay Conference, virtual format*. [S.l.: s.n.], 2020.
- BHUSHAN, B.; SAHOO, G. Requirements, protocols, and security challenges in wireless sensor networks: An industrial perspective. *Handbook of computer networks and cyber security: principles and paradigms*, Springer, p. 683–713, 2020.
- BIPES. *BIPES: Block Based IPv6 Programming Environment for Embedded Systems*. 2026. Acesso em: 16 mar. 2026. Disponível em: <<http://www.bipes.net.br/ide/?lang=pt-br>>.
- BOLTON, W. *Programmable logic controllers*. [S.l.]: Newnes, 2015.
- BONELLI, R.; PESSÔA, S. d. A. Desindustrialização no brasil: um resumo da evidência. 2010.
- BRADLEY, D. *Mechatronics: electronics in products and processes*. [S.l.]: Routledge, 2018.
- BROOKS, P. Ethernet/ip-industrial protocol. In: IEEE. *ETFA 2001. 8th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Proceedings (Cat. No. 01TH8597)*. [S.l.], 2001. v. 2, p. 505–514.

- BURNS, T.; COSGROVE, J.; DOYLE, F. A review of interoperability standards for industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, Elsevier, v. 38, p. 646–653, 2019.
- CAMPISANO, A. et al. Potential and limitations of modern equipment for real time control of urban wastewater systems. *Urban Water Journal*, Taylor & Francis, v. 10, n. 5, p. 300–311, 2013.
- CÂNDIDO, G. et al. Soa at device level in the industrial domain: Assessment of opc ua and dpws specifications. In: IEEE. *2010 8th IEEE International Conference on Industrial Informatics*. [S.l.], 2010. p. 598–603.
- CARLO, F. D. et al. Retrofitting a process plant in an industry 4.0 perspective for improving safety and maintenance performance. *Sustainability*, MDPI, v. 13, n. 2, p. 646, 2021.
- CASTELLANOS, J. H. et al. Attkfinder: Discovering attack vectors in plc programs using information flow analysis. In: *Proceedings of the 24th International Symposium on Research in Attacks, Intrusions and Defenses*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 235–250.
- CASTILLÓN, D. C. et al. Automation trends in industrial networks and iiot. *Industrial IoT: Challenges, Design Principles, Applications, and Security*, Springer, p. 161–187, 2020.
- CAVADINI, F. A. et al. Iec-61499 distributed automation for the next generation of manufacturing systems. In: *The Digital Shopfloor-Industrial Automation in the Industry 4.0 Era*. [S.l.]: River Publishers, 2022. p. 103–127.
- CAVALCANTI, D. et al. Extending accurate time distribution and timeliness capabilities over the air to enable future wireless industrial automation systems. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 107, n. 6, p. 1132–1152, 2019.
- CAVALIERI, S. Industrial communication networks: From fieldbus to ethernet. *Computer Standards and Interfaces*, Elsevier, v. 66, p. 103348, 2019.
- CAVALIERI, S.; SALAFIA, M. G. Asset administration shell for plc representation based on iec 61131–3. *IEEE Access*, IEEE, v. 8, p. 142606–142621, 2020.
- CHARAN, B. V.; KULKARNI, L. Survey on micro-controller based bad usb attacks. *Journal of Positive School Psychology*, p. 965–974, 2023.
- COMPARE, M.; BARALDI, P.; ZIO, E. Challenges to iot-enabled predictive maintenance for industry 4.0. *IEEE Internet of Things Journal*, IEEE, v. 7, n. 5, p. 4585–4597, 2019.
- CRESWELL, J. W.; MILLER, D. L. Determining validity in qualitative inquiry. *Theory into practice*, Taylor & Francis, v. 39, n. 3, p. 124–130, 2000.
- DAI, W.; VYATKIN, V. Redesign distributed plc control systems using iec 61499 function blocks. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, IEEE, v. 9, n. 2, p. 390–401, 2012.
- DECOTIGNIE, J.-D. Ethernet-based real-time communication. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 93, n. 6, p. 1102–1117, 2005.
- DERHAMY, H. et al. Protocol interoperability of opc ua in service oriented architectures. In: IEEE. *2017 IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. [S.l.], 2017. p. 44–50.

- DING, B.; HERNANDEZ, X. F.; JANE, N. A. Combining lean and agile manufacturing competitive advantages through industry 4.0 technologies: an integrative approach. *Production planning & control*, Taylor & Francis, v. 34, n. 5, p. 442–458, 2023.
- DING, J. et al. Iot connectivity technologies and applications: A survey. *IEEE Access*, IEEE, v. 8, p. 67646–67673, 2020.
- DORNELLES, J. de A.; AYALA, N. F.; FRANK, A. G. Smart working in industry 4.0: How digital technologies enhance manufacturing workers' activities. *Computers & Industrial Engineering*, Elsevier, v. 163, p. 107804, 2022.
- DRESCH, A. et al. *Design science research*. [S.l.]: Springer, 2015.
- DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; JUNIOR, J. A. V. A. *Design science research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia*. [S.l.]: Bookman Editora, 2020.
- DRIVERSCAPE. *USB-SERIAL CH341 Driver*. 2024. Acesso em: 16 mar. 2026. Disponível em: <<https://www.driverscape.com/download/usb-serial-ch341>>.
- ELHUSSEINY, H. M.; CRISPIM, J. Smes, barriers and opportunities on adopting industry 4.0: A review. *Procedia Computer Science*, Elsevier, v. 196, p. 864–871, 2022.
- FELSER, M. Real-time ethernet: Industrial networking with ethernet. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 93, n. 6, p. 1137–1154, 2005.
- FELSER, M.; SAUTER, T. Standardization of industrial ethernet-the next battlefield? In: IEEE. *IEEE International Workshop on Factory Communication Systems, 2004. Proceedings*. [S.l.], 2004. p. 413–420.
- FERENCZ, K.; DOMOKOS, J. Using node-red platform in an industrial environment. *XXXV. Jubileumi Kandó Konferencia, Budapest*, p. 52–63, 2019.
- FERREIRA, L. A. P. G. A industrialização no período jk e suas conseqüências para o endividamento externo e a inflação. 2006.
- FERST, M. K. et al. Implementation of secure communication with modbus and transport layer security protocols. In: IEEE. *2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*. [S.l.], 2018. p. 155–162.
- FIGUEROA-LORENZO, S.; AÑORGA, J.; ARRIZABALAGA, S. A survey of iiot protocols: A measure of vulnerability risk analysis based on cvss. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, ACM New York, NY, USA, v. 53, n. 2, p. 1–53, 2020.
- FLAUS, J.-M. *Cybersecurity of industrial systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2019.
- FOVINO, I. N. et al. Design and implementation of a secure modbus protocol. In: SPRINGER. *Critical Infrastructure Protection III: Third Annual IFIP WG 11.10 International Conference on Critical Infrastructure Protection, Hanover, New Hampshire, USA, March 23-25, 2009, Revised Selected Papers 3*. [S.l.], 2009. p. 83–96.
- FRONCHETTI, F. et al. Language impact on productivity for industrial end users: A case study from programmable logic controllers. *Journal of Computer Languages*, Elsevier, v. 69, p. 101087, 2022.

