

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO IoT PARA MONITORAMENTO DE SERVOMOTORES NA INDÚSTRIA DE ELEVADORES

Guilherme Ramos Rossetto, Bruno Satiro Pereira, Leonardo Yuji Ishizaki e Renato Kazuo Miyamoto

RESUMO

A indústria 4.0 tem impulsionado a adoção de sistemas de monitoramento baseados em sensores inteligentes e Internet das Coisas (IoT), especialmente em aplicações industriais que demandam confiabilidade, eficiência energética e manutenção preditiva. Nesse contexto, este artigo apresenta o desenvolvimento de um protótipo para monitoramento de parâmetros físicos de um servomotor, com aplicação voltada à Indústria Atlas Schindler. O objetivo do trabalho consiste em avaliar as variáveis temperatura, vibração e corrente elétrica, visando analisar o comportamento operacional do servomotor e identificar oportunidades de melhoria relacionadas ao seu funcionamento eficiente. A metodologia empregada baseia-se na utilização de um microcontrolador ESP32, programado por meio do framework ESP-IDF, integrado a sensores específicos para cada grandeza monitorada. O sistema foi acondicionado em uma case desenvolvida por impressão 3D, possibilitando organização e proteção dos componentes eletrônicos. Os dados coletados são transmitidos via interface serial USB, processados e visualizados por meio da ferramenta Node-RED, além de serem enviados para armazenamento e monitoramento em nuvem utilizando a plataforma IoT ThingsBoard. Como resultados, o protótipo demonstrou capacidade de aquisição e visualização dos dados em tempo real, validando a arquitetura proposta como uma solução de baixo custo e escalável. Por fim, o trabalho discute a possibilidade de estimação indireta do torque a partir da medição da corrente elétrica, apresentada como perspectiva para trabalhos futuros.

Palavras-chave: servomotor; Internet das Coisas; sistemas embarcados; monitoramento industrial; ESP32.

Development of an IoT Prototype for Servomotor Monitoring in the Elevator Industry

ABSTRACT

The increasing adoption of Industry 4.0 concepts has driven the development of monitoring systems based on smart sensors and Internet of Things (IoT), especially in industrial applications that require high reliability, energy efficiency, and predictive maintenance. In this context, this paper presents the development of a prototype for monitoring operational parameters of a servomotor, with application focused on the Atlas Elevadores industry. The main objective is to evaluate temperature, vibration, and electrical current in order to analyze the servomotor's operating behavior and identify opportunities for improving its efficiency. The proposed methodology is based on the use of an ESP32 microcontroller programmed using the ESP-IDF framework, integrated with specific sensors for each monitored variable. The system was housed in a 3D-printed enclosure, providing mechanical protection and proper organization of electronic components. Data acquisition is performed via a USB serial interface, with real-time visualization and processing implemented using Node-RED, as well as cloud storage and monitoring through the ThingsBoard IoT platform. The results demonstrate that the prototype is capable of reliably acquiring and visualizing operational data in real time, validating the proposed architecture as a low-cost and scalable solution for industrial monitoring. Finally, the paper discusses the indirect estimation of servomotor torque based on current measurement as a perspective for future work.

Key words: servomotor. Internet of Things. embedded systems. industrial monitoring. ESP32.

1 INTRODUÇÃO

A Indústria 4.0 tem promovido uma transformação significativa nos sistemas produtivos, caracterizada pela integração entre sistemas físicos e digitais, pela conectividade e pelo uso intensivo de dados nos processos industriais. Nesse contexto, tecnologias como a Internet das Coisas (IoT), sistemas embarcados e sensoriamento inteligente possibilitam a coleta, transmissão e análise de informações em tempo real, contribuindo para o aumento da eficiência operacional, da

confiabilidade dos processos e da tomada de decisão baseada em dados (LEE; BAGHERI; KAO, 2015; GUBBI et al., 2013).

O monitoramento contínuo de equipamentos eletromecânicos assume papel estratégico nesse cenário, uma vez que permite acompanhar variáveis operacionais relevantes e identificar condições anormais de funcionamento de forma antecipada. A análise dessas variáveis viabiliza a implementação de estratégias de manutenção preditiva, reduzindo falhas inesperadas, custos operacionais e tempos de indisponibilidade dos sistemas (MOBLEY, 2002). Em aplicações industriais que demandam elevados níveis de segurança e confiabilidade, o monitoramento sistemático torna-se ainda mais relevante.

