

# DESENVOLVIMENTO DE INTERFACE DE CONTROLE BASEADO NA ABORDAGEM DA INTERNET DAS COISAS PARA IMPLEMENTAÇÃO DE MANUTENÇÃO PREDITIVA INTELIGENTE: CASO DE COMPRESSOR DE AR

## DEVELOPMENT OF A CONTROL INTERFACE BASED ON THE INTERNET OF THINGS APPROACH FOR IMPLEMENTING INTELLIGENT PREDICTIVE MAINTENANCE: CASE OF AIR COMPRESSOR

Maurício Falvo<sup>1, i</sup>  
Murilo Herrick Riva de Camargo<sup>2, ii</sup>  
Nícolas Moreira Ribeiro<sup>3, iii</sup>  
Tony Emerson Marim<sup>4, iv</sup>  
Vinícius Brolezzi Gaban<sup>5, v</sup>

### RESUMO

Este artigo apresenta o desenvolvimento de uma interface de controle remoto baseada em IoT para manutenção preditiva de um compressor de ar portátil em ambiente industrial. A arquitetura utiliza o protocolo Modbus RTU sobre RS-485 para a comunicação entre um Controlador Lógico Programável (CLP) OPTA *Advanced* (mestre) e um Arduino Uno (escravo), responsável pela aquisição de variáveis como temperatura, umidade e pressão. Os dados são integrados a uma plataforma móvel, desenvolvida em Flutter e Node-Red, permitindo supervisão e controle em tempo real. O objetivo principal é demonstrar a viabilidade de uma solução de baixo custo, escalável e robusta, capaz de operar em ambientes industriais sujeitos a interferências eletromagnéticas. Os resultados parciais indicam ganhos na eficiência operacional, na redução de falhas inesperadas e no suporte à manutenção preditiva, reforçando o alinhamento da proposta aos princípios da Indústria 4.0.

**Palavras-chave:** internet das coisas; manutenção preditiva; Modbus RTU; monitoramento remoto; compressor de ar.

### ABSTRACT

This article presents the development of an IoT-based remote control interface for predictive maintenance of a portable air compressor in an industrial environment. The proposed architecture employs the Modbus RTU protocol over RS-485 to establish communication between an OPTA Advanced Programmable Logic Controller (PLC) acting as master and an Arduino Uno as slave, responsible for acquiring variables such as temperature, humidity, and pressure. The collected data are integrated into a mobile platform, developed with Flutter and Node-Red, enabling real-time supervision and control.

---

<sup>1</sup> Doutor em Física Aplicada e Professor da Faculdade de Tecnologia SENAI Antonio Adolpho Lobbe. E-mail: E-mail: [mauricio.falvo@sp.senai.br](mailto:mauricio.falvo@sp.senai.br)

<sup>2</sup> Graduando em Análise e Desenvolvimento de Sistemas pela Faculdade de Tecnologia SENAI Antonio Adolpho Lobbe. E-mail: [muriloherrick@gmail.com](mailto:muriloherrick@gmail.com)

<sup>3</sup> Graduando em Análise e Desenvolvimento de Sistemas pela Faculdade de Tecnologia SENAI Antonio Adolpho Lobbe. E-mail: [nicolas.ribeiro@sp.senai.br](mailto:nicolas.ribeiro@sp.senai.br)

<sup>4</sup> Mestre em Engenharia Mecânica e Professor da Faculdade de Tecnologia SENAI Antonio Adolpho Lobbe. E-mail: [tony.marin@sp.senai.br](mailto:tony.marin@sp.senai.br)

<sup>5</sup> Graduando em Análise e Desenvolvimento de Sistemas pela Faculdade de Tecnologia SENAI Antonio Adolpho Lobbe. E-mail: [gabanvinicius724@gmail.com](mailto:gabanvinicius724@gmail.com)

The main objective is to demonstrate the feasibility of a low-cost, scalable, and robust solution, capable of operating in industrial environments subject to electromagnetic interference. Preliminary results indicate improvements in operational efficiency, reduction of unexpected failures, and support for predictive maintenance, highlighting the alignment of the proposed solution with the principles of Industry 4.0.

