v7.n8.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

INTEGRAÇÃO DE IOT E BANCO DE DADOS PARA MONITORAMENTO E EFICIÊNCIA NA PRODUÇÃO AUTOMOTIVA

IOT AND DATABASE INTEGRATION FOR MONITORING AND EFFICIENCY IN AUTOMOTIVE PRODUCTION

INTEGRACIÓN DE IOT Y BASES DE DATOS PARA LA MONITORIZACIÓN Y LA EFICIENCIA EN LA PRODUCCIÓN DE AUTOMÓVILES

Fernanda da Silva Vieira[1], Leonardo de Carvalho Vidal[2]

https://doi.org/10.47820/recima21.v7i8.8683

PUBLICADO: 08/2026

RESUMO

A indústria automotiva enfrenta desafios críticos no monitoramento térmico dos processos de pintura. Deficiências nesse controle podem comprometer a qualidade final do acabamento e gerar prejuízos significativos. Este estudo propõe uma arquitetura de monitoramento baseada em Internet das Coisas (IoT), utilizando o microcontrolador ESP32 e o sensor digital DS18B20. Os dados coletados são transmitidos via rede Wi-Fi para um servidor Zabbix, empregando o protocolo Zabbix Trapper (porta 10051) para armazenamento e análise. Conforme resultados, este trabalho validou a integração de IoT no chão de fábrica como estratégia robusta e acessível. A combinação entre ESP32 e Zabbix, via protocolo Trapper, garantiu comunicação eficiente, baixa latência e integridade dos dados. A automação das notificações em tempo real mitigou riscos operacionais, provando que a transição do monitoramento manual para a supervisão digital é tecnicamente viável para indústria automotiva, assegurando alta fidelidade nas informações no setor de pintura.

PALAVRAS-CHAVE: Indústria 4.0. Internet das Coisas (IoT). ESP32. Zabbix Trapper. Manutenção prescritiva. Monitoramento Térmico.

ABSTRACT

The automotive industry faces critical challenges regarding thermal monitoring in painting processes. Deficiencies in this control can compromise the final finish quality and result in significant financial losses. This study proposes a monitoring architecture based on the Internet of Things (IoT), utilizing the ESP32 microcontroller and the DS18B20 digital sensor. Collected data is transmitted via Wi-Fi to a Zabbix server, employing the Zabbix Trapper protocol (port 10051) for storage and analysis. The results validate the integration of IoT on the factory floor as a robust and cost-effective strategy. The combination of the ESP32 and Zabbix, via the Trapper protocol, ensured efficient communication, low latency, and data integrity. Real-time automated notifications mitigated operational risks, demonstrating that the transition from manual monitoring to digital supervision is technically feasible for the automotive industry, thereby ensuring high data fidelity in the painting sector.

KEYWORDS: *Industry 4.0. Internet of Things (IoT). ESP32. Zabbix Trapper. Prescriptive maintenance. Thermal monitoring.*

RESUMEN

La industria automotriz se enfrenta a desafíos críticos en cuanto al monitoreo térmico durante los procesos de pintura. Las deficiencias en este control pueden comprometer la calidad del acabado final y ocasionar pérdidas económicas significativas.

[1] IFRJ, Especialista.
[2] UNIFEI, Doutor.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Este estudio propone una arquitectura de monitoreo basada en el Internet de las Cosas (IoT), utilizando el microcontrolador ESP32 y el sensor digital DS18B20. Los datos recopilados se transmiten vía Wi-Fi a un servidor Zabbix, empleando el protocolo Zabbix Trapper (puerto 10051) para su almacenamiento y análisis. Los resultados validan la integración de IoT en la planta de producción como una estrategia robusta y rentable. La combinación del ESP32 y Zabbix, mediante el protocolo Trapper, garantizó una comunicación eficiente, baja latencia e integridad de los datos. Las notificaciones automatizadas en tiempo real mitigaron los riesgos operativos, demostrando que la transición del monitoreo manual a la supervisión digital es técnicamente viable para la industria automotriz, asegurando así una alta fidelidad de los datos en el sector de pintura.

PALABRAS CLAVE: *Industria 4.0. Internet de las Cosas (IoT). ESP32. Zabbix Trapper. Mantenimiento prescriptivo. Monitoreo térmico.*

INTRODUÇÃO

A Indústria 4.0 representa uma transformação digital significativa no setor industrial, marcada por uma nova fase de conectividade e automação, impulsionada por avanços em tecnologias como a Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA), Computação em Nuvem e Big Data. De acordo com os aportes de Soares *et al.* (2024), no artigo Aplicação de Tecnologias de Inteligência Artificial e IOT na Modernização da Inspeção de placas de Circuito Impresso: um estudo no polo industrial de Manaus, a indústria 4.0 deriva de revoluções industriais anteriores.

A Primeira Revolução Industrial, no século XVIII, introduziu a mecanização com o emprego de máquinas a vapor. A Segunda Revolução, no final do século XIX, trouxe a eletrificação e o conceito de produção em massa. Já a Terceira Revolução, iniciada na segunda metade do século XX, utilizou a automação, possibilitada por eletrônicos e tecnologias de informação (Hermann; Pentek; Otto, 2016).

A Quarta Revolução destaca-se pela integração de sistemas físicos e digitais, possibilitando fábricas inteligentes por meio de tecnologias como sistemas ciber-físicos, IoT, IA (Inteligência Artificial) e Big Data (Soares *et al.*, 2024).

Os avanços tecnológicos oriundos das revoluções, oportunizaram a comunicação inteligente entre máquinas, sistemas e processos, modificando os modelos de negócios e toda a cadeia de valor (Li; Hou; Wu, 2017).

Essa interação reflete diretamente no cotidiano como a presença da Robótica e PLC (Controlador Lógico Programável) utilizados em linha de produção, Sistemas Scada e IOT (Internet das Coisas) para monitoramento, Visão Computacional muito usado com Câmeras integradas a softwares, dentre outros.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

No que diz respeito a competitividade industrial e crescentes avanços tecnológicos, constatou-se a importância de reavaliação de práticas empresariais, com a incorporação das emergentes tecnologias de monitoramento disponíveis. Dentro desse cenário, nos deparamos com a necessidade da realização de processos mais eficazes e precisos, com o uso de poucos recursos e menor impacto ambiental. Nessa perspectiva a utilização do monitoramento digital atua de maneira eficiente, uma vez que os dados capturados por um sensor e enviados para o Zabbix são exatos e precisos, o que não ocorre no monitoramento humano, onde oscilações e erros podem comprometer a qualidade da pintura.

Outro aspecto gerado no âmbito da competitividade na indústria automotiva, é a busca por minimizar paradas não planejadas no processo de produção. Essas paradas geram custos elevados para a empresa e atraso na entrega do carro para o cliente. No setor de pintura, o monitoramento rigoroso de variáveis térmicas é complexo, exigindo planejamento e métricas assertivas.

A principal motivação para realização do estudo foi quanto à temperatura inadequada da tinta no processo de pintura de um carro, seja no setor fabril ou em pequenas oficinas, que pode comprometer a integridade do acabamento das peças, resultando em perdas financeiras e reiteradas correções.

O modelo tradicional de monitoramento baseado na coleta manual de informações e na necessidade de deslocamento físico dos operadores, mostra-se ultrapassado, pois revela-se ineficiente, oneroso e passível de erros humanos, limitando a alocação de profissionais em atividades de maior valor estratégico.

