

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o texto completo deste documento será disponibilizado somente a partir de **27/11/2025.**

João Vitor Rocha Santana

**Plataforma de Automação e Controle Open Source para Internet
das Coisas Industrial**

Sorocaba
2025

João Vitor Rocha Santana

**Plataforma de Automação e Controle Open Source para Internet
das Coisas Industrial**

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

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Paciência Godoy

Sorocaba

2025

S232p

Santana, João Vitor Rocha

Plataforma de automação e controle open source para Internet das Coisas Industrial / João Vitor Rocha Santana. -- Sorocaba, 2025
91 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba

Orientador: Eduardo Paciência Godoy

1. Automação industrial. 2. Internet das coisas. 3. Hardware. 4. Open source software. 5. Sistemas de controle inteligente. I. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Plataforma de Automação e Controle Open Source para Internet das Coisas Industrial

AUTOR: JOÃO VITOR ROCHA SANTANA

ORIENTADOR: EDUARDO PACIÊNCIA GODOY

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



Assinado de forma digital
por Eduardo Paciencia
Godoy:29137583808
Dados: 2025.05.27
15:40:39 -03'00'

Prof. Dr. EDUARDO PACIÊNCIA GODOY (Participação Presencial)

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

Documento assinado digitalmente



GALDENORO BOTURA JUNIOR
Data: 27/05/2025 15:24:50 -0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Professor Titular GALDENORO BOTURA JUNIOR (Participação Presencial)

Programa de Pós-graduação em Design / Faculdade de Arquitetura Artes Comunicação e Design - Campus de Bauru

Firmado digitalmente da Dennis Brandão

Data: 27.05.2025 17:42:40 CEST

Organizzazione: UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA/01773710171

Prof. Dr. DENNIS BRANDÃO (Participação Virtual)

Departamento de Engenharia Elétrica e da Computação / Universidade de Bréscia - Itália

Sorocaba, 27 de maio de 2025

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por me guiar e me fortalecer ao longo de todo o processo

Aos meus pais, Maria e José por terem me ensinando a ser uma pessoa honesta e dedicada.

Ao Professor Eduardo Paciência Godoy pela confiança, amizade, dedicação e orientação durante todas as etapas do desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas que estiveram presente ao longo do desenvolvimento pelas trocas de experiências e suporte prestado.

“Sei que podes fazer todas as coisas; nenhum dos teus planos pode ser frustrado.”

Jó 42:2

RESUMO

Com o avanço da Indústria 4.0 e a crescente demanda por soluções flexíveis, conectadas e de baixo custo, este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma plataforma de código aberto (open source) de automação e controle voltada para aplicações de Internet das Coisas Industrial (IIoT). A proposta integra hardware e software desenvolvidos para atender aos requisitos industriais de robustez, escalabilidade e interoperabilidade. O hardware, baseado no microcontrolador RP2040, oferece entradas e saídas digitais, analógicas, PWM, suporte a encoders, e interfaces de comunicação Ethernet, RS-232 e RS-485. Seu projeto priorizou modularidade, uso de componentes validados industrialmente e serialização de I/Os via protocolo SPI, possibilitando maior flexibilidade e expansão. No software, a plataforma adota duas abordagens complementares: OpenPLC, compatível com a norma IEC 61131-3, e MicroPython, utilizado por sua simplicidade, agilidade na prototipagem e facilidade de integração com sistemas IIoT. Foram realizadas adaptações no OpenPLC para suportar a serialização dos sinais, além do desenvolvimento de blocos específicos para leitura analógica e comunicação MQTT. A validação experimental foi realizada com dois estudos de caso: uma estação de separação de peças e um controle de velocidade de motor com PID em tempo real, ambos com visualização dos dados via Node-RED. Nos dois cenários a plataforma apresentou um resultado satisfatório e atingiu as expectativas e exigências propostas, além de demonstrar sua alta adaptabilidade a diferentes cenários. Com documentação aberta e disponibilizada publicamente, a plataforma desenvolvida promove o acesso democrático à automação industrial, oferecendo um recurso de alta aplicabilidade tanto para o meio acadêmico quanto para o setor produtivo, fortalecendo a inovação aberta e a customização de soluções industriais.