- GALLOWAY, B.; HANCKE, G. P. Introduction to industrial control networks. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, IEEE, v. 15, n. 2, p. 860–880, 2011.
- GARCÍA, J. I.; CANO, R. E.; CONTRERAS, J. D. Digital retrofit: A first step toward the adoption of industry 4.0 to the manufacturing systems of small and medium-sized enterprises. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 234, n. 8, p. 1156–1169, 2020.
- GASPARETTO, A.; SCALERA, L. et al. A brief history of industrial robotics in the 20th century. *Advances in Historical Studies*, v. 8, p. 24–35, 2019.
- GIVEHCHI, O. et al. Interoperability for industrial cyber-physical systems: An approach for legacy systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, IEEE, v. 13, n. 6, p. 3370–3378, 2017.
- GOMES, M. R.; SOUZA, S. C. I. de; MOURÃO, P. J. R. Challenges in the brazilian labor market: Pre-and post-pandemic wage gaps. *Finance Research Letters*, Elsevier, p. 108028, 2025.
- GOMEZ, C.; OLLER, J.; PARADELLS, J. Overview and evaluation of bluetooth low energy: An emerging low-power wireless technology. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 50, n. 5, p. 117–124, 2012.
- GONZÁLEZ, I. et al. A literature survey on open platform communications (opc) applied to advanced industrial environments. *Electronics*, MDPI, v. 8, n. 5, p. 510, 2019.
- GROUMPOS, P. P. A critical historical and scientific overview of all industrial revolutions. *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier, v. 54, n. 13, p. 464–471, 2021.
- GUPTA, A. Uart communication. In: *The IoT hacker's handbook: a practical guide to hacking the Internet of things*. [S.l.]: Springer, 2019. p. 59–80.
- GUREVICH, V. *Electric relays: principles and applications*. [S.l.]: CRC Press, 2018.
- HAMMOND, T.; DAVIS, R. Ladder, a sketching language for user interface developers. In: *ACM SIGGRAPH 2007 courses*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 35–es.
- HANSSSEN, D. H. *Programmable logic controllers: a practical approach to IEC 61131-3 using CODESYS*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2015.
- HEINL, M. P. et al. From standard to practice: Towards isa/iec 62443-conform public key infrastructures. In: SPRINGER. *International Conference on Computer Safety, Reliability, and Security*. [S.l.], 2023. p. 196–210.
- HELU, M. et al. Enabling smart manufacturing technologies for decision-making support. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. [S.l.], 2016. v. 50084, p. V01BT02A035.
- HERNÁNDEZ, E. et al. Implementing rami4. 0 in production—a multi-case study. In: SPRINGER. *Progress in Digital and Physical Manufacturing: Proceedings of ProDPM'19*. [S.l.], 2020. p. 49–56.

- ILARI, S. et al. Machine tool transition from industry 3.0 to 4.0: A comparison between old machine retrofitting and the purchase of new machines from a triple bottom line perspective. *Sustainability*, MDPI, v. 13, n. 18, p. 10441, 2021.
- IMTIAZ, J.; JASPERNEITE, J. Scalability of opc-ua down to the chip level enables “internet of things”. In: IEEE. *2013 11th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. [S.l.], 2013. p. 500–505.
- IQBAL, S.; KHAN, S. A.; KHAN, Z. A. Benchmarking industrial plc & pac: An approach to cost effective industrial automation. In: IEEE. *2013 International Conference on Open Source Systems and Technologies*. [S.l.], 2013. p. 141–146.
- JAPÓN, B. R. *Learn IoT Programming Using Node-RED: Begin to Code Full Stack IoT Apps and Edge Devices with Raspberry Pi, NodeJS, and Grafana*. [S.l.]: Bpb Publications, 2022.
- JASPERT, D. et al. Smart retrofitting in manufacturing: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 312, p. 127555, 2021.
- JOHNSON, D. *Programmable controllers for factory automation*. [S.l.]: CRC Press, 2020.
- JUNIOR, A. G. D. S. et al. Bipes: Block based integrated platform for embedded systems. *IEEE Access*, IEEE, v. 8, p. 197955–197968, 2020.
- JUNIOR, A. G. d. S. et al. Bipes: Block based integrated platform for embedded systems. *IEEE Access*, IEEE, v. 8, p. 197955–197968, 2020.
- KANAAN, K. et al. Industry 4.0-compliant digitalization of a re-configurable and flexible laser cutter module within a digital factory. In: IEEE. *2023 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. [S.l.], 2023. p. 1–7.
- KANNOTH, S.; SCHNICKE, F.; ANTONINO, P. O. Enabling industry 4.0 communication protocol interoperability: An opc ua case study. In: *7th Conference on the Engineering of Computer Based Systems*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–9.
- KARATSUIPA, V. Automated system of production line management with usage of programmable logic controllers. National Aviation University, 2023.
- KHAN, M. A. et al. Review on upgradability—a product lifetime extension strategy in the context of product service systems. *Journal of cleaner production*, Elsevier, v. 204, p. 1154–1168, 2018.
- KHOLIKHMATOV, B. et al. Modelling of laboratory work in the science “fundamentals of power supply” using an educational simulator based on a programmed logic controller. In: EDP SCIENCES. *E3S Web of Conferences*. [S.l.], 2023. v. 384, p. 01032.
- KIANGALA, K. S. *High tech automated bottling process for small to medium scale enterprises using PLC, scada and basic industry 4.0 concepts*. [S.l.]: Diss, 2018.
- KIM, D.-S.; TRAN-DANG, H. Industrial sensors and controls in communication networks. In: SPRINGER. *Computer Communications and Networks*. [S.l.], 2019.
- KINGSTON, R. et al. Adaptive gradient enhancement for optimizing large language models: An empirical study on open source architectures. OSF, 2024.