Silva *et al.* (2024) enfatiza que as tecnologias de monitoramento on-line estão ganhando destaque diante do avanço da indústria 4.0. Para o autor, o uso de sensores inteligentes para monitoramento contínuo de temperatura demonstra ganhos significativos em confiabilidade operacional e redução de custos.

Dessa forma, é importante apontar caminhos de valor estratégico no progresso tecnológico e na competitividade das indústrias automotivas. Este artigo propõe o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de temperatura de baixo custo baseado no microcontrolador ESP32, com envio de dados para o servidor Zabbix, visando sua aplicação na linha de acabamento da indústria automotiva.

Assim, o objetivo geral foi desenvolver um protótipo de monitoramento de temperatura da tinta durante o processo de pintura automotiva, integrando IoT e banco de dados. Os objetivos específicos foram: montar o protótipo utilizando a plataforma Arduino com o microcontrolador

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

ESP32 e o sensor DS18B20; configurar o servidor Zabbix como repositório e interface de monitoramento; e estruturar a conectividade via rede Wi-Fi e protocolo TCP/IP.

O ESP32 realiza a leitura digital da temperatura através do sensor e encaminha os dados para o servidor. A escolha desse *hardware* deve-se à facilidade de integração em redes TCP/IP e conectividade Wi-Fi nativa (Babiuch; Foltýnek; Smutný, 2019).

Nesse contexto, o acesso a dados de processo de forma fácil, rápida e visualmente clara torna-se essencial para a indústria, pois permite a identificação e correção ágil de desvios, evitando problemas de maior proporção.

Além disso, a manutenção prescritiva emergiu como o foco central deste estudo, indo além da previsão de falhas ao utilizar a análise de dados para sugerir ações específicas que otimizem a disponibilidade dos ativos. Para viabilizar essa coleta de dados em tempo real no ambiente industrial automotivo.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica deste trabalho apresenta os conceitos essenciais que sustentam o desenvolvimento do sistema de monitoramento térmico proposto.

Internet das Coisas, IoT

A Internet das Coisas (IoT) é a interconexão de dispositivos físicos via protocolo IP para coleta e troca de dados. Segundo Soares *et al.* (2024), embora o conceito tenha surgido na década de 1990, sua expansão só foi possível graças à miniaturização e à redução de custos dos microcontroladores, permitindo a comunicação automática de objetos diversos com a rede mundial.

Segundo Silva *et al.* (2024), a IoT diz respeito à rede global que une dispositivos físicos à internet, permitindo que eles se comuniquem entre si e enviem informações para centrais de controle externas. Esses dispositivos apresentam uma vasta gama de aplicações, variando desde monitores cardíacos implantados até sensores automotivos que alertam sobre a pressão dos pneus.

Campbell e Kelly (2023) afirmam que a IoT representa a próxima fronteira da computação, onde a informação flui não apenas entre pessoas e máquinas, mas entre máquinas e máquinas, criando um ecossistema de inteligência distribuída. Assemelha-se à extensão natural da revolução digital, onde não são apenas computadores e smartphones, mas também

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

dispositivos cotidianos — como eletrodomésticos, carros, sensores industriais e *wearables* — que estão conectados à internet.

A IoT permite a conexão de dispositivos, sensores e sistemas por meio da internet, possibilitando o fluxo bidirecional de dados em tempo real. Refere-se à infraestrutura que executa a integração dos serviços de valor agregado com capacidades de conexão física ou virtual de dispositivos com base em tecnologias existentes de informação e comunicação, garantindo a interoperabilidade entre eles (Soares *et al.*, 2024).

Monitoramento térmico

A manutenção industrial é definida como o conjunto de ações operacionais e gerenciais destinadas a preservar, recuperar e otimizar o desempenho dos ativos físicos de uma organização. Sua atuação abrange desde reparos corretivos de menor complexidade até estratégias avançadas de monitoramento e predição de falhas (Santos; Pinto, 2022).

No ambiente produtivo, essa função busca assegurar a continuidade das operações, a segurança dos processos e a disponibilidade dos equipamentos, consolidando-se como um pilar estratégico para a competitividade das empresas (Bastos; Silva, 2022).

Nesse contexto, o monitoramento térmico destaca-se como um indicador primário de saúde mecânica, especialmente em robôs articulados e motores de correias transportadoras. Segundo Silva *et al.* (2024), a gestão de dispositivos IoT em ambientes fabris exige protocolos que suportem a volatilidade da rede sem a perda de pacotes. A literatura indica que a manutenção preditiva, alimentada por dados em tempo real, pode elevar o OEE (*Overall Equipment Effectiveness*) em até 15%, desde que a integridade das informações seja garantida na origem.

A implementação desses sistemas viabiliza ganhos significativos, como o aumento da produtividade e a redução de desperdícios, alinhando a operação às exigências de um mercado global competitivo e sustentável (Oliveira, 2020). Assim, segundo ainda o autor, o monitoramento contínuo de variáveis térmicas permite a transição de um modelo reativo para uma gestão de ativos baseada em dados, garantindo maior confiabilidade operacional.

A manutenção prescritiva

Sob a ótica da engenharia de manutenção, as estratégias variam conforme a previsibilidade da intervenção. A manutenção corretiva é caracterizada como uma abordagem reativa, desencadeada pela ocorrência de falhas funcionais, o que frequentemente acarreta elevados custos de oportunidade e riscos à integridade operacional (Santos; Pinto, 2022).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Em uma perspectiva distinta, a manutenção preventiva baseia-se em políticas de substituição ou restauração cíclica, orientadas por cronogramas de tempo ou uso, operando de forma independente da condição de degradação real do ativo (Lafraia, 2021).

Contudo, a ascensão da Indústria 4.0 consolidou a manutenção preditiva — e, mais recentemente, a prescritiva — como o paradigma dominante. Esta se fundamenta no monitoramento de condições e na análise de dados em tempo real, permitindo que algoritmos de *machine learning* e modelos probabilísticos determinem o momento exato da intervenção, otimizando o ciclo de vida do ativo e minimizando desperdícios (International Organization for Standardization, 2024; Kardec; Nascif, 2023).

Microcontrolador ESP32

O microcontrolador ESP32 destaca-se como uma solução versátil para aplicações de *IoT*. Criado pela Espressif Systems (2026), o SoC (*System on a Chip*) integra conectividade Wi-Fi e Bluetooth *Dual-Mode*, processador de núcleo duplo e uma ampla gama de periféricos de entrada e saída.

Segundo Maier *et al.* (2023), a capacidade de processamento do ESP32 aliada ao seu baixo consumo de energia o torna ideal para sistemas de monitoramento térmico e vibração, permitindo o processamento de borda (*edge computing*) necessário para estratégias de manutenção avançadas.

Como uma evolução de seu antecessor, o ESP8266, o dispositivo oferece uma variedade expandida de recursos que o tornam uma escolha poderosa para diversas aplicações. Esse microcontrolador, por ser de baixo custo e alto desempenho, consolidou-se tanto em comunidades de desenvolvimento quanto no setor industrial, sendo capaz de atender aos requisitos de conectividade e robustez exigidos pela Indústria 4.0 (Espressif Systems, 2024).

METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos propostos, este artigo utilizou a pesquisa aplicada, que visa solucionar problemas específicos em processos produtivos, como no problema apontado envolvendo pintura industrial. Gil (2017) reforça que uma pesquisa aplicada visa justamente à busca de conhecimentos com intuito de aplicar o mesmo em uma situação específica.

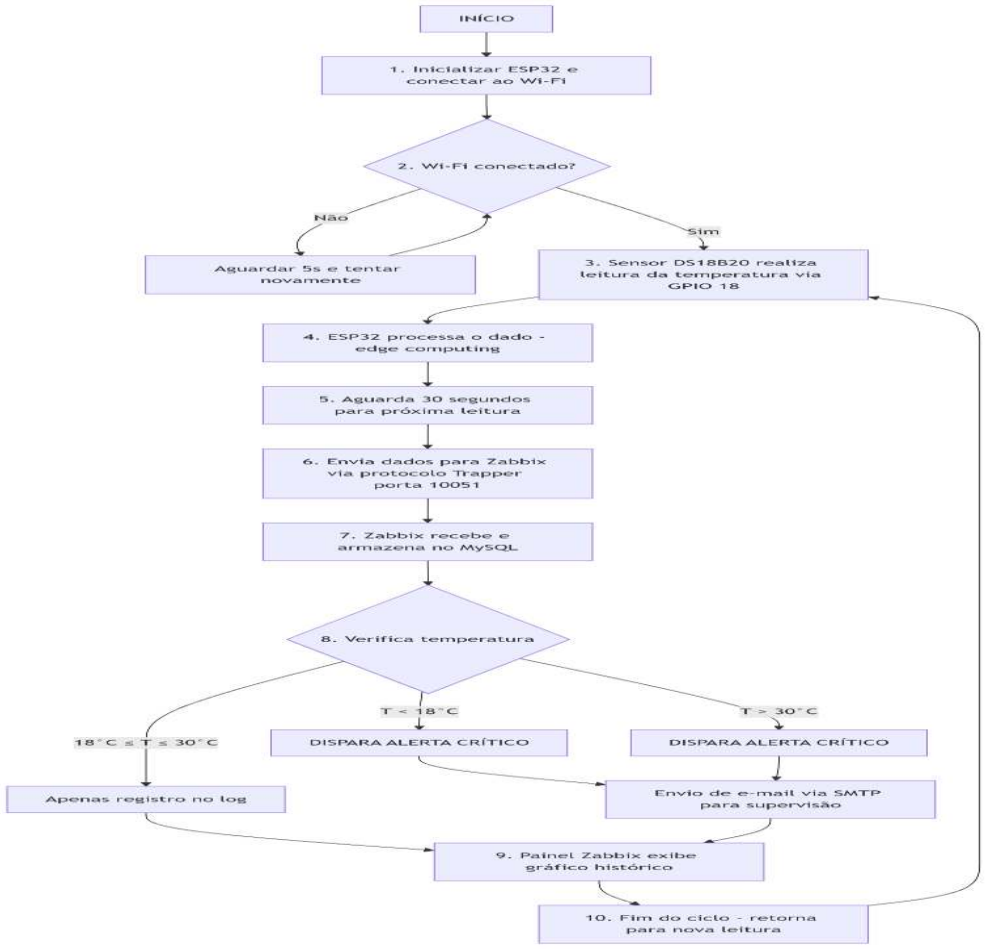
Após uma breve leitura em materiais de referência sobre o tema e em sites especializados na internet, identificou-se que os dispositivos Arduino microcontrolador ESP32 e sensor de temperatura DS18B20 seriam os mais viáveis para a realização da aplicação.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Com a seleção dos dispositivos para o protótipo definidos, definiu-se a rede Wi-Fi como meio de conectividade, o servidor Zabbix como camada de transporte e banco de dados MySQL como *backend* de processamento. O monitoramento das temperaturas ocorreu no período de janeiro de 2026 a abril de 2026, cobrindo exatamente quatro meses.

A seguir, elaborou-se o ciclo de funcionamento do sistema, esquematizado pelo fluxograma operacional do sistema constante na Figura 1. O processo inicia com a conexão do ESP32 à rede Wi-Fi, seguida pela coleta de dados térmicos via sensor DS18B20 (GPIO 18). Após o processamento local (*edge computing*), os dados são transmitidos ao servidor Zabbix via protocolo Zabbix Sender na porta 10051. O servidor realiza a verificação dos limites operacionais (18°C a 30°C), acionando alertas via SMTP em caso de anomalias, garantindo o monitoramento contínuo e a rastreabilidade via painel histórico.

Figura 1: Fluxograma do sistema microcontrolador ESP32 e no sensor DS18B20



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

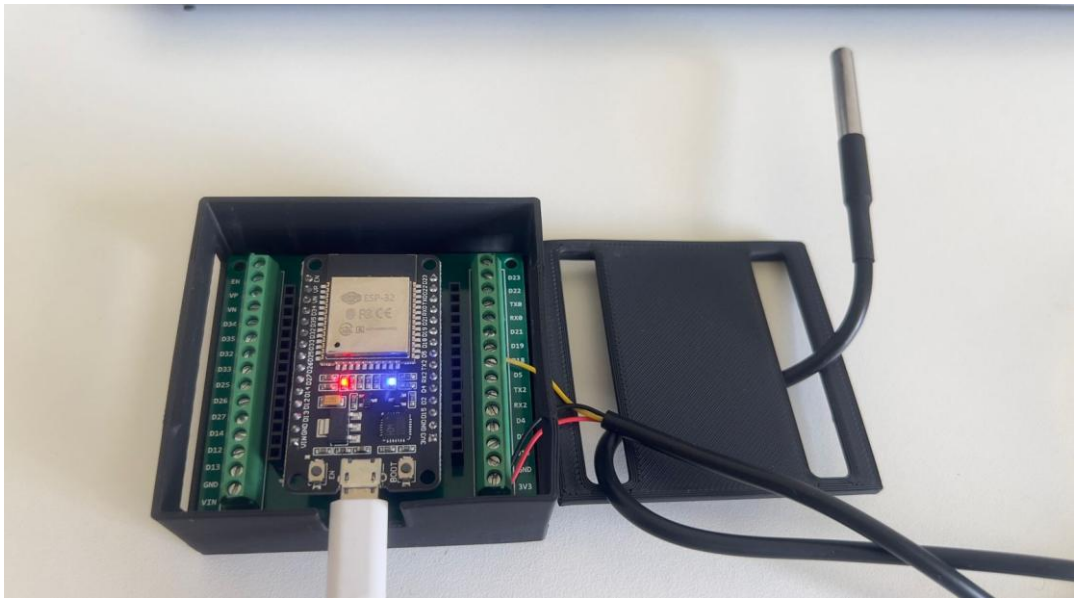
Arquitetura de *hardware*

O projeto foi desenvolvido com o microcontrolador ESP32 *(Espressif Systems)*, selecionado por seu baixo custo e elevada capacidade de processamento. O dispositivo destaca-se por ser uma solução versátil que integra conectividade Wi-Fi e Bluetooth, operando com um processador *dual-core* de até 240 MHz, 520 KB de memória RAM e 4 MB de memória *flash* interna, além de uma ampla gama de periféricos de entrada e saída. O microcontrolador é programado em linguagem C/C++ e apresenta total compatibilidade com o ambiente de desenvolvimento Arduino IDE (Victor Vision, 2020).