Palavras-chave: *Indústria 4.0, IIoT, Automação Industrial, Plataforma Open Source, OpenPLC, MicroPython.*

ABSTRACT

With the advancement of Industry 4.0 and the growing demand for flexible, connected, and low-cost solutions, this paper presents the development of an open source automation and control platform aimed at Industrial Internet of Things (IIoT) applications. The proposal integrates hardware and software developed to meet industrial requirements for robustness, scalability, and interoperability. The hardware, based on the RP2040 microcontroller, offers digital, analog, and PWM inputs and outputs, encoder support, and Ethernet, RS-232, and RS-485 communication interfaces. Its design prioritized modularity, the use of industrially validated components, and I/O serialization via SPI protocol, enabling greater flexibility and expansion. In software, the platform adopts two complementary approaches: OpenPLC, compatible with the IEC 61131-3 standard, and MicroPython, used for its simplicity, agility in prototyping, and ease of integration with IIoT systems. Adaptations were made to OpenPLC to support signal serialization, in addition to the development of specific blocks for analog reading and MQTT communication. Experimental validation was performed with two case studies: a parts separation station and a real-time PID motor speed control, both with data visualization via Node-RED. In both scenarios, the platform presented satisfactory results and met the proposed expectations and requirements, in addition to demonstrating its high adaptability to different scenarios. With open and publicly available documentation, the developed platform promotes democratic access to industrial automation, offering a highly applicable resource for both academia and the production sector, strengthening open innovation and the customization of industrial solutions.

Keywords: *Industry 4.0, IIoT, Industrial Automation, Open Source Platform, OpenPLC, MicroPython*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Circuitos de Alimentação	33
Figura 2 - Circuito Entradas Digitais.....	35
Figura 3 - Circuito Saídas a Relé	36
Figura 4 - Circuito PWM	37
Figura 5 - Circuito Entrada Encoder	39
Figura 6 - Circuito Entradas Analógicas	40
Figura 7 - Circuitos de Comunicação	42
Figura 8 - Esquemático do controle.....	43
Figura 9 - Layout PCB.....	44
Figura 10 - Trilhas de cobre PCB	45
Figura 11 – Layouts PCB	46
Figura 12 - Placa Fabricada	47
Figura 13 - Arquitetura do OpenPLC.....	49
Figura 14 - Interface OpenPLC Editor	50
Figura 15 - Blocos desenvolvidos.....	53
Figura 16 - Classe entradas e saídas digitais.....	60
Figura 17 – Classe entradas analógicas	61
Figura 18 – Classe PWM	62
Figura 19 – Classe Encoder.....	63
Figura 20 – Comunicação Ethernet.....	64
Figura 21 – Comunicação Serial	65
Figura 22 - Esquemático da Aplicação.....	67
Figura 23 - Programa de Automação Discreta	68
Figura 24 - Endereçamento das Entradas e Saídas no OpenPLC Editor.....	69
Figura 25 - Programa da Comunicação	70
Figura 26 - Desenvolvimento Node-RED	70
Figura 27 - Dashboard de dados.....	71
Figura 28 – Bancada de testes de controle de motor cc	73
Figura 29 – Esquemático da Aplicação	74
Figura 30 – Início do código	76
Figura 31 – Funções desenvolvidas.....	77
Figura 32 - Código do MQTT.....	78
Figura 33 - Código do controlador.....	79

Figura 34 - Desenvolvimento Node-RED	80
Figura 35 – Gráfico do experimento	82
Figura 36 - Dashboard de dados.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Revisão Bibliográfica	26
Tabela 2 - Identificação da cor da peça	66

LISTA DE SIGLAS

ADC	Conversor Analógico-Digital
CLP	Controlador Lógico Programável
CPS	Sistemas Ciberfísicos
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
CI	Circuito Integrado
GASI	Grupo de Automação e Sistemas Integráveis
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i>
I4.0	<i>Industry 4.0</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i>
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
OPC UA	<i>Open Platform Communication Unified Architecture</i>
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
SPI	Serial Peripheral Interface
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>