**Keywords:** internet of things; predictive maintenance, Modbus RTU; remote monitoring; air compressor.

## 1 INTRODUÇÃO

À medida que as tecnologias digitais evoluem e os princípios da Indústria 4.0 se firmam, a procura por soluções completas que possibilitem a supervisão, o gerenciamento e a análise de dados em tempo real nos ambientes industriais aumenta. A instalação de sistemas fundamentados na IoT e na comunicação em redes industriais tem gerado progressos notáveis na performance operacional, na segurança dos procedimentos e na aptidão para decisões através de instrumentos de acompanhamento preditivo e gestão inteligente de bens.

Nesse cenário, a união entre dispositivos industriais diversos, através de normas estabelecidas como o Modbus RTU sobre RS-485, tem se revelado uma saída eficiente para usos que exigem solidez, simplicidade e um custo baixo de instalação. O modelo Mestre/Escravo apresentado por essa norma possibilita o gerenciamento e a obtenção de dados em variados níveis da estrutura industrial, desde a linha de produção até os sistemas de acompanhamento e controle na nuvem ou em aparelhos móveis.

Este estudo apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta para controle e monitoramento remoto de um compressor de ar portátil. A solução proposta combina um CLP OPTA *Advanced Finder*, atuando como mestre Modbus RTU, e um Arduino Uno, configurado como escravo responsável pela coleta de variáveis operacionais, como temperatura, umidade e estado de funcionamento do equipamento. O projeto incluiu a concepção de hardware específico para o compressor, bem como o mapeamento e a organização dos registradores Modbus, garantindo uma comunicação eficiente entre os dispositivos.

Embora ainda em andamento, o trabalho busca integrar uma interface supervisória móvel, com painéis interativos para a visualização em tempo real dos dados coletados e a emissão de comandos de controle remoto. A principal contribuição da pesquisa reside na combinação de um CLP industrial de alto desempenho com uma plataforma de prototipagem de baixo custo em uma única arquitetura de monitoramento de compressores. Essa integração evidencia o potencial da proposta como base escalável para aplicações em automação industrial, manutenção preventiva e gestão remota de equipamentos.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Na indústria, os sistemas de ar comprimido são bastante usados e diversos especialistas os consideram a quarta forma de energia, devido à sua adaptabilidade e alcance (Hu *et al.*, 2018). Entretanto, seu funcionamento consome uma fatia considerável da energia industrial, representando até 10% dos gastos totais com energia em países desenvolvidos. As perdas por vazamentos ou uso inadequado podem chegar a 35% do ar produzido, causando impactos ambientais e econômicos

relevantes (Kim *et al.*, 2022). Normalmente, encontrar vazamentos exige inspeção no local com equipamentos próprios, paralisando a produção e aumentando os custos (Kim *et al.*, 2022). Nesse contexto, soluções baseadas em dados têm se destacado, como o uso de técnicas de aprendizado de máquina, incluindo o modelo *XGBoost* junto ao *DTW (Dynamic Time Warping)*, que facilita a identificação e classificação de padrões de vazamento com precisão e de forma escalável (Kim *et al.*, 2022).

A eficiência dos sistemas de ar comprimido também depende das estratégias de controle adotadas. Sistemas com controle liga/desliga são comuns em compressores de velocidade fixa, enquanto os sistemas com controle por Velocidade Variável (VSD) garantem mais estabilidade de pressão e economia de energia, embora tenham limitações em baixas rotações e mudanças bruscas de frequência (Hu *et al.*, 2018). Estratégias em cascata, usadas em vários compressores com pressões diferentes, atendem grandes demandas, mas podem gerar oscilações e alto consumo de energia (Hu *et al.*, 2018). Sistemas híbridos, que combinam compressores fixos e variáveis, diminuem o consumo total de energia e mantêm maior estabilidade (Hu *et al.*, 2018). Modelos como o *CARIMA (Controlled Autoregressive Integrated Moving Average)* têm sido propostos para representar a natureza dinâmica e variante desses sistemas (Wang *et al.*, 2010).