Os servomotores são amplamente empregados em sistemas industriais devido à sua capacidade de controle preciso de posição, velocidade e torque. Entretanto, o desempenho e a vida útil desses dispositivos podem ser afetados por fatores como temperatura de operação, umidade do ambiente, vibração mecânica e corrente elétrica consumida. Variações anormais nessas grandezas podem indicar sobrecargas, desgaste de componentes, desalinhamentos mecânicos ou condições inadequadas de operação (RANDALL, 2011). Dentre essas variáveis, a vibração mecânica destaca-se como uma das principais técnicas para avaliação do estado operacional de máquinas rotativas, sendo normatizada por padrões internacionais, como a ISO 10816, que estabelece critérios para análise de níveis aceitáveis de vibração em equipamentos industriais (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2009).

Diante desse cenário, observa-se a necessidade de soluções de monitoramento que sejam acessíveis, modulares e escaláveis, capazes de acompanhar em tempo real as principais variáveis operacionais de servomotores sem a exigência de infraestruturas complexas ou de alto custo. O uso de microcontroladores de baixo custo, aliados a plataformas de visualização e armazenamento de dados, apresenta-se como uma alternativa viável tanto para aplicações industriais quanto educacionais (GUBBI et al., 2013).

O microcontrolador ESP32 destaca-se nesse contexto por oferecer recursos de processamento, conectividade e flexibilidade de desenvolvimento, sendo amplamente utilizado em projetos de IoT e sistemas embarcados. Quando programado por meio do framework ESP-IDF, o dispositivo possibilita o desenvolvimento de aplicações robustas e modulares, adequadas ao monitoramento em tempo real de múltiplas variáveis físicas (ESPRESSIF SYSTEMS, 2024).

Assim, este trabalho tem como objetivo desenvolver um protótipo baseado em IoT para o monitoramento de um servomotor, com foco na aquisição das variáveis de temperatura, vibração e corrente elétrica. A proposta integra um sistema embarcado baseado no ESP32 a ferramentas de visualização local e monitoramento em nuvem, utilizando plataformas amplamente difundidas como Node-RED e ThingsBoard, empregadas em aplicações de supervisão, monitoramento e análise de dados em ambientes industriais e educacionais (NODE-RED FOUNDATION, 2023; THINGSBOARD, 2024). Além do potencial de aplicação industrial, o projeto justifica-se por seu caráter didático, permitindo a experimentação prática de conceitos relacionados à Indústria 4.0, IoT e monitoramento de ativos industriais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Indústria 4.0 e Internet das Coisas no Contexto Industrial

A indústria 4.0 representa uma nova abordagem para os sistemas produtivos, caracterizada pela integração entre tecnologias digitais, sistemas físicos e conectividade em rede. Esse paradigma industrial promove o uso de sensores inteligentes, sistemas embarcados e comunicação em tempo real, possibilitando maior flexibilidade, eficiência e autonomia em processos industriais (LEE; BAGHERI; KAO, 2015).

Nesse contexto, a *Internet of Things (IoT)* surge como uma tecnologia habilitadora, permitindo que dispositivos físicos sejam conectados a rede para coleta,

transmissão e processamento de dados. Segundo Gubbi et al. (2013), a IoT possibilita a criação de sistemas distribuídos capazes de monitorar variáveis físicas e transformar dados brutos em informações relevantes para apoio à tomada de decisão. No ambiente industrial, essa conectividade favorece o monitoramento contínuo de equipamentos, a rastreabilidade de processos e a implementação de estratégias de manutenção baseadas em dados.

A adoção de soluções de *IoT* industrial contribui significativamente para a confiabilidade operacional e a redução de custos, uma vez que possibilita a identificação de condições anormais de funcionamento antes da ocorrência de falhas críticas, característica fundamental das abordagens de manutenção preditiva (MOBLEY, 2002; RANDALL, 2011). Dessa forma, o monitoramento de ativos industriais torna-se um elemento essencial dentro da lógica da Indústria 4.0.

2.2 Servomotores e Monitoramento de Variáveis Operacionais

Os servomotores são dispositivos eletromecânicos amplamente utilizados em aplicações industriais que demandam controle preciso de posição, velocidade e torque. Seu funcionamento adequado depende de condições elétricas, térmicas e mecânicas controladas, sendo fundamental o acompanhamento contínuo de variáveis que possam indicar alterações no comportamento operacional do sistema.