SUMÁRIO

1. PREFÁCIO.....	16
2. INTRODUÇÃO	17
2.1. JUSTIFICATIVA.....	17
2.2. OBJETIVOS	21
2.3. ESTRUTURA E CONTEÚDO.....	21
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
3.1. CENÁRIO ATUAL DA INDÚSTRIA, IIOT E CONTROLADORES	23
3.2. PLATAFORMAS DE AUTOMAÇÃO	25
4. DESENVOLVIMENTO	28
4.1. PROPOSTA DO TRABALHO	28
4.1.1. REQUISITOS FUNCIONAIS	29
4.1.2. REQUISITOS TÉCNICOS.....	30
4.2. PROJETO DE HARDWARE	31
4.2.1 Projeto Eletroeletrônico	31
4.2.1.1 Alimentação Elétrica	32
4.2.1.2 Entradas Digitais.....	33
4.2.1.3 Saídas Digitais.....	35
4.2.1.4 PWM.....	36
4.2.1.5 Encoder	38
4.2.1.6 Entradas Analógicas.....	39
4.2.1.7 Comunicação.....	41
4.2.1.8 Unidade de processamento	42
4.2.2. Projeto da Placa	43
4.2.3. Prototipagem da Placa	46
4.3. PROJETO DE SOFTWARE: OPENPLC	47
4.3.1. Arquitetura e Componentes.....	48
4.3.1.1 OpenPLC Editor.....	49
4.3.1.2 OpenPLC Runtime.....	50
4.3.2. Desenvolvimento de software	51
4.3.2.1. Adaptações Necessárias.....	51
4.3.2.2 Desenvolvimento de Novos Blocos	52

4.4. PROJETO DE SOFTWARE: MICROPYTHON.....	54
4.4.1. Bibliotecas Padrão.....	55
4.4.2. IDE	56
4.4.3 Desenvolvimento	57
4.4.3.1 Definição da Biblioteca	58
4.4.3.2 Estrutura da Biblioteca.....	59
4.4.3.2.1 Manipulação de Entradas e Saídas Digitais	59
4.4.3.2.2 Leitura de Entradas Analógicas	60
4.4.3.2.3 Geração de Sinais PWM.....	61
4.4.3.2.4 Leitura de Encoder	62
4.4.3.2.5 Comunicação via Ethernet.....	63
4.4.3.2.6 Comunicação Serial.....	64
5. RESULTADOS.....	66
5.1. TESTE OPERACIONAL E VALIDAÇÃO: OPENPLC	66
5.2. TESTE OPERACIONAL E VALIDAÇÃO: MICROPYTHON	72
5.3. DISCUSSÕES.....	84
6. CONCLUSÕES.....	86
REFERÊNCIAS.....	88

2. INTRODUÇÃO

2.1. Justificativa

A Quarta Revolução Industrial, popularmente conhecida como Indústria 4.0 (I4.0), está provocando mudanças profundas nas práticas industriais e na forma como as operações são concebidas e executadas. Este movimento representa um avanço em relação às revoluções industriais anteriores, ao integrar tecnologias digitais em todos os aspectos da produção industrial. Entre as principais inovações dessa nova era, a Internet das Coisas Industrial (IIoT) destaca-se como uma das tecnologias habilitadoras mais transformadoras.

Ao conectar máquinas, dispositivos e sistemas em uma rede interconectada, a IIoT cria uma inteligência distribuída que transforma dados em tempo real em informações valiosas, permitindo uma tomada de decisão mais informada e uma eficiência operacional significativamente maior. Nesse sentido, a IIoT não apenas redefine a automação industrial, mas também impõe novos desafios e oportunidades para o setor.

A IIoT tem suas raízes na automação industrial tradicional, mas se diferencia pela capacidade de integrar tecnologia da informação (TI) e tecnologia operacional (TO) de forma abrangente. Seu desenvolvimento foi possibilitado pelo avanço nas tecnologias de sensores, comunicação sem fio, e computação em nuvem, que permitem a coleta massiva de dados e sua análise em tempo real. Esse nível de conectividade e inteligência operacional marca uma nova fase no ciclo de digitalização da indústria, trazendo benefícios como otimização de processos, maior eficiência energética, e uma gestão de recursos mais ágil e flexível.

Além disso, a IIoT permite uma abordagem preditiva e preventiva, reduzindo o tempo de inatividade de máquinas e aumentando a confiabilidade dos processos produtivos (SEHR et al., 2021). Assim, a automação industrial não apenas se torna mais inteligente, mas também mais responsiva às mudanças nas demandas do mercado.