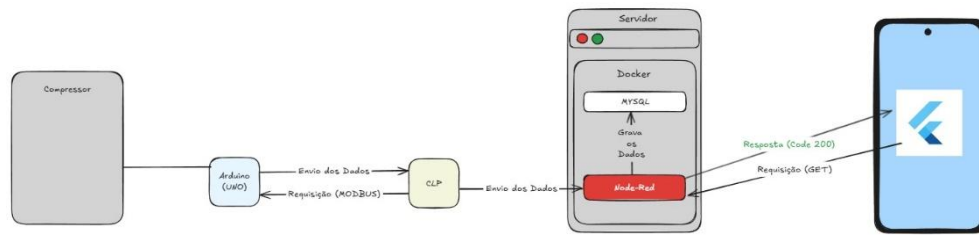
Com o avanço da Indústria 4.0, a Internet Industrial das Coisas (IIoT) tem revolucionado o monitoramento industrial, substituindo os sistemas *SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition)* tradicionais, que têm limitações em escalabilidade e comunicação eficiente (Pham *et al.*, 2023). A IIoT, baseada no modelo *publish/subscribe*, permite comunicação orientada a eventos, reduzindo a necessidade de largura de banda e melhorando o desempenho (Pham *et al.*, 2023). A coleta contínua de dados de sensores, como temperatura, pressão, torque e estado de funcionamento, é crucial para identificar anomalias e tomar decisões em tempo real (Mounir *et al.*, 2024; Kumaresan *et al.*, 2023). Além disso, a integração de análise preditiva e algoritmos de *Machine Learning* permite prever falhas, otimizar processos e diminuir o tempo de inatividade (Mounir *et al.*, 2024; Pham *et al.*, 2023).

Diante desse contexto renovado, os CLPs de última geração, com sua habilidade de se conectar a sistemas na nuvem através de protocolos como OPC UA e Profinet, ganham destaque na automação (Kumaresan *et al.*, 2023; Roshini *et al.*, 2020). As IHMs (Interfaces Homem-Máquina) viabilizam o acompanhamento tanto no local quanto à distância, utilizando softwares como LabVIEW e Node-Red para otimizar a adaptabilidade e a facilidade de uso (Mounir *et al.*, 2024; Kumaresan *et al.*, 2023; Roshini *et al.*, 2020). Os SCDs (Sistemas de Controle Distribuído) viabilizam o gerenciamento autônomo de múltiplos compressores conectados, assegurando o ajuste automático da pressão, a otimização do consumo de energia e a segurança (Wang *et al.*, 2010). A manutenção preditiva via IIoT, por outro lado, proporciona vantagens extras como a diminuição de gastos, a extensão da durabilidade dos equipamentos, a eficiência energética e a segurança (Mounir *et al.*, 2024).

### 3 METODOLOGIA

O propósito desta investigação foi criar uma malha de comunicação fabril que emprega o protocolo Modbus RTU, reunindo o controlador *OPTA Advanced* da Finder, um compressor móvel e um Arduino Uno. A estrutura sugerida viabilizou a aquisição e o envio de informações instantâneas, direcionada à administração de atividades fabris e à conservação antecipatória (Figura 1).

Figura 1: Diagrama de funcionamento do sistema.



Fonte: autores (2025).

### 3.1 Componentes e configuração do sistema

A estrutura física foi composta pelos seguintes elementos:

- OPTA *Advanced* (Finder): controlador lógico programável responsável pelo monitoramento e controle do compressor, atuando como mestre Modbus RTU.
- Arduino Uno: microcontrolador configurado como escravo Modbus, programado em C++ por meio da IDE Arduino, encarregado da coleta de dados dos sensores conectados ao compressor.
- Compressor Portátil: equipamento industrial monitorado por sensores de pressão, temperatura e umidade, cujos dados foram lidos pelo Arduino.