- KITCHENHAM, B.; BRERETON, P. A systematic review of systematic review process research in software engineering. *Information and software technology*, Elsevier, v. 55, n. 12, p. 2049–2075, 2013.
- KODALI, R. K.; ANJUM, A. Iot based home automation using node-red. In: IEEE. *2018 Second International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT)*. [S.l.], 2018. p. 386–390.
- KOLLA, S. S. V. K. et al. Retrofitting of legacy machines in the context of industrial internet of things (iiot). *Procedia Computer Science*, Elsevier, v. 200, p. 62–70, 2022.
- KOO, J.; KIM, Y.-G. Resource identifier interoperability among heterogeneous iot platforms. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, Elsevier, v. 34, n. 7, p. 4191–4208, 2022.
- KRUPA, P. et al. Plc implementation of a real-time embedded mpc algorithm based on linear input/output models. *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier, v. 53, n. 2, p. 6987–6992, 2020.
- KULKARNI, V.; NARAYANA, K.; SAHOO, S. K. A survey on interference avoiding methods for wireless sensor networks working in the 2.4 ghz frequency band. *Journal of Engineering Science & Technology Review*, v. 13, n. 3, 2020.
- LADEGOURDIE, M.; KUA, J. Performance analysis of opc ua for industrial interoperability towards industry 4.0. *IoT*, MDPI, v. 3, n. 4, p. 507–525, 2022.
- LI, X. et al. A data-driven reversible framework for achieving sustainable smart product-service systems. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 279, p. 123618, 2021.
- LIAO, Y. et al. Industrial internet of things: A survey on the enabling technologies, applications, and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, IEEE, v. 4, n. 1, p. 1–20, 2017.
- LIMA, F.; MASSOTE, A. A.; MAIA, R. F. Iot energy retrofit and the connection of legacy machines inside the industry 4.0 concept. In: IEEE. *IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. [S.l.], 2019. v. 1, p. 5499–5504.
- LIN, J. et al. A survey on internet of things: Architecture, enabling technologies, security and privacy, and applications. *IEEE Internet of Things Journal*, IEEE, v. 4, n. 5, p. 1125–1142, 2017.
- LINS, R. G. et al. A novel methodology for retrofitting cnc machines based on the context of industry 4.0. In: IEEE. *2017 IEEE international systems engineering symposium (ISSE)*. [S.l.], 2017. p. 1–6.
- LINS, T.; OLIVEIRA, R. A. R. Cyber-physical production systems retrofitting in context of industry 4.0. *Computers & industrial engineering*, Elsevier, v. 139, p. 106193, 2020.
- LUO, Y. et al. Characteristics and challenges of low-code development: the practitioners' perspective. In: *Proceedings of the 15th ACM/IEEE international symposium on empirical software engineering and measurement (ESEM)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–11.
- MACAULAY, T.; SINGER, B. L. *Cybersecurity for industrial control systems: SCADA, DCS, PLC, HMI, and SIS*. [S.l.]: CRC Press, 2011.

- MAIRAL, A.; MULLER, M.; ROSSI, T. Value proposition for smart retrofit solutions. In: *SMARTGREENS*. [S.l.: s.n.], 2022. p. 125–129.
- MARQUES, J. A. G. et al. Bipes: Programação de dispositivos eletrônicos em blocos para atividades educacionais mão na massa. *Cadernos CEDES*, SciELO Brasil, v. 43, n. 120, p. 98–107, 2023.
- MARTIKKALA, A. Towards utilization of low-cost technologies in democratizing iot development. Tampere University, 2024.
- MEHTA, B. R.; REDDY, Y. J. *Industrial process automation systems: design and implementation*. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2014.
- MELLAL, M. A. Obsolescence—a review of the literature. *Technology in Society*, Elsevier, v. 63, p. 101347, 2020.
- MENDONCA, R. S. et al. Development of the novel methodology to retrofit of the legacy system in context of industry 4.0. *IEEE Access*, IEEE, 2023.
- MERKUMIANS, M. M.; GSELLMANN, P.; SCHITTER, G. Hierarchization and integration of iec 61131-3 and iec 61499 for enhanced reusability. In: IEEE. *2021 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. [S.l.], 2021. p. 1–4.
- MOHAJAN, H. The first industrial revolution: Creation of a new global human era. 2019.
- MOODY, P. E.; MORLEY, R. E. *The Technology Machine: How Manufacturing Will Work in the Year 2000*. [S.l.]: Simon and Schuster, 2001.
- MORGAN, J. et al. Industry 4.0 smart reconfigurable manufacturing machines. *Journal of Manufacturing Systems*, Elsevier, v. 59, p. 481–506, 2021.
- MOUNITHA, S. et al. Implementation of codesys programming using raspberry-pi for weighing machine control. In: IEEE. *2023 2nd International Conference on Advancements in Electrical, Electronics, Communication, Computing and Automation (ICAECA)*. [S.l.], 2023. p. 1–4.
- NAG, S. J.; MITHUN, T. Understanding software upgrade and downgrade processes in data centers. In: IEEE. *2022 IEEE 3rd Global Conference for Advancement in Technology (GCAT)*. [S.l.], 2022. p. 1–6.
- NARA, E. O. B. et al. Expected impact of industry 4.0 technologies on sustainable development: A study in the context of brazil’s plastic industry. *Sustainable Production and Consumption*, Elsevier, v. 25, p. 102–122, 2021.
- NASCIMENTO, E. *15 studies - List of filtered*. 2025. Mendeley Data, V1. Accessed: 2025-10-26.
- NASCIMENTO, E. *List of Filtered Studies*. 2025. Mendeley Data, V1. Disponível em: <<https://doi.org/10.17632/4ztrj24r4c.1>>.
- NASCIMENTO, E. *List of Studies - After defining the search string*. 2025. Mendeley Data, V1. Disponível em: <<https://doi.org/10.17632/f8d33bzbh2.1>>.

NASCIMENTO, E. *List of Studies: 2019 - 2024*. Mendeley Data, 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.17632/nm3b3shwdj.1>>.

NASCIMENTO, E. V. do. *proj_pesquisa_clp_v1: Repositório de códigos e scripts para retrofit industrial*. 2026. Acesso em: 16 mar. 2026. Disponível em: <https://github.com/eduardovn/proj_pesquisa_clp_v1>.

NASCIMENTO, E. V. do. *proj_pesquisa_clp_v2: Repositório de códigos e scripts para retrofit industrial*. 2026. Acesso em: 16 mar. 2026. Disponível em: <https://github.com/eduardovn/proj_pesquisa_clp_v2>.

NASCIMENTO, E. V. do. *proj_pesquisa_clp_v3_1: Repositório de códigos e scripts para retrofit industrial*. 2026. Acesso em: 16 mar. 2026. Disponível em: <https://github.com/eduardovn/proj_pesquisa_clp_v3_1>.

NASCIMENTO, E. V. do. *proj_pesquisa_clp_v3_2: Repositório de códigos e scripts para retrofit industrial*. 2026. Acesso em: 16 mar. 2026. Disponível em: <https://github.com/eduardovn/proj_pesquisa_clp_v3_2>.

