

Ano VII, v.1 2026 | submissão: 26/05/2026 | aceito: 29/05/2026 | publicação: 01/06/2026

## **Desenvolvimento de um sistema iot para monitoramento ambiental em linhas SMT com ESP32**

*Development of an IoT system for Environmental Monitoring in SMT Lines with ESP32*

*Desarrollo de un sistema IoT para la monitorización ambiental en líneas SMT con ESP32*

**Francisco Moreira Costa<sup>1</sup>,**  
**Mário Sérgio Cavalcante<sup>2</sup>**

Fundação Centro de Análise Pesquisa e Inovação Tecnológica (FUCAPI) Caixa Postal 15.064  
– 91.501-970 – Manaus – AM – Brasil

francisco.moreira009@gmail.com

marioffcavalcante@gmail.com

**Abstract.** *Controlling environmental conditions in SMT (Surface Mount Technology) Production lines are essential to ensure the quality and reliability of electronic products. Variables such as temperature and humidity directly affect critical processes and may lead to defects, including poor soldering, oxidation, and functional failures. This paper presents the development of an environmental monitoring and control system based on the Internet of Things (IoT), using the ESP32 SoC (System on a Chip) and the DHT22 digital sensor to measure temperature and humidity. The system continuously collects data and transmits it through a broker to a server responsible for real-time visualization. Additionally, alert mechanisms were implemented to indicate conditions outside predefined thresholds. The results demonstrate that the proposed solution improves process reliability by enabling preventive actions and reducing failures related to environmental conditions.*

**Resumo.** *O controle das condições ambientais em linhas de produção SMT (Surface Mount Technology) É essencial para garantir a qualidade e confiabilidade dos produtos eletrônicos. Variáveis como temperatura e umidade influenciam diretamente processos críticos, podendo resultar em defeitos de soldagem, oxidação e falhas funcionais. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de monitoramento e controle ambiental baseado na Internet das Coisas (IoT), utilizando o SoC ESP32 (System-on-Chip) e o sensor digital DHT22 para a aquisição de dados de temperatura e de umidade relativa. O sistema realiza a coleta contínua de dados e os envia, por meio de um broker, a um servidor responsável pela visualização em tempo real. Além disso, foram implementados mecanismos de alerta para indicar condições fora dos parâmetros estabelecidos. Os resultados demonstram que a solução proposta contribui para o aumento da confiabilidade do processo produtivo, permitindo ações preventivas e Reduzindo a ocorrência de falhas decorrentes de condições ambientais.*

### **1. Introdução**

Com a crescente utilização de sistemas embarcados na indústria e a maior disseminação do conceito de Internet das Coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*) no contexto da Indústria 4.0, soluções baseadas em dispositivos conectados vêm ganhando destaque em aplicações de monitoramento e automação. O conceito de IoT refere-se à interconexão de dispositivos capazes de coletar e trocar dados pela internet, possibilitando novas aplicações em diversos setores, incluindo o industrial (ROSE; ELDRIDGE; CHAPIN, 2015; ATZORI; IERA;

Ano VII, v.1 2026 | **submissão: 26/05/2026** | **aceito: 29/05/2026** | **publicação: 01/06/2026**

MORABITO, 2010).

Nesse cenário, o ESP32 tem se consolidado como uma alternativa versátil, sendo amplamente utilizado tanto em implementações simples quanto em sistemas mais complexos. Sua facilidade de uso, natureza *open-source*, conectividade integrada via Wi-Fi e Bluetooth, além do baixo custo, tornam o dispositivo uma escolha recorrente em projetos de IoT.

A versatilidade do ESP32 também se deve à sua capacidade de integração com diferentes tipos de sensores, suportada por um conjunto robusto de recursos de hardware, como múltiplas interfaces de comunicação (I2C, SPI e UART), conversores analógico-digitais (ADCs) e um número significativo de GPIOs. Essas características permitem a aquisição contínua de dados, mantendo simultaneamente uma conexão de rede estável. A conectividade sem fio nativa elimina a necessidade de módulos externos, reduzindo a complexidade e o custo da solução.