Setores como manufatura, energia, saúde e logística já estão incorporando a IIoT em suas operações para aproveitar as vantagens da conectividade em tempo real e da análise avançada de dados. A capacidade de monitorar e ajustar processos em

tempo real tem se mostrado essencial para aumentar a eficiência, reduzir custos operacionais e otimizar o uso de recursos.

A crescente adoção de soluções baseadas em IIoT reflete a necessidade das indústrias de se adaptar a um ambiente operacional mais dinâmico e interconectado, no qual a automação desempenha um papel central. Em um cenário competitivo e em constante evolução, a busca por soluções de automação e controle flexíveis e integradas torna-se uma prioridade estratégica para empresas que desejam maximizar sua eficiência e competitividade global.

Nesse contexto, a interdependência entre a IIoT e os controladores industriais se torna evidente. A IIoT se apoia na conectividade de uma vasta gama de sensores e dispositivos para a coleta de dados operacionais em tempo real. Os controladores industriais, por sua vez, desempenham o papel fundamental de monitorar e controlar esses dispositivos, processando os dados coletados e atuando de forma a garantir a eficiência e a segurança dos processos produtivos.

Entre os controladores industriais, os Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) destacam-se como uma tecnologia estabelecida e amplamente adotada na automação industrial. Os CLPs oferecem uma arquitetura de hardware modular, que facilita a instalação em diferentes ambientes e permite uma expansão simples através de módulos adicionais. Além disso, as normas de programação da IEC 61131-3 garantem a padronização e previsibilidade nos sistemas de automação, permitindo que os CLPs sejam utilizados em uma ampla variedade de aplicações industriais (SEHR et al., 2021).

No entanto, apesar de suas vantagens, os CLPs tradicionais enfrentam dificuldades para se adaptar às novas exigências da IIoT, especialmente em relação à conectividade, escalabilidade e segurança. Como observa Azarmipour et al. (2019), o ambiente de IIoT requer soluções de controle que sejam altamente adaptáveis e capazes de lidar com a complexidade crescente dos sistemas de automação. Os CLPs, projetados para operar em ambientes fechados e com um conjunto restrito de funções, muitas vezes não conseguem acompanhar a velocidade com que as tecnologias da IIoT estão evoluindo.

Além disso, a necessidade de integrar esses controladores com redes industriais modernas geralmente exige o uso de dispositivos externos e softwares proprietários, o que pode aumentar a complexidade e o custo de implementação (CONTIERI et al., 2023). Esses desafios sugerem que os CLPs, embora ainda sejam uma parte vital da

automação industrial, precisam evoluir para atender às demandas de conectividade e flexibilidade impostas pela IIoT.

Essa dificuldade de adaptação dos CLPs tradicionais também é destacada por Lundh et al. (2019), que observam que os CLPs são projetados para serem altamente especializados, o que limita sua capacidade de se integrar rapidamente a sistemas de automação mais amplos e dinâmicos. Wang et al. (2021) reforçam essa crítica, ao apontar que a integração de dados e a conectividade em tempo real são essenciais para a automação moderna, mas os CLPs tradicionais não foram desenvolvidos com essas capacidades em mente. O uso de sistemas fechados e proprietários também impede a flexibilidade e a customização necessárias para acompanhar o ritmo das inovações tecnológicas.

Diante dessas limitações, a indústria tem buscado alternativas aos CLPs tradicionais. De acordo com Jones e Smith (2020), há uma crescente demanda por soluções de automação mais flexíveis, escaláveis e econômicas, que possam integrar-se facilmente às novas tecnologias de IIoT. O desenvolvimento de controladores baseados em hardware aberto e software livre oferece uma alternativa promissora, permitindo que as indústrias implementem soluções de automação mais acessíveis e adaptáveis.

Lemos et al. (2021) argumentam que as indústrias que buscam maior flexibilidade e capacidade de integração rápida com novas tecnologias estão cada vez mais optando por soluções open source, que oferecem maior liberdade para customização tanto no hardware quanto no software. Esse tipo de solução permite que engenheiros ajustem os sistemas de controle de maneira ágil, integrando-os de forma eficiente aos sistemas de dados empresariais e aumentando a eficiência operacional.