NAUDÉ, W.; NAGLER, P. The ossified economy: The case of germany, 1870-2020. IZA Discussion Paper, 2022.

NDJIONGUE, A. R.; FERREIRA, H. C. Power line communications (plc) technology: More than 20 years of intense research. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, Wiley Online Library, v. 30, n. 7, p. e3575, 2019.

NEZHMETDINOV, R. et al. An approach to the development of logical control systems for technological equipment in the concept of industry 4.0. In: EDP SCIENCES. *MATEC Web of Conferences*. [S.l.], 2020. v. 329, p. 03044.

NUGRAHA, N. W. et al. Implementation of industrial iot integration using node-red and plc on cascade control level and flow plant. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, v. 11, n. 6, p. 191–205, 2025.

NWAZOR, N. O.; AUDU, E. E. Data communications network for real-time industrial control systems. *Nigerian Journal of Technological Development*, v. 19, n. 1, p. 48–58, 2022.

ONODA, S. S. Análise comparativa da desindustrialização brasileira nos períodos 2000-2010 e 2011-2018 sob uma perspectiva intrassetorial. *Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Econômicas)-Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro*, 2021.

ONWUEGBUZIE, I. U.; OLOWOJEBUTU, A. O.; AKOMOLEDE, K. K. Node-red and iot analytics: A real-time data processing and visualization platform. *Tech-Sphere Journal of Pure and Applied Sciences (TSJPAS)*, v. 1, n. 1, p. 1–12, 2024.

OREIRO, J. L. A grande recessão brasileira: diagnóstico e uma agenda de política econômica. *Estudos Avançados*, SciELO Brasil, v. 31, p. 75–88, 2017.

PACHECO, J. V. Programação de um módulo de business intelligence no block-based integrated platform for embedded systems (bipes). Universidade Federal de São Carlos, 2022.

- PALMEIRA, J. et al. Migrating legacy production lines into an industry 4.0 ecosystem. In: IEEE. *2022 IEEE 20th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. [S.l.], 2022. p. 429–434.
- PANAYIOTOU, N. A.; STERGIOU, K. E.; PANAGIOTOU, N. Using lean six sigma in small and medium-sized enterprises for low-cost/high-effect improvement initiatives: a case study. *International Journal of Quality & Reliability Management*, Emerald Publishing Limited, v. 39, n. 5, p. 1104–1132, 2022.
- PAPULOVÁ, Z.; GAŽOVÁ, A.; ŠUFLIARSKÝ, L. Implementation of automation technologies of industry 4.0 in automotive manufacturing companies. *Procedia Computer Science*, Elsevier, v. 200, p. 1488–1497, 2022.
- PATHMUDI, V. R. et al. A systematic review of iot technologies and their constituents for smart and sustainable agriculture applications. *Scientific African*, Elsevier, v. 19, p. e01577, 2023.
- PATIL, S.; APPANNAVAR, A. *Implementation of PLC Based Automated CNG Tank for Chuter Assembly Line*. [S.l.]: vol, 2022.
- PEREIRA, C. E.; DIEDRICH, C.; NEUMANN, P. Communication protocols for automation. In: *Springer Handbook of Automation*. [S.l.]: Springer, 2023. p. 535–560.
- PILEVARI, N. et al. Industry revolutions development from industry 1.0 to industry 5.0 in manufacturing. *Journal of Industrial Strategic Management*, Islamic Azad University, v. 5, n. 2, p. 44, 2020.
- R JOHNSON JR et al. Temporal dynamics of attitude decisions: A test of the iterative reprocessing model using event-related potentials. *Cortex*, Elsevier, v. 169, p. 174–190, 2023.
- RAHMAN, A. et al. Launch of denial of service attacks on the modbus/tcp protocol and development of its protection mechanisms. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, Elsevier, v. 39, p. 100568, 2022.
- RANA, B.; SINGH, Y.; SINGH, P. K. A systematic survey on internet of things: Energy efficiency and interoperability perspective. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, Wiley Online Library, v. 32, n. 8, p. e4166, 2021.
- RATH, K. C.; KHANG, A.; ROY, D. The role of internet of things (iot) technology in industry 4.0 economy. In: *Advanced IoT Technologies and Applications in the Industry 4.0 Digital Economy*. [S.l.]: CRC Press, 2024. p. 1–28.
- RAWAT, B.; PURNAMA, S. et al. Mysql database management system (dbms) on ftp site lapan bandung. *International Journal of Cyber and IT Service Management*, International Institute for Advanced Science and Technology, v. 1, n. 2, p. 173–179, 2021.
- REIS, F. B. dos; JÚNIOR, A. S. C. Industry 4.0: An investigation of benefits and barriers with managers of brazilian manufacturers adopters. *Journal of Engineering and Technology Management*, Elsevier, v. 71, p. 101786, 2024.
- REVESZ, R. L. Environmental regulation, ideology, and the dc circuit. *Va. L. Rev.*, HeinOnline, v. 83, p. 1717, 1997.

- RICHARDSON, C. et al. New development platforms emerge for customer-facing applications. *Forrester: Cambridge, MA, USA*, v. 15, 2014.
- RÖMER, L.; JEROSCHEWSKI, S. E.; KRISTAN, J. Leveraging eclipse iot in the arrowhead framework. In: IEEE. *NOMS 2020-2020 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium*. [S.l.], 2020. p. 1–6.
- ROSIK, K. et al. Custom-tailored clone detection for iec 61131-3 programming languages. *Journal of Systems and Software*, Elsevier, v. 182, p. 111070, 2021.
- RÚNARSSON, S. *Open source hardware and software alternative to industrial PLC*. Dissertação (Mestrado) — Høgskolen i Sørøst-Norge, 2016.
- RUPPRECHT, B. et al. Concepts for retrofitting industrial programmable logic controllers for industrie 4.0 scenarios. In: IEEE. *2021 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. [S.l.], 2021. v. 1, p. 1034–1041.
- SAHAI, S. Development of plc based control system for automatic shearing machine. *International Journal for Scientific Research and Development*, v. 03, 2015.
- SANCHEZ-LONDONO, D.; BARBIERI, G.; FUMAGALLI, L. Smart retrofitting in maintenance: a systematic literature review. *Journal of Intelligent Manufacturing*, Springer, v. 34, n. 1, p. 1–19, 2023.
- SANCHIS, R. et al. Low-code as enabler of digital transformation in manufacturing industry. *Applied Sciences*, MDPI, v. 10, n. 1, p. 12, 2019.
- SANFILIPPO, F.; AUSTRENG, K. Sustainable approach to teaching embedded systems with hands-on project-based visible learning. *Int. J. Eng. Educ*, v. 37, p. 814–829, 2021.
- SANTOS, R. C. et al. Robotics and embedded systems applied to the buried pipeline inspection. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, v. 9, n. 8, p. 1864–1874, 2015.
- SCHIEFERDECKER, I. et al. Iot-testware-an eclipse project. In: IEEE. *2017 IEEE international conference on software quality, reliability and security (QRS)*. [S.l.], 2017. p. 1–8.
- SCHWAB, K. *A quarta revolução industrial*. [S.l.]: Edipro, 2019.
- SEHR, M. A. et al. Programmable logic controllers in the context of industry 4.0. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, IEEE, v. 17, n. 5, p. 3523–3533, 2020.
- SENGE, P. M. *A quinta disciplina: a arte e prática da organização que aprende*. [S.l.]: Editora Best Seller, 2018.
- SERHANE, A. et al. Programmable logic controllers based systems (plc-bs): Vulnerabilities and threats. *SN Applied Sciences*, Springer, v. 1, p. 1–12, 2019.
- SHAIKH, M.; SHAH, P.; SEKHAR, R. Communication protocols in industry 4.0. In: IEEE. *2023 International Conference on Sustainable Emerging Innovations in Engineering and Technology (ICSEIET)*. [S.l.], 2023. p. 709–714.