Tais características tornam o ESP32 especialmente adequado para aplicações de monitoramento ambiental em cenários de baixa demanda de dados, nos quais o volume de informações transmitidas é reduzido, como na leitura periódica de sensores de temperatura e umidade. Na comunicação de dados, protocolos leves como o MQTT são amplamente utilizados em aplicações IoT, permitindo a troca eficiente de mensagens por meio de um modelo *publish/subscribe* (LIGHT, 2017).

No contexto da fabricação de placas eletrônicas por meio da tecnologia SMT (*Surface Mount Technology*), o controle das condições ambientais é um fator crítico para garantir a qualidade do processo produtivo. Variáveis como temperatura e umidade influenciam diretamente etapas como a aplicação de pasta de solda e o processo de refusão, podendo ocasionar defeitos como solda fria, oxidação e falhas funcionais quando estão fora dos parâmetros ideais (LEA, 1997).

Diante desse cenário, a ausência de monitoramento contínuo ou a dependência de medições manuais pode comprometer a confiabilidade do processo, dificultando a identificação de desvios em tempo hábil. Assim, torna-se relevante o desenvolvimento de soluções automatizadas que permitam o acompanhamento em tempo real das condições ambientais.

Neste contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de temperatura e umidade baseado em IoT, utilizando o ESP32, sensores ambientais, comunicação via um broker e armazenamento em um banco de dados. O sistema permite a visualização em tempo real das variáveis monitoradas, além da geração de alertas em caso de valores fora dos limites estabelecidos, o que contribui para a melhoria da confiabilidade e da rastreabilidade no ambiente produtivo.

Ano VII, v.1 2026 | **submissão: 26/05/2026** | **aceito: 29/05/2026** | **publicação: 01/06/2026**

## **2. Fundamentação teórica**

### **2.1. Indústria 4.0 e IoT**

A Internet das Coisas (IoT) representa um paradigma tecnológico baseado na interconexão de dispositivos físicos capazes de coletar, processar e transmitir dados pela internet. Esses dispositivos geralmente são equipados com sensores, atuadores e recursos de comunicação, o que possibilita a integração com sistemas computacionais e a automação de processos.

De acordo com Luigi Atzori, Antonio Iera e Giacomo Morabito (2010), a IoT pode ser compreendida sob três perspectivas principais: orientada à internet, orientada aos objetos e orientada à semântica. No contexto industrial, esse conceito evoluiu para o chamado Industrial Internet of Things (IIoT), caracterizado pela aplicação de dispositivos conectados em ambientes produtivos com foco no monitoramento, controle e otimização de processos operacionais.

No cenário da Indústria 4.0, sistemas baseados em IoT permitem o monitoramento contínuo de variáveis operacionais, a coleta de dados em tempo real e a tomada de decisões com base em informações mais precisas e confiáveis. Entre suas principais aplicações destacam-se a manutenção preditiva, a rastreabilidade produtiva e o monitoramento ambiental, contexto no qual este trabalho está inserido.

A arquitetura básica de sistemas IoT é geralmente composta por três camadas principais:

- camada de percepção, responsável pela coleta de dados por meio de sensores e dispositivos físicos;
- camada de rede, responsável pela transmissão das informações coletadas;
- camada de aplicação, responsável pelo armazenamento, processamento e Visualização dos dados.

O sistema proposto neste trabalho se enquadra nessa arquitetura ao utilizar sensores para a coleta de dados ambientais, uma rede Wi-Fi para a transmissão de informações e uma aplicação web para o monitoramento em tempo real.

### **2.2 Sistemas Embarcados Aplicados ao Monitoramento**

Sistemas embarcados são sistemas computacionais dedicados a executar funções específicas em dispositivos maiores. Diferentemente dos computadores de propósito geral, possuem recursos limitados e são projetados para operar em contextos isolados (MARWEDEL, 2021).

O ESP32 é um SOC amplamente utilizado em aplicações IoT devido às seguintes

Ano VII, v.1 2026 | **submissão: 26/05/2026** | **aceito: 29/05/2026** | **publicação: 01/06/2026**

características:

- Módulo de conexão Wi-Fi/Bluetooth integrado;
- baixo consumo energético;
- múltiplas interfaces de comunicação;
- baixo custo de implementação.