A temperatura de operação é uma variável crítica para motores elétricos, pois o aumento excessivo dessa grandeza pode comprometer o isolamento dos enrolamentos, reduzir a vida útil dos componentes e indicar sobrecarga ou falhas de sistema de refrigeração (MOBLEY, 2002). Da mesma forma, a umidade do ambiente pode afetar negativamente o desempenho do motor, favorecendo processos de corrosão e degradação de componentes elétricos, especialmente em ambientes industriais.

A vibração mecânica constitui uma das principais técnicas para avaliação do estado de máquinas rotativas. Alterações nos níveis de vibração podem estar associadas a falhas mecânicas como desalinhamentos, desgaste de rolamentos,

folgas estruturais ou desbalanceamentos. Randall (2011) destaca que a análise de vibração é amplamente utilizada em programas de manutenção preditiva devido à sua capacidade de detectar falhas em estágios iniciais. Essa prática é normatizada por padrões internacionais, como a ISO 10816, que estabelece critérios para avaliação de vibração em máquinas industriais (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2009).

Outra variável relevante no monitoramento de servomotores é a corrente elétrica consumida. A corrente está diretamente relacionada ao esforço mecânico aplicado ao eixo do motor, sendo utilizada como indicador de estado de carga e das condições de operação do sistema. Variações anormais nesse parâmetro podem indicar sobrecargas, atrito excessivo ou falhas incipientes no conjunto eletromecânico (MOBLEY, 2002).

2.3 Sistemas Embarcados Aplicados ao Monitoramento Industrial

Os sistemas embarcados desempenham papel fundamental em aplicações industriais modernas, sendo responsáveis pela aquisição, processamento e transmissão de dados provenientes de sensores. Esses sistemas são caracterizados por sua dedicação a uma função específica, elevada confiabilidade e capacidade de operação em tempo real.

O microcontrolador ESP32 destaca-se nesse cenário por oferecer recursos avançados de processamento, baixo consumo de energia e, principalmente, conectividade integrada, como *Wi-Fi* e *Bluetooth*. Segundo a Espressif Systems (2024), o ESP32 é amplamente utilizado em aplicações de IoT devido à sua flexibilidade, capacidade de integração com diversos sensores e suporte a ambientes de desenvolvimento profissionais.

O uso do framework ESP-IDF possibilita o desenvolvimento de aplicações robustas e modulares, permitindo maior controle sobre os recursos do microcontrolador, gerenciamento de tarefas e comunicação eficiente com periféricos. Essas características tornam o ESP32 adequado para aplicação de monitoramento

industrial que exigem confiabilidade, escalabilidade e aquisição simultânea de múltiplas variáveis físicas.

2.4 Plataformas de Monitoramento e Visualização de Dados

A coleta de dados em sistemas IoT industriais demanda ferramentas capazes de processar, armazenar e apresentar informações de forma clara e acessível. Nesse contexto, plataformas de visualização e supervisão desempenham papel essencial, permitindo o acompanhamento em tempo real das variáveis monitoradas.

O NODE-RED é uma ferramenta amplamente utilizada para integração e visualização de dados em aplicações IoT, destacando-se por sua programação baseado em fluxos e pela facilidade de criação de *dashboards* interativos. Segundo a Node-RED Foundation (2023), a plataforma é adequada para aplicações industriais e educacionais, possibilitando a rápida integração entre dispositivos, protocolos e serviços.

Complementarmente, plataformas IoT em nuvem, como o ThingsBoard, oferecem recursos para armazenamento histórico de dados, monitoramento remoto e gerenciamento de dispositivos conectados. De acordo com a documentação oficial do ThingsBoard (2024), essas plataformas possibilitam a análise contínua de dados operacionais, contribuindo para a implementação de soluções escaláveis e distribuídas de monitoramento industrial.

A integração entre sistemas embarcados, ferramentas de visualização local e plataformas em nuvem configura uma arquitetura típica de soluções IoT industriais, alinhada aos princípios da Indústria 4.0.

2.5 Monitoramento de Corrente Elétrica e Estimação de Torque

A medição da corrente elétrica em motores elétricos é amplamente utilizada como técnica indireta para avaliação do desempenho mecânico do sistema. Em servomotores, a corrente consumida está relacionada ao torque desenvolvido, uma

vez que o aumento da carga mecânica resulta em maior demanda de corrente elétrica.

Segundo Ogata (2010), a análise de variáveis elétricas pode fornecer informações relevantes sobre o comportamento dinâmico de sistemas de controle, permitindo inferências sobre grandezas mecânicas associadas. Dessa forma, a estimação indireta do torque a partir da corrente elétrica apresenta-se uma abordagem viável para monitoramento do desempenho do servomotor, reduzindo a necessidade de sensores adicionais e a complexidade do sistema.