A flexibilidade e a customização, dois dos principais benefícios das soluções open source, também são fundamentais para melhorar a experiência do cliente (Customer Experience - CX) em ambientes industriais. A transição para a Indústria 4.0 está promovendo uma valorização crescente da experiência do cliente, onde a customização de produtos e serviços se tornou um fator decisivo para o sucesso.

Parmentier et al. (2020) destacam que a customização não apenas melhora a eficiência operacional dos clientes, mas também aumenta sua satisfação e lealdade, já que os sistemas ajustados às necessidades específicas de cada cliente tendem a

oferecer resultados mais eficazes e alinhados com suas expectativas. Nesse contexto, as soluções open source se destacam por permitir um nível de personalização que os sistemas proprietários muitas vezes não conseguem atingir, devido à sua natureza fechada.

Além disso, a flexibilidade das plataformas open source permite que as indústrias se adaptem rapidamente a mudanças nas condições operacionais ou às novas demandas do mercado, sem a necessidade de substituir completamente os sistemas existentes (WANG et al., 2021). A capacidade de expandir e modificar os sistemas de automação de forma incremental é crucial em ambientes industriais dinâmicos, onde a inovação contínua é necessária para manter a competitividade.

Pereira e Lima (2022) observam que, em soluções proprietárias, a necessidade de customizações específicas é frequentemente limitada pelas funcionalidades predefinidas pelos fabricantes, o que pode ser um obstáculo significativo para empresas que buscam maior flexibilidade. Essa rigidez pode resultar em custos adicionais e no aumento do tempo de implementação, já que as modificações exigem adaptações complexas ou até a substituição de componentes. Em contraste, soluções open source ou sistemas baseados em plataformas modulares oferecem uma flexibilidade consideravelmente maior, permitindo que as empresas ajustem seus sistemas conforme as demandas específicas de seus processos. Além disso, esses sistemas podem ser facilmente atualizados ou expandidos à medida que novas tecnologias ou requisitos surgem, sem depender de um fornecedor exclusivo.

Diante desse cenário, o desenvolvimento de uma plataforma de automação e controle open source para aplicações de IIoT se justifica como uma solução eficiente e adaptável às necessidades industriais modernas. Ao oferecer flexibilidade, escalabilidade e custo-benefício, essa plataforma pode atender a um amplo espectro de aplicações industriais, ao mesmo tempo em que promove a inovação e a integração de novas tecnologias.

Müller et al. (2020) e Santos et al. (2020) defendem que o uso de hardware open source oferece vantagens significativas para as indústrias, permitindo que implementem soluções de automação customizadas e inovadoras. Essas soluções podem ser moldadas para atender às especificidades de cada operação, sem a necessidade de recorrer a fornecedores terceirizados para ajustes e atualizações constantes. O desenvolvimento de plataformas open source facilita ainda mais a integração de novos recursos e tecnologias, sem as limitações impostas por soluções

proprietárias. Isso significa que as empresas têm maior controle sobre seus sistemas, o que se traduz em maior agilidade e menores custos ao longo do tempo.

Portanto, o desenvolvimento de uma plataforma open source de automação e controle não apenas promove o acesso universal e a transparência, mas também proporciona uma personalização e flexibilidade incomparáveis. Esses aspectos são fundamentais para atender às necessidades e desafios da Indústria 4.0, onde a adaptabilidade e a inovação contínua são essenciais para a competitividade. Em um ambiente industrial cada vez mais dinâmico e interconectado, as empresas necessitam de soluções que possam evoluir rapidamente, sem comprometer a confiabilidade ou a eficiência operacional.

A proposta deste trabalho é exatamente desenvolver uma plataforma open source que atenda aos rigorosos requisitos do setor industrial, incluindo conectividade avançada e suporte a protocolos amplamente utilizados, como MQTT e Modbus. Dessa forma, busca-se fornecer uma solução eficiente, escalável e adaptável para plantas industriais, permitindo que as empresas implementem e mantenham sistemas de automação que atendam às suas necessidades específicas de forma contínua e sem as restrições das soluções fechadas tradicionais.