Neste contexto, a unidade de processamento e comunicação atua como o nó concentrador da rede de sensores (IoT). O *firmware* foi projetado para realizar a autenticação em rede Wi-Fi via SSID configurável, permitindo a integração do dispositivo à infraestrutura local. Uma vez estabelecida a conectividade, o sistema gerencia o tráfego de dados via protocolo TCP/IP para o servidor Zabbix (IP 192.168.29.68), garantindo o envio periódico das amostras coletadas via protocolo Zabbix Trapper (Zabbix Sic, 2022).

A aquisição dos dados térmicos é realizada pelo sensor digital DS18B20, conectado à interface GPIO 18 do microcontrolador. Conforme ilustrado na Figura 2, o *hardware* foi acondicionado em um invólucro protetor, utilizando uma placa de interface com bornes de parafuso. Essa estrutura visa conferir robustez mecânica às conexões elétricas, mitigando falhas decorrentes das vibrações mecânicas inerentes ao ambiente industrial de pintura.

Figura 2. Arquitetura do microcontrolador ESP32



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Camada de percepção

Esta camada representa a interface física do sistema, sendo responsável pela transdução da grandeza térmica em sinais digitais e pelo processamento preliminar desses dados na "borda" (*edge computing*). No protótipo desenvolvido, essa camada foi projetada para operar de forma autônoma e resiliente.

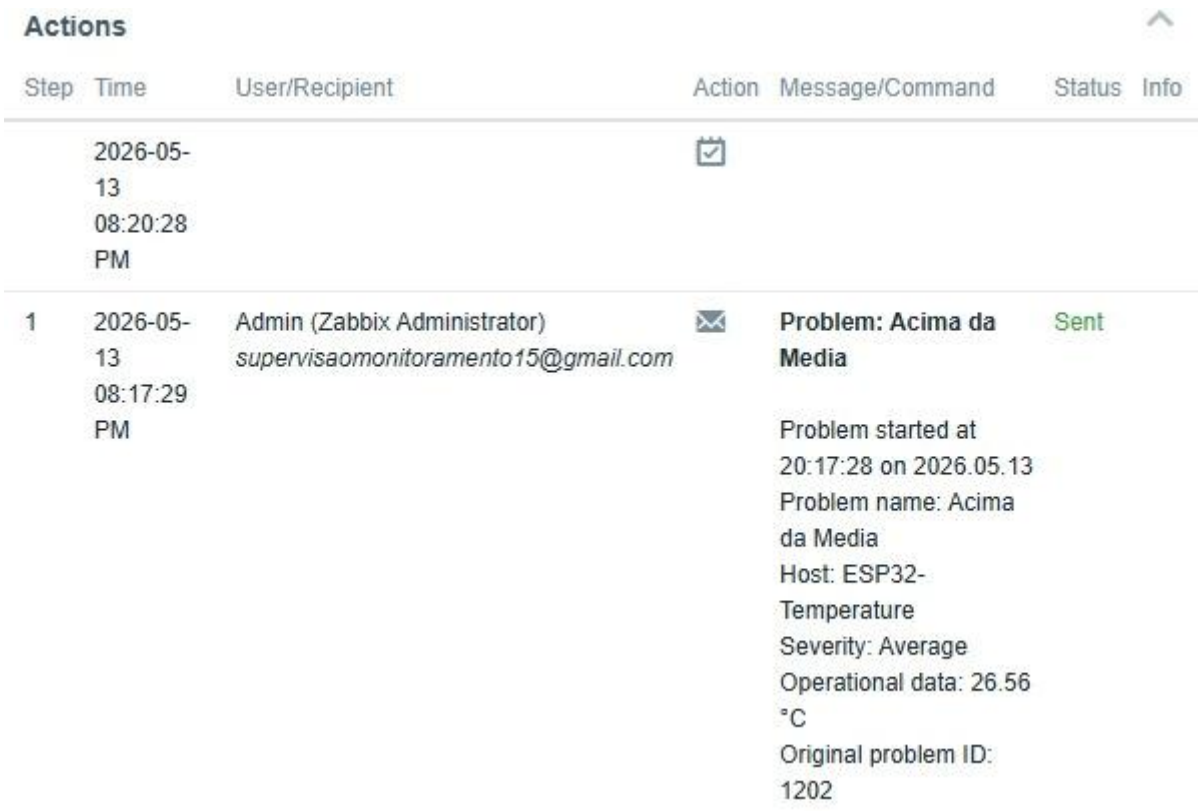
A lógica de controle foi implementada utilizando uma arquitetura não-bloqueante baseada na função millis(). Essa abordagem permite que o microcontrolador mantenha a estabilidade da pilha de rede e da conexão Wi-Fi enquanto processa as leituras do sensor em intervalos definidos. Conforme estabelecido no fluxo operacional, o sistema realiza a aquisição dos dados e o *upload* para o servidor Zabbix de forma periódica, garantindo a continuidade do monitoramento sem interrupções no processamento local.

O DS18B20 é um sensor digital nativo no padrão 1-wire, o que dispensa a necessidade de conversão analógico-digital externa e minimiza ruídos de leitura. Uma vez estabelecida a conectividade, o sistema gerencia o tráfego de dados para o servidor Zabbix (IP 192.168.29.68) via protocolo Zabbix Trapper, assegurando a integridade das informações de monitoramento industrial.

O sistema foi configurado para que, ao identificar anomalias térmicas — desvios fora da faixa operacional de 18°C a 30°C —, o servidor dispare automaticamente um alerta para o e-mail supervisaomonitoramento15@gmail.com. Para isso, houve a configuração da *action* (ação) com o protocolo SMTP dentro do Zabbix (Figura 3), de forma que a mensagem chegue ao destinatário.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 3. Tela de configuração da *action* com o protocolo SMTP no Zabbix



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Protocolo de comunicação (*Transport Layer*)

A camada de transporte constitui o núcleo da arquitetura de comunicação, sendo responsável por estabelecer a ponte confiável entre os dispositivos de campo e o servidor de monitoramento. Optou-se pela implementação direta do Zabbix Sender Protocol, operando sobre TCP/IP na porta 10051, visando reduzir a sobrecarga de cabeçalhos (*overhead*) e assegurar maior previsibilidade temporal na transmissão (Zabbix Sic, 2022).

O protocolo estabelece um formato de quadro binário para o envio de dados no modo *trapper* (*push*), composto pelos campos: *Header* (5 *bytes*), *Data Length* (8 *bytes*) e *Payload* em JSON (variável), conforme detalhado no Quadro 1.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Quadro 1. Quadro binário de dados (Zabbix Sender Protocol) implementado no *firmware* do ESP32

Header (5 *bytes*)	Data Length (8 *bytes*)	JSON Payload (Tamanho Variável)
ZBXD\x01	Comprimento em Little-Endian	*{"request":"sender data","data":[...]}*
Identificação do Protocolo	Tamanho do JSON que virá a seguir	Dados de telemetria e metadados do *host*

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Os cinco primeiros *bytes* do quadro formam a marca de identificação do protocolo, representada pela sequência literal ZBXD\x01. Essa marca possibilita ao servidor Zabbix reconhecer de imediato o tipo de solicitação recebida, diferenciando-a de outras comunicações que ocorram na mesma porta. O sufixo \x01 sinaliza a versão do protocolo em uso.