Essa técnica é amplamente discutida na literatura como alternativa para aplicações em que se busca reduzir custos e simplificar a instrumentação, mantendo a capacidade de análise do estado operacional do equipamento.

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho foi estruturada de modo a permitir o desenvolvimento, a implementação e a validação de um protótipo para monitoramento de variáveis operacionais de um servomotor, utilizando tecnologias associadas à *Internet of Things (IoT)*. Para tanto, a pesquisa foi classificada quanto aos fins e quanto aos meios, bem como descritos o ambiente de realização, os procedimentos de coleta de dados e as formas de análise adotadas.

3.1 Classificação da Pesquisa

Quanto aos fins, a pesquisa caracteriza-se como aplicada, uma vez que visa o desenvolvimento de uma solução tecnológica com potencial de aplicação prática no contexto industrial, especificamente no monitoramento de servomotores. Adicionalmente, o estudo possui caráter exploratório e descritivo, pois busca compreender o comportamento de variáveis físicas associadas ao funcionamento do

equipamento monitorado, sem a pretensão de estabelecer relações casuais generalizáveis.

Quanto aos meios, trata-se de uma pesquisa experimental, pois envolve a construção de um protótipo funcional e a realização de ensaios em bancada para coleta de dados. Também pode ser classificada como pesquisa bibliográfica, uma vez que se fundamenta em literatura técnica e científica para embasar as escolhas metodológicas, arquiteturais e tecnológicas adotadas no desenvolvimento do sistema.

3.2 Ambiente da Pesquisa e Unidade de Análise

A pesquisa foi realizada em ambiente de laboratório didático, por meio de ensaios em bancada, utilizando equipamentos de bancada, como fontes de tensão controladas e ferros de solda, para unidades de análise. O sistema de monitoramento foi desenvolvido e testado em condições controladas, permitindo a observação do comportamento das variáveis físicas sem interferências externas típicas de ambientes industriais reais.

Não foi utilizada amostragem estatística, uma vez que o estudo se concentra na avaliação funcional de um protótipo aplicado a um único equipamento, com o objetivo de validar a arquitetura proposta e o funcionamento do sistema de aquisição e monitoramento de dados.

3.3 Coleta de Dados

A coleta de dados ocorreu exclusivamente por meio de ensaios experimentais em bancada, não havendo aplicações de entrevistas, questionários ou formulários com participantes humanos. Tampouco foi realizada coleta de dados documental em sistemas corporativos ou base de dados institucionais.

3.3.1 Instrumentos e Sistema de Aquisição

O sistema de coleta de dados foi baseado em um microcontrolador ESP32, programado por meio do framework ESP-IDF, integrado a sensores específicos para a medição das seguintes variáveis físicas:

- temperatura;
- vibração mecânica;
- corrente elétrica consumida pelo servomotor;

Os sensores foram conectados ao microcontrolador por meio de interfaces analógicas e digitais, conforme as características de cada dispositivo. O conjunto eletrônico foi acondicionado em uma caixa desenvolvida por impressão 3D, visando à organização, proteção e facilidade de manuseio dos componentes durante os ensaios.

A Figura 1 apresenta o protótipo desenvolvido, acondicionado em uma case confeccionada por meio de impressão 3D, na qual estão dispostos o microcontrolador ESP32, os sensores e os demais componentes eletrônicos utilizados no sistema de monitoramento.

Figura 1: Protótipo do sistema de monitoramento acondicionado em case impressa em 3D



Fonte: Autor (2025)

3.3.2 Procedimentos de Coleta

Os dados foram coletados durante a operação do servomotor em bancada, em intervalos regulares definidos no software embarcado. As medições foram transmitidas via interface serial USB para um computador local, onde os dados foram processados e visualizados em tempo real por meio da ferramenta Node-RED. Paralelamente, as informações coletadas foram enviadas para a plataforma IoT ThingsBoard, possibilitando o armazenamento e o monitoramento remoto dos dados.

Durante os ensaios, foram realizadas variações controladas nas condições de operação do sistema, com o objetivo de observar o comportamento das variáveis monitoradas. Todo o processo de coleta ocorreu de forma automatizada, sem intervenção manual durante a aquisição dos dados.