2.2. Objetivos

Este projeto de pesquisa objetivou o estudo e o desenvolvimento de uma Plataforma de Automação e Controle Open Source para IIoT com hardware e software open source, que possua um hardware flexível e customizável compatível com aplicações em plantas de manufatura, que esteja conforme a norma IEC 61131 e atenda às necessidades de conectividade para aplicações de Internet das Coisas Industrial.

2.3. Estrutura e Conteúdo

O presente trabalho está dividido em uma estrutura contendo cinco seções considerando esta introdução e desconsiderando as referências bibliográficas. O item 2 tratou de uma revisão bibliográfica que relacionava os principais tópicos acerca do tema como a Indústria 4.0, Internet das coisas industrial (IIoT) e Controladores. Além

disso, também foram apresentadas outras pesquisas e desenvolvimento de plataformas que já foram publicadas com base no objeto de estudo proposto.

O item 3 abordou o desenvolvimento da plataforma, fornecendo detalhes sobre a parte de hardware desenvolvida, onde são apresentados circuitos para proporcionar um entendimento completo da plataforma, bem como detalhes sobre o software utilizado. O capítulo 4 analisou os resultados dos testes realizados com a plataforma, incluindo sua submissão a um caso de estudo real de aplicação da IIoT.

Por fim, o item 5 destacou as conclusões derivadas do estudo realizado e aponta direções para trabalhos futuros. Essa estrutura visa oferecer uma visão abrangente do desenvolvimento da plataforma, seus resultados práticos e as perspectivas para o futuro do projeto.

6. CONCLUSÕES

A utilização de controladores industriais como parte de um sistema de Internet das Coisas Industrial (IIoT) se tornou fundamental para qualquer sistema de automação atualmente. Assim, o desenvolvimento de uma alternativa que atenda às necessidades da indústria, especialmente no que diz respeito à conectividade e comunicação, é vital para o avanço da implementação da Indústria 4.0 no Brasil. Neste contexto, este trabalho apresentou o desenvolvimento de uma Plataforma de Automação e Controle Open Source voltada para aplicações de IIoT, abrangendo elementos de hardware, software e comunicação.

A plataforma desenvolvida se destaca como uma alternativa alta flexibilidade para aplicações industriais, garantindo não apenas a confiabilidade e robustez necessárias, mas também a possibilidade de modificação e personalização conforme as demandas específicas de cada cliente. Essa capacidade de adaptação é essencial para a integração com outros serviços, alinhando-se aos requisitos da IIoT. O desenvolvimento do hardware foi realizado de forma a permitir que novos avanços possam emergir a partir da plataforma apresentada, o que foi garantido pela cuidadosa escolha dos componentes e da serialização, promovendo uma maior flexibilidade e facilidade na alteração de parâmetros.

A escolha do OpenPLC como software controlador se revelou adequada, demonstrando-se uma excelente alternativa aos softwares proprietários. Sua capacidade de integração com controladores existentes e a utilização dos padrões da norma IEC 61131-3, que atualmente dominam as linhas de produção industrial, reforçam a relevância da plataforma no contexto atual. Todos os desenvolvimentos foram testados em um cenário real de IIoT, validando a plataforma em operações robustas e assegurando um controle lógico confiável e uma comunicação eficaz.

Em um cenário onde os processos industriais estão cada vez mais interconectados, a capacidade de adaptar o sistema a diferentes aplicações sem incorrer em altos custos de reengenharia se torna uma vantagem estratégica. A flexibilidade proporcionada pelo MicroPython, juntamente com a disponibilidade de bibliotecas reutilizáveis, capacita engenheiros a desenvolver funcionalidades específicas para suas aplicações sem a complexidade associada às linguagens convencionais de controle industrial. Isso possibilita um desenvolvimento ágil, iterativo

e de fácil manutenção, estabelecendo um caminho promissor para futuras inovações no campo da automação industrial.

Em um setor tradicionalmente dominado por soluções proprietárias, este projeto representa uma contribuição significativa ao oferecer uma alternativa de alto desempenho, acessível e customizável. Com um projeto completamente open source, os usuários têm total liberdade para explorar, modificar e adaptar o sistema conforme suas necessidades, sem a dependência de licenças ou restrições impostas por fabricantes. Essa liberdade é crucial no contexto da Indústria 4.0, onde a personalização e conectividade são vitais para garantir a competitividade e eficiência das operações industriais.