O comprimento do *payload* JSON é armazenado sob a codificação *Little-Endian*, garantindo compatibilidade com arquiteturas x86 e ARM e mitigando a latência de conversão de *endianness*. A definição formal do tamanho do *payload* (L_p) é dada pela Equação 1:

$$L_p = \sum i = \sum_{i=0}^{7} b_i * 256^i \quad (1)$$

Em que b_i corresponde ao i-ésimo byte do campo Data Length, com i=0 designando o byte menos significativo. O payload consiste em um objeto JSON estruturado conforme o Código 1, feito em JSON:

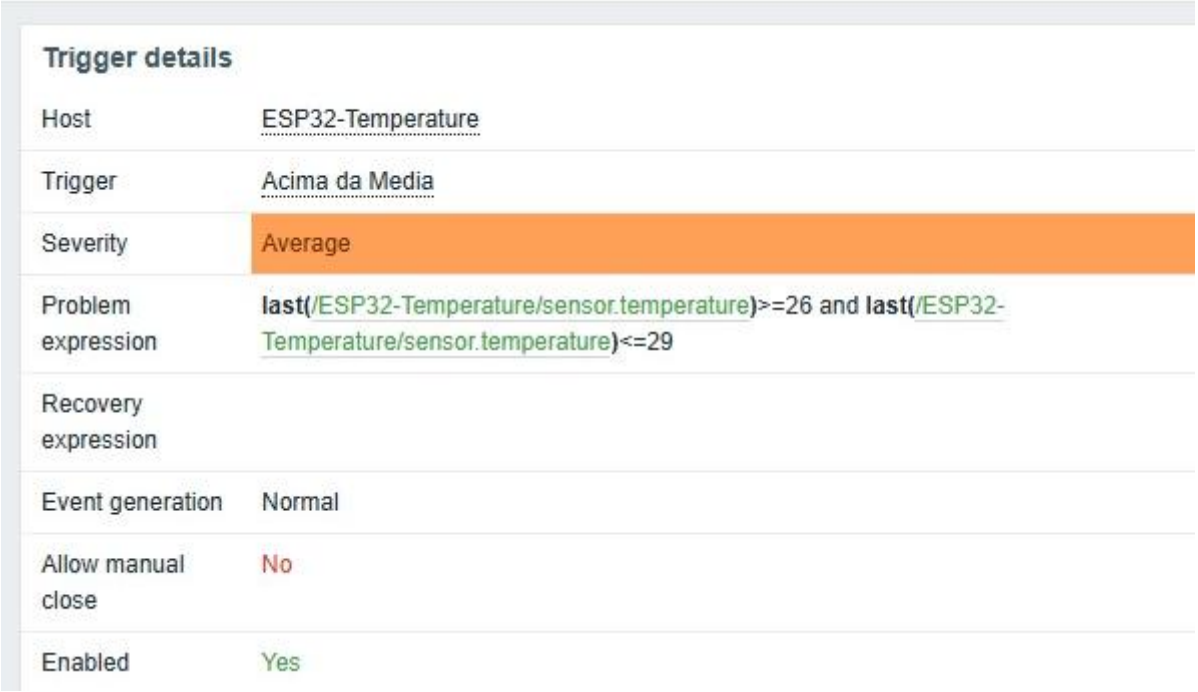
```
json
{
  "request": "sender data",
  "data": [
    {
      "host": "ESP32_PINTURA_01",
      "key": "temp_tinta",
      "value": "25.5"
    }
  ]
}
```

A seguir, foram montadas as configurações da Trigger de monitoramento do protótipo. A Figura 4 apresenta uma tela do Zabbix com os detalhes de um evento (*Event Details*). Para cada evento, foi configurada a interface de *Host* (ESP32-Temperature), o microcontrolador em

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

questão, o tipo de *Trigger*, *Severity* (nível de gravidade) com a respectiva cor (normal – verde, *average* – laranja, *problem* – vermelho), *Problem Expression* (parâmetros lógicos de ativação), *Event Generation* (tipo de problema que o sistema gera quando a expressão for verdadeira), Allow manual close (não foram permitidos encerramentos manuais dos alertas) e *Enabled* informa se o evento está ativa (*Yes* – sim, *No* – não).

Figura 4. *Dashboard* configurações da *Trigger* (*Event Details*) de monitoramento de sensor DS18B20 no servidor Zabbix



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

PROCESSAMENTO

O *backend* utiliza um servidor Zabbix integrado a um banco de dados MySQL, responsável pelo armazenamento histórico das séries temporais. A configuração de itens do tipo Zabbix Trapper permite a recepção passiva de dados, eliminando a necessidade de o servidor interrogar o sensor (*polling*), o que reduz significativamente o tráfego na rede industrial e a carga de processamento.

No servidor, os dados são processados por funções de gatilho (*triggers*) baseadas em limites operacionais térmicos. O sistema utiliza o protocolo SMTP com autenticação TLS para integração com o *gateway* de e-mail do Google (Gmail), permitindo a entrega de alertas

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

personalizados com suporte a caracteres Unicode (emojis), visando a rápida identificação visual por parte dos operadores.

O sistema foi calibrado para identificar o "Cenário Ideal" no intervalo de 20 °C a 25 °C, com limiares críticos para disparo de alarmes em temperaturas superiores a 30 °C ou inferiores a 18 °C, conforme detalhado no Quadro 2.

Quadro 2. Limiares Operacionais e Ações do Sistema de Monitoramento

Condição	Faixa de Temperatura (ºC)	Status do Sistema	Ação de Notificação
Crítico (Frio)	T<18	Alarme (Severo)	Alerta SMTP (E-mail)
Cenário Ideal	20≤T≤25	Normal	Apenas Registro (Log)
Atenção	25<T≤30	Alerta	Monitoramento Intensivo
Crítico (Calor)	T>30	Alarme (Severo)	Alerta SMTP (E-mail)

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são analisados os resultados obtidos a partir da implementação do protótipo. A discussão aborda o desempenho em condições operacionais, a eficácia dos alertas e a estabilidade do *backend*. Os dados coletados validam a viabilidade da solução e apontam caminhos para otimizações futuras.

Análise do monitoramento pelo sistema

A Figura 5 apresenta o painel de monitoramento com a evolução temporal da temperatura e das Zonas de Gatilhos Térmicos (*Triggers*). As linhas horizontais sobrepostas ao gráfico representam os limites críticos operacionais (18°C a 30°C), que foram criados conforme visto na Figura 4. Esses limiares delimitam, visualmente para o operador, a zona de normalidade e acionam alertas automáticos em caso de desvios, permitindo a identificação padrões anormais. Para cada alerta identificado, o Zabbix envia outro alerta para o email cadastrado, conforme Figura 3.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