### 3.2 Protocolo de comunicação

A comunicação entre os dispositivos foi baseada no protocolo Modbus RTU, utilizando a interface RS-485 em modo *half-duplex*, com apenas dois condutores (A e B) para transmissão e recepção de dados. O Arduino foi adaptado para essa comunicação por meio do conversor Max3485ESA+T, necessário devido à sua interface padrão RS-232. A configuração da rede considerou parâmetros como ID de dispositivos, endereçamento de registradores e paridade de comunicação, garantindo a conformidade com os padrões industriais.

### 3.3 Coleta dos dados

O Arduino Uno foi responsável pela aquisição dos dados operacionais do compressor, incluindo pressão, temperatura, umidade e estado de funcionamento. As informações foram alocadas em registradores específicos na memória do microcontrolador e disponibilizadas sob demanda, mediante requisições do CLP mestre.

### 3.4 Processamento e armazenamento

O processamento inicial dos dados foi realizado pelo OPTA *Advanced*, que também se encarregou do armazenamento local em banco de dados. Um sistema supervisório foi desenvolvido em Flutter para permitir o monitoramento remoto. A plataforma Node-Red foi empregada para o roteamento e manipulação dos dados, integrando o sistema supervisório ao banco de dados de forma eficiente e escalável.

### 3.5 Análise de dados

Os dados coletados foram analisados em tempo real para avaliação do desempenho do compressor e detecção de condições operacionais anormais. O sistema gerava alertas automáticos em caso de valores fora dos limites predefinidos, permitindo ações

corretivas imediatas e contribuindo para a redução de falhas inesperadas.

### 3.6 Limitações da metodologia

Entre as limitações observadas, destaca-se a configuração manual de parâmetros no Arduino Uno, exigindo atenção durante a implementação para evitar falhas humanas. Além disso, a necessidade de conversão da interface de comunicação por meio do conversor Max485 representou uma etapa adicional, devido à incompatibilidade entre os padrões RS-232 (Arduino) e RS-485 (Modbus).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apesar de contemplar um estado parcial, a aplicação desenvolvida apresentou resultados relevantes em todas as etapas da implementação.

### 4.1 Aquisição de dados sensoriais via Arduino Uno

As informações foram obtidas por meio de sensores integrados a um Arduino Uno, configurado para operar como dispositivo escravo no protocolo Modbus RTU. Essa arquitetura possibilitou a aquisição e o acompanhamento de variáveis operacionais fundamentais para o diagnóstico do desempenho do compressor, incluindo temperatura, umidade e pressão. A pressão de operação foi definida em 10 bar, enquanto a temperatura ficou estabelecida em um valor máximo de 85 °C, valores superiores a esses limites acionam de forma imediata um mecanismo de alerta, reforçando o caráter preventivo da solução proposta.

A supervisão foi implementada por meio da plataforma Flutter, o que viabilizou a disponibilização dos dados em dispositivos móveis com interface intuitiva e responsiva. Os sinais coletados foram devidamente organizados em registradores Modbus, assegurando uma comunicação estruturada, segura e de fácil interpretação pelo CLP mestre. Nos testes realizados, observou-se um tempo de resposta variando entre 200 ms e 400 ms, resultado que demonstra a eficiência do sistema em transmitir informações críticas em tempo adequado para a tomada de decisão.

### 4.2 Integração entre as camadas da arquitetura de comunicação

Para garantir a integração entre os diferentes níveis de comunicação, foi implementada uma REST API, operando com métodos GET e POST, de forma a tratar os mesmos dados coletados via Modbus e disponibilizá-los por meio de *endpoints* estruturados. Nessa arquitetura, o CLP OPTA *Advanced* assumiu o papel de gateway, responsável pelo envio das informações por *endpoints* HTTP, assegurando o transporte adequado entre as camadas de comunicação.