- SHAIR, F. et al. Assessing the efficiency and total factor productivity growth of the banking industry: do environmental concerns matters? *Environmental Science and Pollution Research*, Springer, v. 28, p. 20822–20838, 2021.
- SHENG, C.; CAO, Y.; XUE, B. Residential energy sustainability in china and germany: The impact of national energy policy system. *Sustainability*, MDPI, v. 10, n. 12, p. 4535, 2018.
- SHRESTHA, A. et al. Automatic object detection and separation for industrial process automation. In: IEEE. *2020 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)*. [S.l.], 2020. p. 1–5.
- SHVAIKA, D. I.; SHVAIKA, A. I.; ARTEMCHUK, V. O. Advancing iot interoperability: dynamic data serialization using thingsboard. *Journal of Edge Computing*, v. 3, n. 2, p. 126–135, 2024.
- SIEMENS. *SCE-012-110 Hardware Configuration S7-1500 CPU 1512SP-F-1 PN*. [S.l.], 2018. Acesso em: 16 mar. 2026. Disponível em: <<https://www.automation.siemens.com/sce-static/learning-training-documents/tia-portal/hw-config-s7-1500/sce-012-110-hardware-configuration-s7-1500-cpu-1512sp-f-1-pn-r1803-pt.pdf>>.
- SILVA, C. A. Desenvolvimento e validação de módulo de comunicação mqtt para a plataforma bipes para aplicações de internet das coisas. Universidade Federal de São Carlos, 2020.
- SISINNI, E. et al. Industrial internet of things: Challenges, opportunities, and directions. *IEEE transactions on industrial informatics*, IEEE, v. 14, n. 11, p. 4724–4734, 2018.
- SOLDATOS, J. et al. The internet-of-things open source ecosystem in 2021. *European Commission: Brussels, Belgium*, 2020.
- SPURGEON, C. E. *Ethernet: the definitive guide*. [S.l.]: "O'Reilly Media, Inc.", 2000.
- STOCK, T.; SELIGER, G. Opportunities of sustainable manufacturing in industry 4.0. *procedia CIRP*, Elsevier, v. 40, p. 536–541, 2016.
- SUNEHRA, D.; SRINIDHI, M. Implementation of smart urban farming using raspberry pi, arduino and node-red platform. In: *2020 IEEE International Conference for Innovation in Technology (INOCON)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–6.
- TAHVANAINEN, H. *Opc ua performance evaluation*. 2016.
- TAMBAKE, N.; DESHMUKH, B.; PATANGE, A. Development of a low cost data acquisition system and training of j48 algorithm for classifying faults in cutting tool. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier, v. 72, p. 1061–1067, 2023.
- TAN, S. et al. Rethinking our education to face the new industry era. In: IATED. *EDULEARN18 Proceedings*. [S.l.], 2018. p. 6562–6571.
- TANTSCHER, D.; MAYER, B. Digital retrofitting of legacy machines: A holistic procedure model for industrial companies. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Elsevier, v. 36, p. 35–44, 2022.

- TARNAWSKI, J.; KUDEŁKA, P.; KORZENIOWSKI, M. Advanced control with plc—code generator for ampc controller implementation and cooperation with external computational server for dealing with multidimensionality, constraints and lmi based robustness. *IEEE Access*, IEEE, v. 10, p. 10597–10617, 2022.
- TEIXEIRA, E. L. S. et al. Demystifying the digital transition of remanufacturing: A systematic review of literature. *Computers in Industry*, Elsevier, v. 134, p. 103567, 2022.
- THAROT, K. et al. A low-cost environment for teaching fundamental cybersecurity concepts in cps. In: SPRINGER. *European Conference on Software Process Improvement*. [S.l.], 2023. p. 356–365.
- TORRES, D. et al. Real-time feedback in node-red for iot development: An empirical study. In: IEEE. *2020 IEEE/ACM 24th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT)*. [S.l.], 2020. p. 1–8.
- TRAN, T.-A. et al. Retrofitting-based development of brownfield industry 4.0 and industry 5.0 solutions. *IEEE Access*, IEEE, v. 10, p. 64348–64374, 2022.
- TRIAMAJA, A. K.; BUDIASTUTI, P.; RISMARINANDYO, M. Y. Development of an iot-based plc trainer: Bridging the practical divide in industrial automation education. *International Journal of Educational Management and Innovation*, v. 5, n. 1, p. 39–52, 2024.
- VASILE, M.-E.; AVOLIO, G.; SOLOVIEV, I. Performance evaluation of modern time-series database technologies for the atlas operational monitoring data archiving service. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, IEEE, v. 70, n. 6, p. 1131–1135, 2023.
- VITTURI, S.; ZUNINO, C.; MARCHEAN, F. Industrial communication systems: Adopting ethernet, ip, and it technologies in the shop floor. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 107, n. 6, p. 1084–1105, 2019.
- VOGEL-HEUSER, B. et al. Modularity and architecture of plc-based software for automated production systems: An analysis in industrial companies. *Journal of Systems and Software*, Elsevier, v. 131, p. 35–62, 2017.
- WANG, Y. et al. Industry 4.0: a way from mass customization to mass personalization production. *Advances in manufacturing*, Springer, v. 5, p. 311–320, 2017.
- WARREN, C. B.; ADAM, S. Pipeline system automation and control. In: ASME. [S.l.], 2007.
- WEG. *CLP TPW03: Manual de Programação*. [S.l.], 2023. Acesso em: 16 mar. 2026. Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-Industrial/Controles-Industriais/Controladores-L%C3%B3gicos-Program%C3%A1veis---CLP/TPW03/p/MKT_WMO_751_MANUAL_TECNICO_CLP_TPW03_PORTUGUES_BR_RESUMIDO.pdf>.
- WEG. *Controlador Programável TPW-03: Manual de Programação*. [S.l.], 2023. Acesso em: 16 mar. 2026. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/ha2/h30/WEG-tpw-03-controlador-programavel-programacao-manual-portugues-br.pdf>>.
- WEG. *Catálogo de Produtos: Automação*. [S.l.], 2024. Acesso em: 16 mar. 2026. Disponível em: <<https://www.weg.net/catalog/weg>>.