3.4 Análise dos Dados

A análise dos dados coletados possui caráter quantitativo, uma vez que se baseia em valores numéricos provenientes das medições realizadas pelos sensores. Os dados foram analisados de forma descritiva, por meio da observação de tendências, variações e comportamento temporal das variáveis monitoradas durante os ensaios.

As informações visualizadas nos *dashboards* do Node-RED e da plataforma ThingsBoard foram utilizadas para verificar a coerência das medições, a estabilidade da comunicação e o funcionamento adequado do sistema de monitoramento proposto. Não foram aplicados métodos estatísticos inferenciais, visto que o objetivo do trabalho é a validação funcional do protótipo e da arquitetura de monitoramento desenvolvida.

3.5 Considerações Metodológicas

A metodologia adotada permitiu avaliar o funcionamento integrado dos componentes de hardware e software do sistema proposto, bem como sua capacidade de aquisição, transmissão e visualização de dados em tempo real. A realização de ensaios em bancada mostrou-se adequada para validar a solução em ambiente controlado, constituindo etapa preliminar para futuras aplicações em ambientes industriais reais.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Esta seção apresenta e discute os resultados obtidos a partir dos ensaios experimentais realizados em bancada com o protótipo desenvolvido para monitoramento de variáveis operacionais de um servomotor. Os resultados referem-se ao desempenho do sistema de aquisição de dados, à estabilidade da comunicação, bem como à visualização e coerência das informações coletadas durante o funcionamento do equipamento.

4.1 Funcionamento do Sistema de Aquisição de Dados

Durante os ensaios realizados, o sistema baseado no microcontrolador ESP32 apresentou funcionamento estável na aquisição das variáveis de temperatura, vibração e corrente elétrica. Os sensores integrados responderam de forma consistente às variações impostas ao sistema, permitindo a coleta contínua dos dados ao longo do período de operação do servomotor.

A leitura das variáveis térmicas demonstrou comportamento compatível com as condições de operação do equipamento, evidenciando a capacidade do sistema em acompanhar variações de temperatura ao longo do tempo. De forma semelhante, os dados de vibração mecânica apresentaram variações coerentes com o regime de

funcionamento do motor, corroborando a adequação do sensor empregado para aplicações de monitoramento em bancada.

A medição da corrente elétrica demonstrou-se funcional e estável durante os ensaios realizados, possibilitando a aquisição dos valores de corrente de forma contínua e sem a necessidade de contato elétrico direto com o circuito monitorado. Os testes foram conduzidos utilizando os equipamentos de bancada, o que permitiu validar o funcionamento do sistema de medição e a capacidade de aquisição do sinal elétrico, sem a realização de inferências diretas sobre o esforço mecânico ou o estado de carga de um motor em operação.

Esse resultado confirma a adequação do método de medição adotado para aplicação de monitoramento, evidenciando o potencial da variável corrente elétrica como parâmetro a ser explorado em estudos futuros. A relação entre corrente elétrica, carga e torque em motores elétricos, amplamente discutida na literatura, é apresentada neste trabalho apenas como embasamento teórico, não tendo sido objetivo de validação experimental nesta etapa de pesquisa.

4.2 Comunicação e Visualização dos Dados

A transmissão dos dados por meio da interface serial USB ocorreu de forma contínua, sem interrupções ou perdas perceptíveis durante os ensaios. O fluxo de informações foi corretamente interpretado pelo ambiente de visualização desenvolvido na plataforma Node-RED, permitindo a exibição em tempo real das variáveis monitoradas por meio de *dashboards*.

O painel supervisor apresentou atualização adequada dos valores, acompanhando de forma consistente as variações observadas durante o funcionamento do sistema. Não foram identificados atrasos significativos ou falhas de sincronização entre os dados adquiridos pelo sistema embarcado e aqueles exibidos na interface gráfica.

A Figura 2 ilustra o *dashboard* desenvolvido na plataforma Node-RED, no qual é possível visualizar em tempo real as variáveis monitoradas pelo sistema durante os ensaios em bancada.

Figura 2: Dashboard de monitoramento desenvolvido na plataforma Node-RED



Fonte: Autor (2025)

Adicionalmente, o envio dos dados para a plataforma ThingsBoard possibilitou o armazenamento das informações e o acesso remoto aos registros, caracterizando uma arquitetura típica de soluções IoT. Essa integração reforça a viabilidade do uso combinado de ferramentas locais e em nuvem para aplicações de monitoramento industrial e educacional.