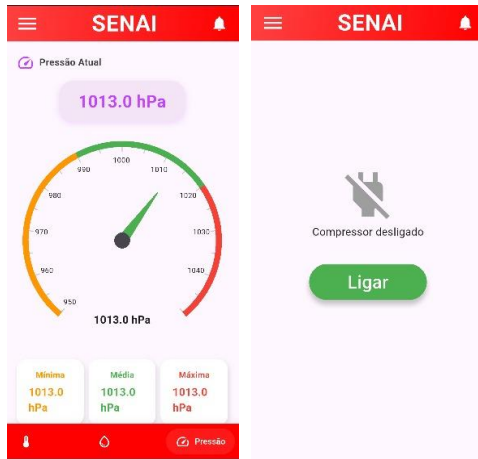
Essa combinação evidencia não apenas a robustez da comunicação, mas também a escalabilidade do sistema, alinhando-se diretamente às exigências da Indústria 4.0, sobretudo em aspectos relacionados à interoperabilidade, flexibilidade e gestão remota de ativos.

### 4.3 Interface de controle e supervisão remota (*mobile dashboard*)

A partir da integração com o CLP OPTA *Advanced*, foi possível desenvolver uma interface móvel acessível via rede local ou internet (Figura 2), utilizando ferramentas como Flutter e Node-Red. Essa interface permitiu o acionamento e

desarme remoto do compressor, ampliando significativamente a autonomia do processo e viabilizando o controle em tempo real, mesmo fora do ambiente industrial.

**Figura 2: Interface *mobile* para supervisão do funcionamento, (a) dados de pressão e (b) acionamento remoto.**



(a)

(b)

Fonte: autores (2025).

#### 4.4 Robustez da comunicação em ambiente industrial

A confiabilidade da comunicação Modbus foi verificada em ambiente sujeito a ruídos elétricos e interferências típicas do chão de fábrica. O uso da interface RS-485 e do conversor Max485 assegurou a imunidade a ruídos, demonstrando a robustez da solução proposta, o que é um fator determinante para aplicações industriais críticas.

## 5 CONCLUSÃO

As tecnologias apresentadas no trabalho, até o momento visam não apenas otimizar a eficiência energética e operacional, mas também garantir a confiabilidade, segurança e longevidade dos equipamentos em ambientes industriais complexos. De forma geral, os resultados do projeto que está em desenvolvimento, evidenciam que a solução proposta é viável, robusta e adaptável, reunindo características desejáveis em sistemas modernos de automação industrial. A possibilidade de monitoramento contínuo, controle remoto e visualização em tempo real posiciona a aplicação como uma alternativa eficaz e de baixo custo para o controle de compressores e equipamentos similares. Dessa forma, ficam estabelecidas integrações para projetos futuros, como a inclusão de *machine learning*, integração em nuvem e testes em escala maior.

## REFERÊNCIAS

KIM, D.; KIM, J.; YOO, Y. S.; LEE, I. W. A Data-Driven Approach to Detect Air Leakage in the System Using IoT Sensor Data. **2022 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Asia (ICCE-Asia)**, p. 1–4, 3 nov. 2024. DOI: [10.1109/ICCE-Asia63397.2024.10773807](https://doi.org/10.1109/ICCE-Asia63397.2024.10773807) Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10773807>. Acesso em: 06 de agosto de 2025.

KUMARESAN, K.; DHANASEKAR, R.; SURAJ, M. V.; KESHVANTH,

S.; GOKUL, R. M.; SOLOMON, A. S. M. IIOT based Remote Monitoring and Control of Bottle Filling Process Using PLC and Node-Red. p. 1–5, 15 dez. 2023. DOI: [10.1109/C21659362.2023.10430762](https://doi.org/10.1109/C21659362.2023.10430762). Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10430762>. Acesso em: 08 de agosto de 2025.

MOUNIR, E. K.; HASAN, S. ZINEB, Z. An Interface Development based on Internet of Things Approach for Smart Predictive Maintenance implementation: Case of Diesel Engine. **2024 International Conference on Circuit, Systems and Communication (ICCSC)**, p. 1–6, 28 jun. 2024. DOI: [10.1109/ICCSC62074.2024.10616750](https://doi.org/10.1109/ICCSC62074.2024.10616750). Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10616750>. Acesso em: 05 de agosto de 2025.