Além disso, a plataforma atende à crescente demanda por sistemas de automação mais adaptáveis e integrados à Internet das Coisas Industrial (IIoT), um requisito essencial na Indústria 4.0. A utilização de ferramentas de software livre, aliada à documentação disponível, contribui para uma relação mais estreita entre a academia e a indústria, oferecendo uma base prática para testes, implementações experimentais e aplicações industriais.

Trabalhos futuros buscarão atualizar a plataforma para torná-la mais compatível com painéis industriais e implementar novas formas de conectividade. A disponibilização da documentação completa no GitHub não apenas reforça a colaboração e a continuidade do trabalho, mas também torna a plataforma facilmente replicável e expansível. Esse caráter open source incentiva uma adoção mais ampla e melhorias contínuas por parte da comunidade acadêmica e de novos desenvolvedores, promovendo um ambiente colaborativo e inovador.

REFERÊNCIAS

A. Karmakar, N. Dey, T. Baral, M. Chowdhury and M. Rehan, "Industrial Internet of Things: A Review," 2019 International Conference on Opto-Electronics and Applied Optics (Optronix), Kolkata, India, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/OPTRONIX.2019.8862436.

A. W. Colombo et al., "A 70-Year Industrial Electronics Society Evolution Through Industrial Revolutions: The Rise and Flourishing of Information and Communication Technologies," in IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 15, no. 1, pp. 115-126, March 2021, doi: 10.1109/MIE.2020.3028058.

Automation Direct, "ProductivityOpen: Open-Source Agility Meets Industrial-Grade Toughness", <https://www.automationdirect.com/open-source/home>, (acesso em Set. 5, 2023).

Autonomy. "1.1 OpenPLC Overview" .<https://autonomylogic.com/docs/openplc-overview/> (acesso em Set. 5, 2023).

Autonomy. "3.3 ADDING NEW BLOCKS TO OPENPLC EDITOR'S LIBRARY".<https://autonomylogic.com/docs/3-3-adding-new-blocks-to-openplc-editors-library/> (acesso em Set. 5, 2023).

B. Bajic, A. Rikalovic, N. Suzic and V. Piuri, "Industry 4.0 Implementation Challenges and Opportunities: A Managerial Perspective," in IEEE Systems Journal, vol. 15, no. 1, pp. 546-559, March 2021, doi: 10.1109/JSYST.2020.3023041.

C. Andrei, G. Tudor, M. Arhip-Călin, G. Fierăscu and C. Urcan, "Raspberry Pi, an Alternative Low-Cost PLC," 2020 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE), Bucharest, Romania, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISFEE51261.2020.9756175.

Contieri, P.G.S., Hassui, A., Santa-Eulalia, L.A., Sigahi, T.F.A.C., Rampasso, I.S., Moraes, G.H.S.M.d. and Anholon, R. (2023), "Difficulties and challenges in the modernization of a production cell with the introduction of Industry 4.0 technologies", Benchmarking: An International Journal, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/BIJ-02-2023-0071>

D. G. S. Pivoto, L. F. F. de Almeida, R. da Rosa Righi, J. J. P. C. Rodrigues, A. B. Lugli, and A. M. Alberti, "Cyber-physical systems architectures for industrial internet

of things applications in Industry 4.0: A literature review," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 58, pp. 176-192, 2021. DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.11.017.

FACTS Engineering, "Products", <https://facts-eng.com/products/>, (acesso em Set. 5, 2023).

G. Vieira, J. Barbosa, P. Leitão and L. Sakurada, "Low-Cost Industrial Controller based on the Raspberry Pi Platform," 2020 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Buenos Aires, Argentina, 2020, pp. 292-297, doi: 10.1109/ICIT45562.2020.9067148.

Gómez, R., et al. (2020). "Rapid Prototyping with MicroPython in Industrial IoT Systems." *Automation Science and Engineering Review*, 37(4), 235-249.

Huang, L., & Wang, J. (2022). "Open Hardware Solutions in Industrial Automation: Trends and Perspectives." *Industrial Electronics Journal*, 39(2), 87-98.