- WEISS, M. et al. Towards establishing formal verification and inductive code synthesis in the plc domain. In: IEEE. *2021 IEEE 19th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. [S.l.], 2021. p. 1–8.
- WHITE, M. *Mastering PLC Programming: The software engineering survival guide to automation programming*. [S.l.]: Packt Publishing Ltd, 2023.
- WOLLSCHLAEGER, M.; SAUTER, T.; JASPERNEITE, J. The future of industrial communication: Automation networks in the era of the internet of things and industry 4.0. *IEEE industrial electronics magazine*, IEEE, v. 11, n. 1, p. 17–27, 2017.
- WU, C.; LIU, Y. Development and evaluation of an ergonomic software package for predicting multiple-task human performance and mental workload in human–machine interface design and evaluation. *Computers & Industrial Engineering*, Elsevier, v. 56, n. 1, p. 323–333, 2009.
- XIA, D. et al. Heterogeneous network access and fusion in smart factory: A survey. *ACM Computing Surveys*, ACM New York, NY, v. 55, n. 6, p. 1–31, 2022.
- XU, X. From cloud computing to cloud manufacturing. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, Elsevier, v. 28, n. 1, p. 75–86, 2012.
- YIGIT, M. et al. Power line communication technologies for smart grid applications: A review of advances and challenges. *Computer Networks*, Elsevier, v. 70, p. 366–383, 2014.
- YIN, Y.; STECKE, K. E.; LI, D. The evolution of production systems from industry 2.0 through industry 4.0. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 56, n. 1-2, p. 848–861, 2018.
- ZHANG, H. et al. Dual mode data acquisition and analysis based on deep learning for smart home networks. *IEEE Internet of Things Journal*, IEEE, 2023.
- ZHANG, J. et al. Retrofit: Fault-aware wear leveling. *IEEE Computer Architecture Letters*, IEEE, v. 17, n. 2, p. 167–170, 2018.
- ZHAO, K.; ZHANG, Y. Research on soft plc programming system based on iec61131-3 standard. In: SPRINGER. *Proceedings of 2019 Chinese Intelligent Systems Conference: Volume I 15th*. [S.l.], 2020. p. 301–309.
- ZHI, D. et al. Cigarette production line flow automatic control system based on plc technology and embedded software. *Scalable Computing: Practice and Experience*, v. 24, n. 4, p. 1185–1190, 2023.
- ZHONG, R. Y. et al. Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: a review. *Engineering*, Elsevier, v. 3, n. 5, p. 616–630, 2017.
- ZIATDINOV, R.; ATTERAYA, M. S.; NABIYEV, R. The fifth industrial revolution as a transformative step towards society 5.0. *Societies*, MDPI, v. 14, n. 2, p. 19, 2024.
- ZIMMERMANN, H. Osi reference model - the iso model of architecture for open systems interconnection. *IEEE Transactions on communications*, IEEE, v. 28, n. 4, p. 425–432, 1980.

ZUBAIR, N. et al. Pem: Remote forensic acquisition of plc memory in industrial control systems. *Forensic Science International: Digital Investigation*, Elsevier, v. 40, p. 301336, 2022.

ZYUBIN, V. E. et al. post: A process-oriented extension of the iec 61131-3 structured text language. *IEEE Access*, IEEE, v. 10, p. 35238–35250, 2022.

7 . APÊNDICE

.1 Estudos Analisados para Revisão Bibliográfica

Estudo	Título	Publicação	Ano
e-1	IoT-Cloud based Control of a Flexible Assembly Disassembly Mechatronic System in the Framework of Industries 4.0 and 5.0	Conferência	2024
e-2	Implementing a Flexible IIoT Service Framework with Microservices: A Case Study of Machine Tools	Conferência	2024
e-3	Web-based Internet of Things on environmental and lighting control and monitoring system using Node-RED, MQTT and Modbus communications within embedded Linux platform	Revista	2024
e-4	Wastewater Pumping Stations Retrofitting. Development of a Brownfield Industry 4.0 Solution	Conferência	2024
e-5	Retrofitting enables sustainability, Industry 4.0 connectivity, and improved usability	Revista	2024
e-6	Integrating and interconnecting of older SINUMERIK CNC machines with industry 4.0 using a plug-and-play system	Revista	2024
e-7	Adaptive retrofitting for industrial machines: utilizing webassembly and peer-to-peer connectivity on the edge	Conferência	2024
e-8	CNC Machines Integration in Smart Factories using OPC UA	Revista	2023
e-9	Integrating Constrained MQTT Devices into IoT Platforms for Smart Local Energy Communities	Conferência	2023
e-10	IIoT based framework for data communication and prediction using augmented reality for legacy machine artifacts	Conferência	2023
e-11	Industry 4.0-compliant Digitalization of a Re-configurable and Flexible Laser Cutter Module within a Digital Factory	Conferência	2023
e-12	Intelligent Retrofitting Paradigm for Conventional Machines towards the Digital Triplet Hierarchy	Revista	2023
e-13	IIOT based Remote Monitoring and Control of Bottle Filling Process Using PLC and Node-RED details	Conferência	2023
e-14	Development of a Novel Methodology to Retrofit Legacy Systems in the Context of Industry 4.0	Revista	2023