PHAM, N.H.; LE, X.T.; LE, M. H.; TRAN, N. H. Developing No-Code IIoT Platform For Small and Medium Manufacturing Plant. **2024 International Conference on Logistics and Industrial Engineering (ICLIE)**, p. 1–6, 1 dez. 2024. DOI: [10.1109/ICLIE61478.2024.11015378](https://doi.org/10.1109/ICLIE61478.2024.11015378). Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/11015378>. Acesso em: 30 de julho de 2025.

ROSHINI, C.; SOWMYA, G.; DEWAN, L. Automation of Instrument Air Distribution System using PLC and incorporating Industry 4.0. **2020 First IEEE International Conference on Measurement, Instrumentation, Control and Automation (ICMICA)**, p. 1–5, 24 jun. 2020. DOI: [10.1109/ICMICA48462.2020.9242796](https://doi.org/10.1109/ICMICA48462.2020.9242796). Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9242796>. Acesso em: 30 de julho de 2025.

WANG, S.; XING, J.; WEI, T. A Research on the Methods of Forecasting and Controlling for Air Compressor. **International Conference on Electrical and Control Engineering**, 1 jun. 2010. DOI: [10.1109/iCECE.2010.1412](https://doi.org/10.1109/iCECE.2010.1412) Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5630764> Acesso em: 05 de agosto de 2025.

WANG, Y.; MAOYONG, C.; DEPING, Z.; LIJUN, H. A distributed control system for the different types of air compressors. **Control Conference (CCC), 2012 31st Chinese**, p. 7588–7592, 1 jan. 2012. Eletronic ISSN: 978-988-15638-1-1 Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/261196166\\_A\\_distributed\\_control\\_system\\_for\\_the\\_different\\_types\\_of\\_air\\_compressors](https://www.researchgate.net/publication/261196166_A_distributed_control_system_for_the_different_types_of_air_compressors). Acesso em: 08 de agosto de 2025.

## **SOBRE O(S)AUTOR(ES)**

### **i MAURÍCIO FALVO**



Possui graduação em Análise de Sistema pela PUC-Campinas, Mestrado em Ciências da Computação e Matemática Computacional pela USP – Universidade de São Paulo, além de Doutorado em Física Aplicada pela USP – Universidade de São Paulo. Atualmente, ocupa o cargo de Professor de Ensino Superior na Faculdade de Tecnologia do SENAI Antonio Adolpho Lobbe. CV: <http://lattes.cnpq.br/1457433896521556> Orcid: [0000-0002-8080-0168](https://orcid.org/0000-0002-8080-0168)

## ii MURILO HERRICK RIVA DE CAMARGO



Graduando do Curso Superior de Tecnologia (CST) em Análise e Desenvolvimento de Sistemas pela Faculdade de Tecnologia SENAI Antonio Adolpho Lobbe. CV: <http://lattes.cnpq.br/2965448178593290>  
Orcid: <https://orcid.org/0009-0007-5848-0560>

## iii NÍCOLAS MOREIRA RIBEIRO



Graduando do Curso Superior de Tecnologia (CST) em Análise e Desenvolvimento de Sistemas pela Faculdade de Tecnologia SENAI Antonio Adolpho Lobbe. CV: <https://lattes.cnpq.br/5167790668142165>  
Orcid: <https://orcid.org/0009-0003-3558-2469>

## iv TONY EMERSON MARIM



Possui graduação em Automação Industrial pela Universidade Paulista (UNIP) e Licenciatura plena em Pedagogia pela UFSCar – Universidade Federal de São Carlos, além de mestrado em Engenharia pela UFSCar – Universidade Federal de São Carlos. Atualmente, ocupa o cargo de Professor de Ensino Superior na Faculdade de Tecnologia do SENAI Antonio Adolpho Lobbe. CV: <https://lattes.cnpq.br/2215850363897403>  
Orcid: <https://orcid.org/0009-0008-8802-239X>

## v VINÍCIUS BROLEZZI GABAN



Graduando do Curso Superior de Tecnologia (CST) em Análise e Desenvolvimento de Sistemas pela Faculdade de Tecnologia SENAI Antonio Adolpho Lobbe. CV: <https://lattes.cnpq.br/4668385653909006>  
Orcid: <https://orcid.org/0009-0005-4146-0382>