4.3 Discussão dos Resultados Obtidos

Os resultados observados durante os ensaios em bancada indicam que o protótipo desenvolvido atende aos objetivos propostos de monitoramento das variáveis operacionais do servomotor. A aquisição contínua e estável dos dados

confirma a adequação do ESP32 e dos sensores selecionados para aplicações de monitoramento baseadas em IoT, conforme discutido na fundamentação teórica.

O comportamento das variáveis monitoradas é compatível com o esperado para sistemas eletromecânicos em operação, reforçando a coerência das medições realizadas. A resposta das leituras de vibração e corrente elétrica às condições de funcionamento do motor evidencia o potencial dessas grandezas para identificação de alterações operacionais, conforme descrito por autores que tratam de manutenção preditiva e monitoramento de máquinas rotativas.

A utilização das plataformas Node-RED e ThingsBoard mostrou-se adequada para a visualização e o acompanhamento dos dados, destacando-se pela estabilidade e facilidade de integração com o sistema embarcado. Esses resultados corroboram a aplicabilidade dessas ferramentas em soluções de baixo custo e arquitetura modular, alinhadas aos princípios da Indústria 4.0.

Por fim, a relação observada entre a corrente elétrica medida e o comportamento operacional do servomotor reforça a viabilidade da estimativa indireta de torque, discutida na literatura como alternativa para análise de desempenho mecânico sem a necessidade de instrumentação adicional. Embora essa abordagem não tenha sido explorada de forma quantitativa neste trabalho, os resultados obtidos indicam seu potencial como continuidade da pesquisa.

De forma geral, os resultados demonstram que o sistema proposto é capaz de realizar o monitoramento em tempo real de múltiplas variáveis físicas associadas ao funcionamento de um servomotor, validando a arquitetura adotada. Os ensaios em bancada confirmam a viabilidade técnica da solução, bem como seu potencial de aplicação em contextos industriais e educacionais, especialmente como ferramenta didática para o ensino de conceitos relacionados à Indústria 4.0, sistemas embarcados e monitoramento de ativos industriais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um protótipo baseado em IoT para o monitoramento de variáveis operacionais, incluindo temperatura, vibração e corrente elétrica. Os ensaios realizados em bancada permitiram verificar que o sistema desenvolvido atende aos objetivos propostos, apresentando funcionamento estável na aquisição, transmissão e visualização dos dados.

Os resultados obtidos indicam que a arquitetura baseada no ESP32, integrada às plataformas Node-RED e ThingsBoard, mostrou-se adequada para aplicações de monitoramento, validando o funcionamento do sistema e dos sensores empregados. A avaliação realizada concentrou-se na verificação do sistema de medição, sem interferências diretas sobre o desempenho mecânico do equipamento monitorado.

Como trabalhos futuros, sugere-se a aplicação do sistema em ambientes industriais reais, a ampliação dos ensaios experimentais e a exploração da estimativa indireta do torque a partir da corrente elétrica, visando ao aprimoramento da solução proposta.

REFERÊNCIAS

- . ESPRESSIF SYSTEMS. ESP-IDF programming guide. Santa Clara: Espressif Systems, 2024. E-book. Disponível em: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/>. Acesso em: 18 dez. 2025.
- . GUBBI, Jayavardhana; BUYYA, Rajkumar; MARUSIC, Slaven; PALANISWAMI, Marimuthu. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, Amsterdam, v. 29, n. 7, p. 1645–1660, 2013.
- . INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 10816: Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts. Geneva: ISO, 2009.
- . LEE, Jay; BAGHERI, Behrad; KAO, Hung-An. A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, Amsterdam, v. 3, p. 18–23, 2015.
- . MOBLEY, R. Keith. *An introduction to predictive maintenance*. 2. ed. Oxford: Elsevier, 2002.

. NODE-RED FOUNDATION. Node-RED documentation. San Francisco: OpenJS Foundation, 2023. Disponível em: <https://nodered.org/docs/> .Acesso em: 18 dez. 2025.

. RANDALL, Robert Bond. Vibration-based condition monitoring: industrial, aerospace and automotive applications. Chichester: John Wiley & Sons, 2011.

. OGATA, K. Modern control engineering. 5. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010.

. THINGSBOARD. ThingsBoard open-source IoT platform documentation. New York: ThingsBoard Inc., 2024. Disponível em: <https://thingsboard.io/docs/> Acesso em: 18 dez. 2025.



Esta obra está licenciada com Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.
[Recebido/Received: Abril 30, 2023; Aceito/Accepted: Agosto 29, 2023]