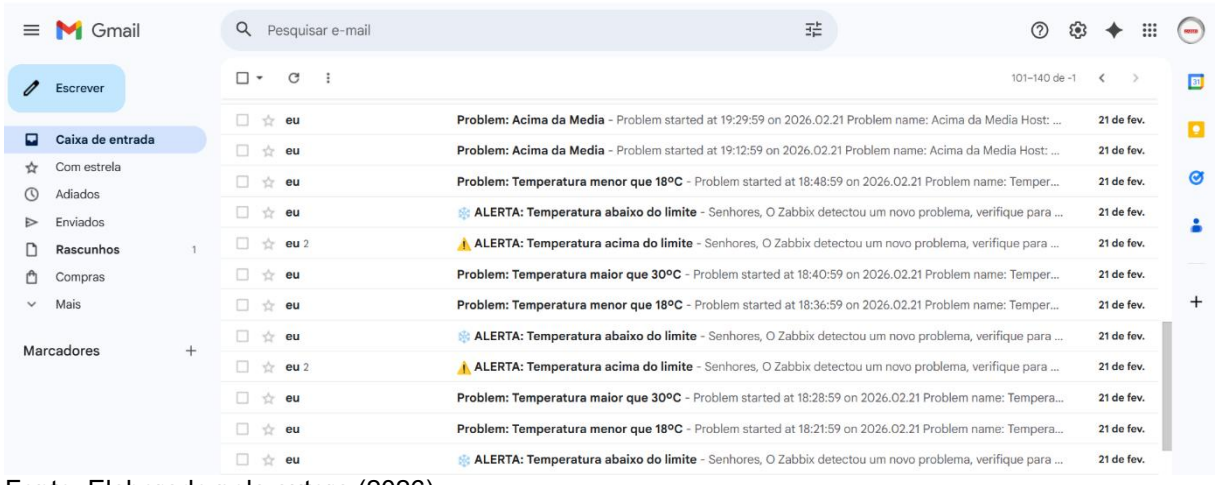
Figura 5. Painel de Monitoramento Histórico e Zonas de Gatilhos Térmicos (*Triggers*)



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Quando os alertas são disparados pelo sensor DS18B20, o servidor Zabbix automaticamente envia-os para o e-mail cadastrado, conforme o problema identificado (Figura 6).

Figura 6. Interface de alertas recebidos via protocolo SMTP no Gmail de Supervisão



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Conforme conceitos de Santos e Pinto (2022), as interfaces vistas nas Figuras 6 atuam como base para a manutenção prescritiva, enviando alertas detalhados à supervisão para guiar

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

ações corretivas imediatas. A abordagem mitigaria riscos de desvios térmicos e assegura a continuidade da linha de pintura, prevenindo paradas não planejadas e perdas materiais.

Dentro do Zabbix (Figura 7), o operador tem acesso a lista de *Event list* (Lista de Eventos), com o histórico de eventos do protótipo monitorado contendo *Time* (Hora de Início), *Recovery time* (Hora de Recuperação), *Status*, Age (Idade do evento), *Duration* (Duração) e *Actions* (Ações).

Figura 7. *Event list* do Zabbix

Event list [previous 20]

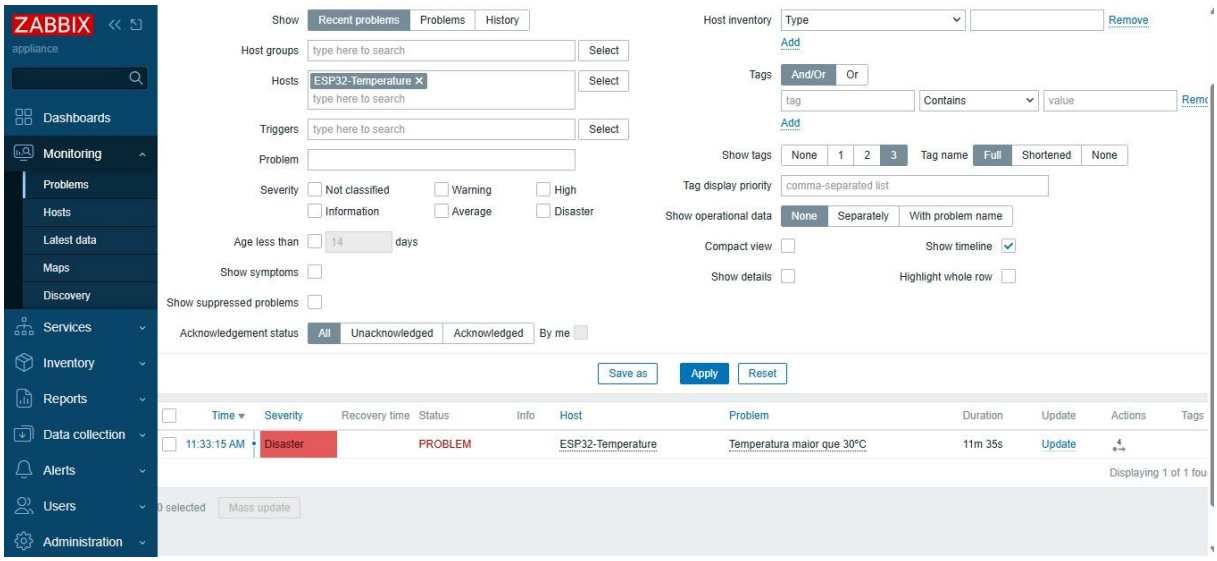
Time	Recovery time	Status	Age	Duration	Update	Actions
2026-05-13 08:17:28 PM	2026-05-13 08:20:28 PM	RESOLVED	17m 20s	3m	Update	1
2026-05-08 03:05:14 PM	2026-05-09 03:19:15 AM	RESOLVED	5d 5h 29m	12h 14m 1s	Update	1
2026-05-08 02:16:14 PM	2026-05-08 03:04:33 PM	RESOLVED	5d 6h 18m	48m 19s	Update	1
2026-05-08 11:57:15 AM	2026-05-08 11:59:15 AM	RESOLVED	5d 8h 37m	2m	Update	1
2026-05-08 11:47:15 AM	2026-05-08 11:51:15 AM	RESOLVED	5d 8h 47m	4m	Update	1
2026-05-08 11:18:15 AM	2026-05-08 11:33:15 AM	RESOLVED	5d 9h 16m	15m	Update	1
2026-03-08 06:43:26 PM	2026-03-08 09:48:40 PM	RESOLVED	2M 6d 1h	3h 5m 14s	Update	1
2026-03-08 06:23:56 PM	2026-03-08 06:27:11 PM	RESOLVED	2M 6d 2h	3m 15s	Update	1
2026-03-08 06:13:06 PM	2026-03-08 06:15:31 PM	RESOLVED	2M 6d 2h	2m 25s	Update	1
2026-03-08 06:09:27 AM	2026-03-08 06:00:06 PM	RESOLVED	2M 6d 14h	11h 50m 39s	Update	1

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A Figura 8 exemplifica um caso de evento de temperatura acima de 30ºC, por meio do *dashboard* de alerta emitido pelo sensor DS18B20 ao servidor Zabbix, com informações sobre hora, o status, o host, o problema e a duração do evento. Importante notar que o item *Severity* está destacado de vermelho.