e-15	Interoperable system for automated extraction and identification of machine control data in brownfield production	Conferência	2023
e-16	Efficient Method to Monitor Power Consumption in Industry Using Lorawan and Rs485 Retrofit	Conferência	2023
e-17	Retrofitting of legacy machines in the context of Industrial Internet of Things (IIoT)	Conferência	2022
e-18	Digital Triplet Paradigm for Brownfield Development towards Industry 5.0: A Case Study of Intelligent Retrofitting for Oil and Gas Boosting Plant in the IIoT Context	Conferência	2022
e-19	Implementation Model for Digital Retrofit for Sustainable Production	Conferência	2022
e-20	Retrofitting Industrial Machines with WebAssembly on the Edge	Conferência	2022
e-21	Value Proposition for Smart Retrofit Solutions	Conferência	2022
e-22	Digitising a Machine Tool for Smart Factories	Revista	2022
e-23	XWare: a Middleware for Smart Retrofitting in Maintenance	Conferência	2022
e-24	Digital Retrofitting of legacy machines: A holistic procedure model for industrial companies	Revista	2022
e-25	Migrating legacy production lines into an Industry 4.0 ecosystem	Conferência	2022
e-26	Evaluation of different additive manufacturing technologies for MIDs in the context of smart sensor systems for retrofit applications	Conferência	2021
e-27	Concepts for Retrofitting Industrial Programmable Logic Controllers for Industrie 4.0 Scenarios	Conferência	2021
e-28	Augmented Reality Based Machine Monitoring for Legacy Machines: a retrofitting use case	Conferência	2021
e-29	Changing a running system: A guideline for retrofitting brownfield manufacturing systems	Conferência	2021
e-30	Machine Tool Transition from Industry 3.0 to 4.0: A Comparison between Old Machine Retrofitting and the Purchase of New Machines from a Triple Bottom Line Perspective	Revista	2021
e-31	Enabling Industry 4.0 Communication Protocol Interoperability: An OPC UA Case Study	Conferência	2021

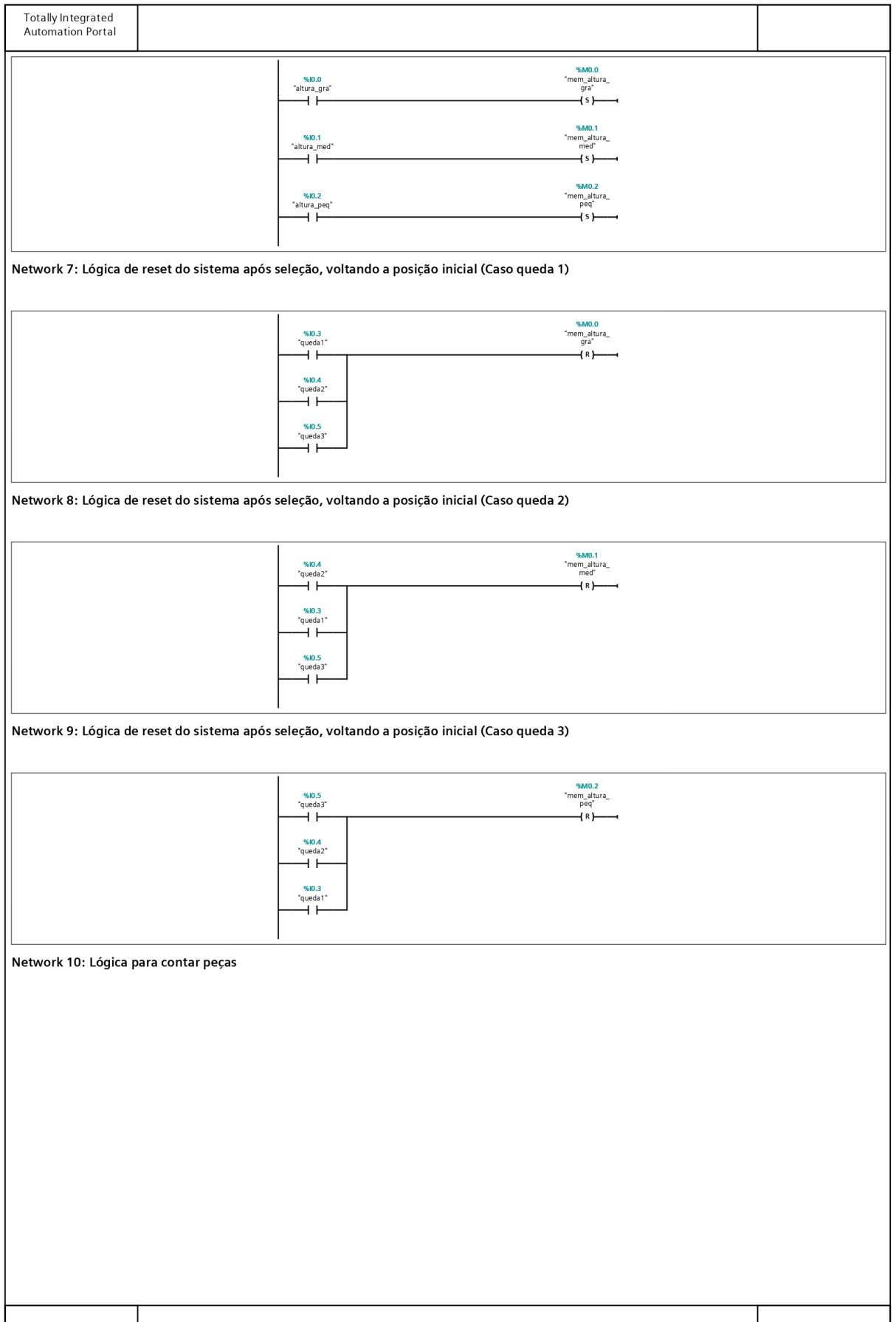
e-32	Enabling IoT connectivity for Modbus TCP sensors	Conferência	2020
e-33	From Digital Shop floor to Real-Time Reporting: an IIoT Based Educational Use Case	Conferência	2020
e-34	Digital retrofit: A first step toward the adoption of Industry 4.0 to the manufacturing systems of small and medium-sized enterprises	Revista	2020
e-35	Plug & Play Retrofitting Approach for Data Integration to the Cloud	Conferência	2020
e-36	Smart manufacturing retrofit for brownfield systems	Conferência	2020
e-37	Cyber-physical production systems retrofitting in context of Industry 4.0	Revista	2020
e-38	Getting Small Medium Enterprises started on Industry 4.0 using retrofitting solutions	Conferência	2020
e-39	Semantic Node-RED for rapid development of interoperable industrial IoT applications	Conferência	2020
e-40	IoT Energy Retrofit and the Connection of Legacy Machines Inside the Industry 4.0 Concept	Conferência	2019
e-41	IoT Retrofitting Approach for the Food Industry	Conferência	2019
e-42	Retrofit: Creating Awareness in Embedded Systems - A Usecase for PLCs	Conferência	2019
e-43	An effective industrial control approach	Conferência	2019
e-44	Integrated Approach for Smart Brownfield Concept - Application Model for Production Optimization Technologies	Conferência	2019
e-45	An open-source toolkit for retrofit Industry 4.0 sensing and monitoring applications	Conferência	2018
e-46	Methodology for the Retrofitting of Manufacturing Resources for Migration of SME Towards Industry 4.0	Conferência	2018
e-47	Node-Red and OPC UA Based Lightweight and Low-Cost Historian with Application in the Water Industry	Conferência	2018
e-48	Implementing an OPC UA interface for legacy PLC-based automation systems using the Azure cloud: An ICPS-architecture with a retrofitted RFID system	Conferência	2018
e-49	Non-invasive control solution inside higher-level OPC UA based wrapper for optimizing groups of wastewater systems	Conferência	2018
e-50	Interoperability for industrial cyber-physical systems: an approach for legacy systems	Revista	2017