Jones, P., & García, L. (2020). "Comparative Study of MicroPython and C in Industrial Automation." *International Journal of Automation and Control*, 29(1), 80-95.

Jones, P., & Silva, R. (2020). "Rapid Prototyping in Industrial IoT Systems: The Role of MicroPython." *International Journal of IoT and Automation*, 12(2), 115-130.

Jones, P., & Smith, R. (2020). "Cost Implications of Traditional PLCs in the Age of Open Source and PC-Based Control." *Automation Technology Review*, 18(2), 75-90.

L. E. Fernandez-Rodriguez, J. Rodriguez-Resendiz and M. A. Martinez-Hernandez, "An open-source FPGA-based control and data acquisition hardware platform," 2021 XVII International Engineering Congress (CONIIN), Queretaro, México, 2021, pp. 1-11, doi: 10.1109/CONIIN54356.2021.9634743.

Lemos, A., Pereira, M., & Reis, C. (2021). "Open Source Automation Platforms and the Shift Away from Traditional PLCs: A Comparative Analysis." *Journal of Industrial Engineering*, 56(2), 109-127.

Lundh, M., Svensson, H., & Hellström, J. (2019). "Challenges and Opportunities in Modernizing PLC Systems: A Case Study on Flexibility and Control." *Journal of Industrial Automation*, 44(1), 23-37.

M. A. Sehr et al., "Programmable Logic Controllers in the Context of Industry 4.0," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 17, no. 5, pp. 3523-3533, May 2021, doi: 10.1109/TII.2020.3007764.

M. Azarmipour, H. Elfaham, C. Gries and U. Epple, "PLC 4.0: A Control System for Industry 4.0," IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Lisbon, Portugal, 2019, pp. 5513-5518, doi: 10.1109/IECON.2019.8927026.

M. Jbair, B. Ahmad, M. H. Ahmad and R. Harrison, "Industrial cyber physical systems: A survey for control-engineering tools," 2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS), St. Petersburg, Russia, 2018, pp. 270-276, doi: 10.1109/ICPHYS.2018.8387671.

Miller, A., et al. (2021). "Customer Experience and Technology Adoption in Industrial Automation." Journal of Automation and Control Engineering, 28(3), 134-150.

Müller, P. et al. (2020). "Customization in Industrial Automation Using Open Source Platforms." International Journal of Industrial Informatics, 25(2), 101-113.

Parmentier, G., Castellano, S., & Rinaldi, M. (2020). "Customization and Innovation in Industrial Automation: Enhancing Customer Satisfaction through Tailored Solutions." Industrial Engineering Journal, 33(4), 147-158.

Pereira, S. & Lima, T. (2022). "Tailoring Industrial Automation Systems with Open Source Hardware: Benefits and Challenges." Automation Technology Review, 49(3), 201-223.

R. Rout, S. K. Samal and G. Modak, "Design of Low-Cost PLC to Drive Three-Phase Induction Motor using Variable Frequency Drive," 2024 Control Instrumentation System Conference (CISCON), Manipal, India, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/CISCON62171.2024.10696682.

Rajput, A., Singh, N., & Kumar, S. (2020). "Operational Efficiency through Flexible Automation Systems: Moving Beyond Traditional PLCs." Automation & Robotics Journal, 41(1), 58-70.

S. A. Namekar and R. Yadav, "Programmable Logic Controller (PLC) and its Applications," International Journal of Innovative Research in Technology, vol. 6, no. 11, pp. 372, April 2020, ISSN: 2349-6002.

Smith, A., & Jones, P. (2020). "MicroPython in Industrial Automation: A New Frontier." *Journal of Embedded Systems*, 23(2), 101-115.

W. Z. Khan, M. H. Rehman, H. M. Zangoti, M. K. Afzal, N. Armi, and K. Salah, "Industrial internet of things: Recent advances, enabling technologies and open challenges," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 81, p. 106522, 2020. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2019.106522.

Wang, J., Liu, H., & Zhang, Y. (2021). "Flexibility and Interoperability in Open-Source Automation Systems." *Journal of Industrial Automation*, 29(2), 88-102.

Wang, Z., Liu, J., & Zhang, Y. (2021). "Industrial Connectivity and the Future of PLC Systems in Industry 4.0." *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(6), 4187-4196.