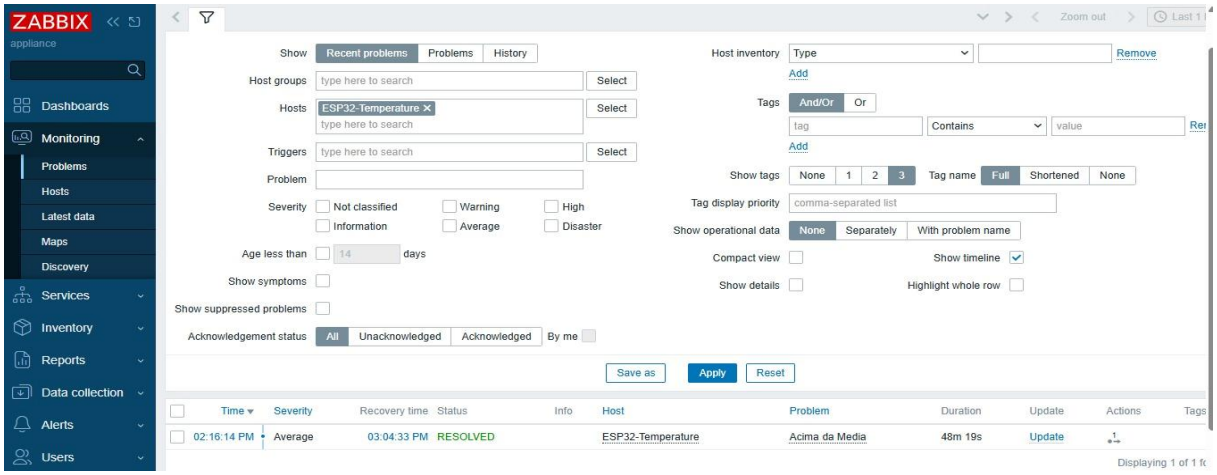
Figura 8. *Dashboard* de alerta de problema emitido pelo sensor DS18B20 ao servidor Zabbix



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

A Figura 9 mostra outro *dashboard* de alerta ao operador do sistema Zabbix, demonstrando como seria a informação de que o problema causador do alerta foi resolvido (*Resolved*).

Figura 9. *Dashboard* de problema resolvido emitido pelo sensor DS18B20 ao servidor Zabbix

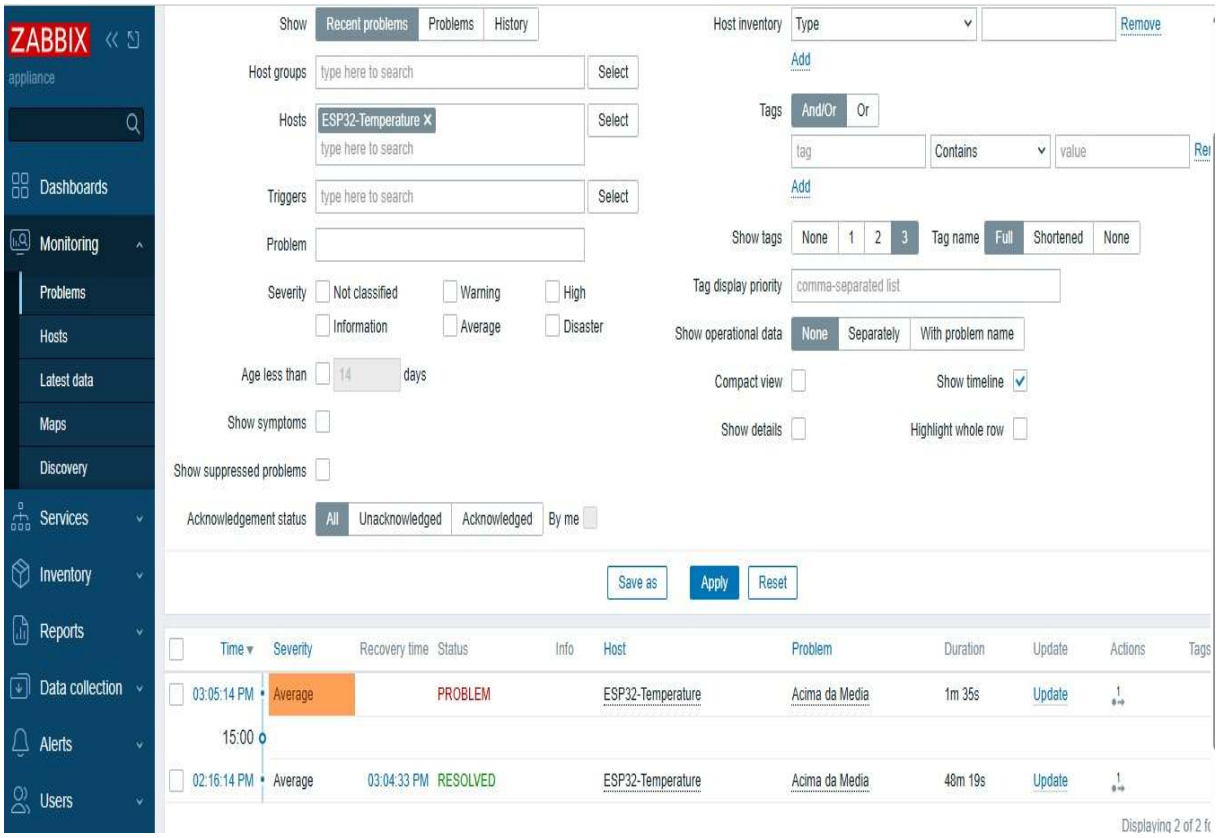


Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Na Figura 10 é possível verificar que o operador também tem à disposição todo o registro do alerta específico selecionado, informando o início e o término do problema, além dos dados necessários para descrever o ocorrido.

Figura 10. *Dashboard* com histórico do alerta relativo ao evento específico salvo no servidor Zabbix



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Soares *et al.* (2024) utilizou em seu projeto o monitoramento por meio de alarmes e também status operacional, concordando que o operador do sistema seria capaz de acompanhar à distância o estado do sistema.

Os *Dashboard* de monitoramento mostraram a compatibilidade no uso do Arduino e do microcontrolador ESP32. Babiuch, Foltýnek e Smutný (2019) já haviam confirmado que tais plataformas serviriam para verificação rápida de um projeto da aplicação.

Conforme Tabela 1, ao todo, foram registrados 11 eventos de alarme no período (considerando cada disparo individual de gatilho). Os alarmes de temperatura acima do ideal (Calor Crítico) foram acionados oito vezes. Estes alarmes ocorrem quando a temperatura excede

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

os limites de segurança para a pintura. Já do lado dos alarmes de temperatura abaixo do ideal (Frio Crítico), onde foram identificados momentos em que a temperatura estava baixa demais para a aplicação correta da tinta, com três alarmes.

Tabela 1. Total de alarmes acionados pelo sensor DS18B20 e enviados ao servidor Zabbix

Mês	Abaixo da Temperatura (Frio)	Acima da Temperatura (Calor)	Total de Alarmes
Janeiro	3	0	3
Fevereiro	0	1	1
Março	0	1	1
Abril	0	6	6
Total Geral	**3**	**8**	**11**

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Como visto na Tabela 1, no mês de abril houve maior predominância de "Calor Crítico", com 6 alarmes ativados. Pelo lado do "Frio Crítico", os três alarmes se concentram no mês de janeiro, o que em termos de confiabilidade poderiam indicar possíveis falhas, provocando a atenção da equipe de manutenção. Com base nesses dados, Lafraia (2021) diz que a confiabilidade de um sistema produtivo poderá ser abalada por falhas prematuras, como processos de fabricação e controle de qualidade deficientes.

ANÁLISE DA RESILIÊNCIA DA CONEXÃO E DIAGNÓSTICO

A implementação de uma máquina de estados no *firmware* do ESP32 permitiu que o sistema gerisse falhas de conectividade de forma resiliente. Diferente de implementações lineares simples, esta arquitetura evitou o travamento do processamento local durante tentativas de reconexão ao Wi-Fi ou falhas de *handshake* com o servidor.