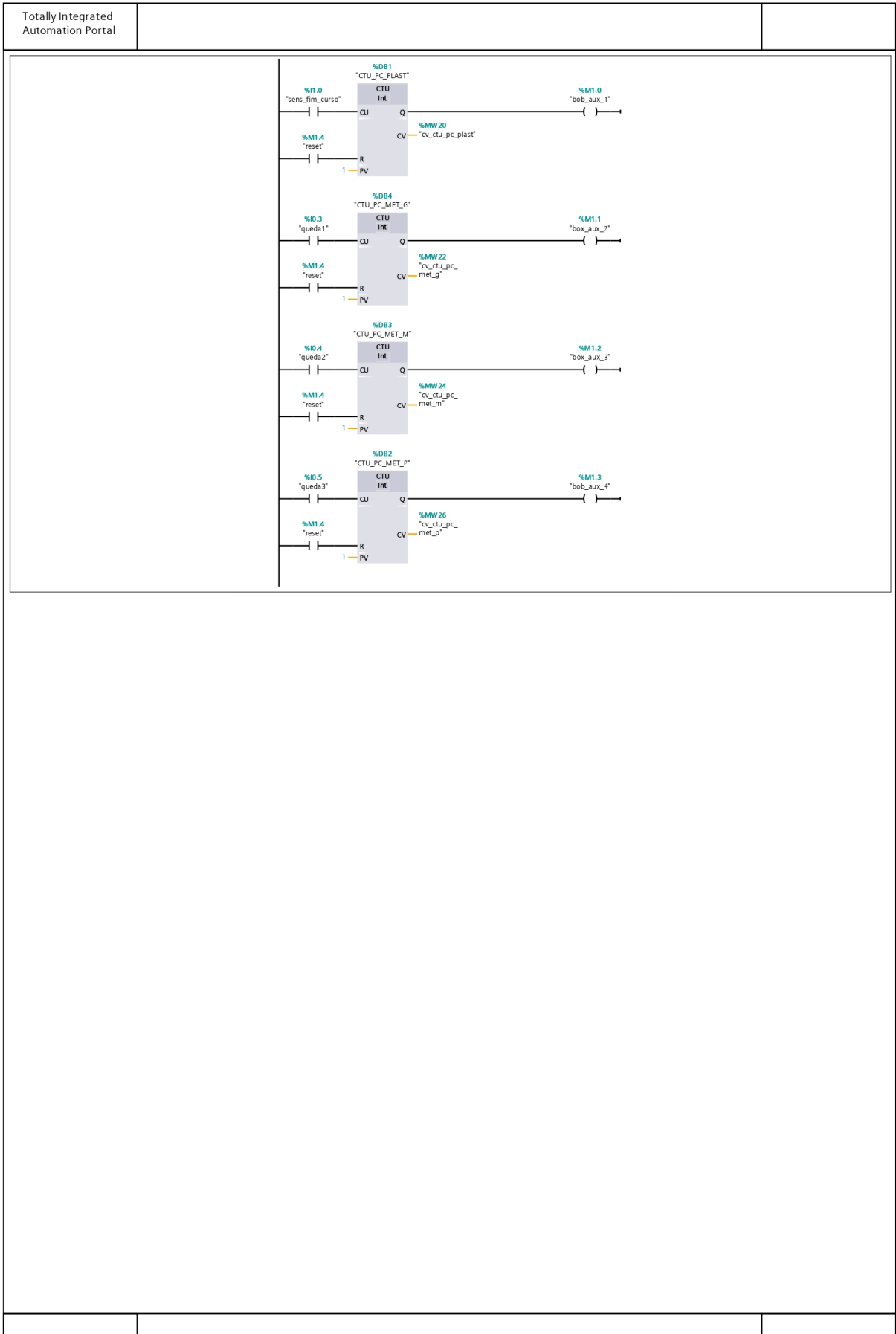
e-51	An open-source PLC stack for simplified and cost-effective deployment of smart systems	Conferência	2017
e-52	A novel methodology for retrofitting CNC machines based on the context of Industry 4.0	Conferência	2017
e-53	A retrofitting concept for integration of machinery with legacy interfaces into cloud manufacturing architectures	Conferência	2016
e-54	Integration of Classical Components Into Industrial Cyber-Physical Systems	Revista	2016
e-55	Using a Learning Factory Approach to Transfer Industrie 4.0 Approaches to Small and Medium-sized Enterprises	Conferência	2016
e-56	Assessment of industrial middleware technologies for the PERFoRM project	Conferência	2016
e-57	Internet of Things for Industrial Automation – Challenges and Technical Solutions	Conferência	2015
e-58	Unified Plug & Produce architecture for automatic integration of field devices in industrial environments	Conferência	2015
e-59	Towards a process for integrated IEC 61850 and OPC UA communication: Using the example of smart grid protection equipment	Conferência	2014
e-60	An Internet of Things-Based Model for Smart Water Management	Conferência	2014

Tabela 6 – Informações - Estudos Analisados

.2 Diagrama Ladder para Mesa Seletora - CLP Siemens S7-1500

Totally Integrated Automation Portal				
MesaSeparadora / PLC_1 [CPU 1516-3 PN/DP] / Program blocks				
Main [OB1]				
Main Properties				
General				
Name	Main			
Number	1			
Type	OB			
Language	LAD			
Information				
Title	"Programa Principal"			
Author				
Comment				
Version	0.1			
User-defined ID				
Main				
Name	Data type	Default value	Supervision	Comment
▼ Input				
Initial_Call	Bool			Initial call of this OB
Remanence	Bool			=True, if remanent data are available
Temp				
Constant				
Network 1: Lógica para ligar/desligar o motor manualmente				
Network 2: Lógica para selecionar peça grande				
Network 3: Lógica para selecionar peça média				
Network 4: Lógica para selecionar peça pequena				
Network 5: Auxliar indutivo				
Network 6: Lógica para escolher rampa para peça metálica				





.3 Diagrama Ladder para Mesa Seletora - CLP WEG TPW03 30 HR-A