Durante os testes de validação de dados, foi verificada uma grande fidelidade grande na integridade dos dados. Durante inspeções controladas, leituras locais de 23,5°C realizadas pelo sensor DS18B20 se mostraram idênticas ao banco de dados MySQL do Zabbix, com latência de rede inferior a 500 ms. Esse nível de precisão elimina as margens de erro existentes nas coletas manuais, garantindo que a supervisão à distância atue sobre dados reais de campo.

Complementarmente, o uso de um LED (*Light Emitting Diode*) de *status* como interface de diagnóstico por *hardware* demonstrou-se fundamental para o ambiente industrial. Essa solução permitiu que a equipe técnica identificasse instantaneamente erros de autenticação ou queda de sinal sem a necessidade de equipamentos externos de depuração, agilizando a manutenção de campo.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Com base nesses testes de validação, conforme International Organization for Standardization (2024), o protótipo se mostrou coerente com os preceitos da manutenção prescritiva, sendo possível monitorar o processo de pintura industrial com o uso de princípios da indústria 4.0.

OTIMIZAÇÃO DO FLUXO DE DADOS E BANCO DE DADOS

A adoção do protocolo nativo resultou em uma redução significativa no *overhead* de rede, permitindo uma transmissão de dados leve e previsível. No banco de dados MySQL, a ingestão contínua das séries temporais possibilitou a aplicação de funções de análise de tendências (*forecast*), essenciais para o monitoramento de longo prazo.

Para garantir um nível mínimo de manutenção preditiva, configuraram-se *triggers* estatísticas que monitoram a média móvel de 15 minutos. O disparo de alertas fundamentado em desvios superiores a dois desvios-padrão da média histórica permitiu identificar tendências de aquecimento antes mesmo que os limites críticos fossem atingidos.

Essa antecipação é o que caracteriza a transição para a manutenção prescritiva, pois oferece aos gestores um tempo de resposta superior para intervir no processo de pintura, garantindo que a qualidade do acabamento não seja comprometida por oscilações térmicas imprevistas.

Em seu protótipo, Soares *et al.* (2024) os avanços nas inspeções de qualidade com emprego de tecnologias da Indústria 4.0, como o uso de *Dashboards* ligados a um banco de dados com métricas de fácil visualização por parte do operador.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A implementação da arquitetura baseada em IoT e Zabbix demonstrou ser uma solução disruptiva e de baixo custo para os gargalos do monitoramento térmico na pintura automotiva. O estudo cumpriu seu objetivo principal ao validar que a integração entre o microcontrolador ESP32 e o protocolo Zabbix Trapper permite uma supervisão digital estável, com latência inferior a 500 ms e alta fidelidade de dados.

Os resultados experimentais obtidos entre janeiro e abril de 2026 foram determinantes para comprovar a eficácia do sistema. A detecção automatizada de 11 eventos críticos de temperatura permitiu uma resposta imediata que, em um cenário de produção real, evitaria o retrabalho de peças e o desperdício de insumos químicos. Além disso, a viabilidade econômica

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

foi confirmada: a solução proposta apresentou um custo de implementação significativamente inferior (aproximadamente 94% menor) em relação aos sistemas industriais baseados em CLPs proprietários, conforme Tabela 2.

Tabela 2. Viabilidade econômica do protótipo

Item de Custo	Sistema Industrial (CLP + Licença)	Protótipo IoT (ESP32 + Zabbix)
Hardware	R$ 1.500,00 (CLP de entrada + sensor)	R$ 85,00 (ESP32 + DS18B20)
Software	R$ 2.000,00 (Licença de supervisório)	R$ 0,00 (Zabbix Open Source)
Instalação	R$ 800,00 (Mão de obra especializada)	R$ 150,00 (Montagem simplificada)
TOTAL	**R$ 4.300,00**	**R$ 235,00 |**

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

A economia de 94% foi apurada por meio de comparativo de viabilidade econômica entre o custo de mercado de sistemas industriais convencionais e os custos reais dos materiais utilizados no protótipo.

Essa economia de aproximadamente 94% é o que permite que sua solução seja aplicada tanto em grandes linhas de produção quanto em pequenas oficinas.

Conclui-se que o projeto não apenas automatiza a coleta de dados, mas viabiliza a transição da manutenção preventiva para a manutenção prescritiva. O sistema deixa de ser um mero observador para se tornar um agente de decisão, enviando notificações via SMTP que orientam a supervisão antes que a patologia de pintura ocorra.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a expansão da rede de sensores para o monitoramento da umidade relativa do ar e a implementação de algoritmos de inteligência artificial no banco de dados MySQL, visando a predição de falhas com base na sazonalidade climática. Por fim, o projeto demonstra que a democratização da Indústria 4.0 é tecnicamente possível, beneficiando desde grandes montadoras até pequenas oficinas especializadas.

REFERÊNCIAS

BABIUCH, Marek; FOLTÝNEK, Petr; SMUTNÝ, Pavel. Using the ESP32 Microcontroller for Data Processing. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATICS IN CONTROL, AUTOMATION AND ROBOTICS, 2019, Krakow-Wieliczka. **Proceedings [...]**. Piscataway: IEEE, 2019. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8765944. Acesso em: 5 jan. 2026.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

BASTOS, Renata C.; SILVA, Mauro T. Manutenção industrial e a importância da gestão de ativos críticos. **Revista Produção Online**, v. 22, n. 3, p. 988-1005, 2022.

ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32-P4 High-performance SoC**. Shanghai, 2024. Disponível em: https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32-p4. Acesso em: 5 jan. 2026.

GIL, Antônio C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. Design principles for industrie 4.0 scenarios. In: HAWAII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCES, 49., 2016, Hawaii. **Proceedings [...]**. Piscataway: IEEE, 2016. p. 3928-3937.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 55001:2024: Asset management — Management systems — Requirements**. Genebra: ISO, 2024.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção: Função Estratégica**. 7. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2023.

LAFRAIA, J. B. R. **Manual de Confiabilidade, Mantenabilidade e Disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2021.

LI, G.; HOU, Y.; WU, A. Fourth Industrial Revolution: technological drivers, impacts and coping methods. **Chinese Geographical Science**, v. 27, n. 4, p. 626-637, ago. 2017.

OLIVEIRA, A. L. Por que implantar sistemas ciber-físicos na sua empresa. **[S. l.]**: CERTI, 9 jul. 2020. Disponível em: https://certi.org.br/blog/sistemas-ciber-fisicos. Acesso em: 5 jan. 2026.

SANTOS, Afonso; PINTO, Alan. **Gestão de Manutenção e Ativos: do tático ao estratégico**. São Paulo: Blucher, 2022.

SILVA, L. H. B. D. *et al.* Gerenciamento de dispositivos IoT em ambientes industriais: mapeamento sistemático da literatura. **Revista Principia**, v. 61, n. 3, p. 624, 2024.

SOARES, K. K. S. *et al.* Aplicação de Tecnologias de Inteligência Artificial e IoT na Modernização da Inspeção. **ARACÊ**, v. 6, n. 4, 2024.

VICTOR VISION. **Placa ESP32: O que é, para que serve e muito mais!**. [S. l.], 2020. Disponível em: https://victorvision.com.br/blog/placa-esp32/#2. Acesso em: 5 jan. 2026.

ZABBIX SIC. **Zabbix Manual 6.0: Protocols**. [S. l.], 2022. Disponível em: https://www.zabbix.com/documentation/6.0/en/manual/appendix/protocols. Acesso em: 5 jan. 2026.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.