Desenvolvido pela Espressif Systems, o ESP32 possui arquitetura dual-core de 32 bits, GPIOs configuráveis e suporte para protocolos de comunicação amplamente utilizados em projetos de automação, tais como UART (Universal Asynchronous

Receiver-Transmitter, utilizada na comunicação serial com computadores e outros microcontroladores; SPI (Serial Peripheral Interface), comumente utilizada na comunicação com displays e módulos de armazenamento; e I2C (Inter-Integrated Circuit), amplamente utilizada na integração com sensores e periféricos. O dispositivo também conta com conversores analógico-digitais (ADC), permitindo a leitura de sensores analógicos, tornando-o adequado para aplicações de aquisição de dados e monitoramento remoto (ESPRESSIF SYSTEMS, 2023).

Sua aplicação em sistemas de monitoramento ambiental é recorrente devido à facilidade de integração com sensores e capacidade de comunicação em tempo real

### 2.1.3 Sensores de Temperatura e Umidade

Sensores são dispositivos responsáveis por detectar grandezas físicas do ambiente e convertê-las em sinais interpretáveis por sistemas computacionais. Em aplicações de monitoramento ambiental, sensores de temperatura e umidade são amplamente utilizados para controle de variáveis que impactam diretamente processos industriais (FRADEN, 2016).

Neste trabalho, utilizou-se o sensor digital DHT22, também comercializado como AM2302, responsável pela medição da temperatura ambiente e da umidade relativa do ar. O sensor opera por meio da combinação de dois elementos principais: um sensor capacitivo para medição de umidade e um termistor para medição de temperatura. Os dados coletados são processados internamente por um microcontrolador embarcado no próprio dispositivo, que realiza a calibração dos sinais e envia os valores ao sistema externo por meio de comunicação digital de fio único (single-wire communication) (AOSONG ELECTRONICS, 2023).

De acordo com o datasheet do fabricante Aosong Eletronics, o DHT22 possui faixa de medição de temperatura entre -40 °C e 80 °C, com precisão de  $\pm 0,5$  °C, e faixa de medição de umidade entre 0% e 100%.

**Ano VII, v.1 2026 | submissão: 26/05/2026 | aceito: 29/05/2026 | publicação: 01/06/2026**

A comunicação digital do sensor reduz interferências comuns em sensores analógicos, aumentando a confiabilidade da coleta de dados em aplicações de monitoramento contínuo. Além disso, seu baixo custo, facilidade de integração com sistemas externos e precisão adequada tornam o DHT22 uma alternativa viável para aplicações industriais de monitoramento ambiental de baixa complexidade.

No sistema desenvolvido neste trabalho, o sensor é responsável pela coleta contínua de dados ambientais, enviando as informações ao ESP32 para posterior transmissão ao servidor de monitoramento.

#### **2.4 Protocolo MQTT na Comunicação IoT**

O MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) é um protocolo leve de comunicação desenvolvido para dispositivos com recursos computacionais limitados e redes com baixa largura de banda, sendo amplamente utilizado em aplicações de IoT. O protocolo foi criado por Andy Stanford-Clark e Arlen Nipper com o objetivo de fornecer uma solução eficiente para transmissão de dados entre dispositivos remotos (LIGHT, 2017).

Diferentemente dos modelos tradicionais de comunicação baseados em requisição e resposta (como o protocolo HTTP), o MQTT utiliza uma arquitetura publisher/subscriber. Neste contexto, dispositivos publicadores (publishers) enviam mensagens para tópicos específicos em um broker, enquanto dispositivos assinantes (subscribers) recebem automaticamente as mensagens dos tópicos de interesse.

A arquitetura básica do MQTT é composta por três elementos principais:

- Publisher: dispositivo responsável pelo envio das informações;
- Broker: servidor intermediário responsável pelo gerenciamento das mensagens;
- Subscriber: dispositivo ou sistema responsável pelo recebimento dos dados.

Segundo a especificação oficial da OASIS (2014), o protocolo opera sobre o protocolo TCP/IP e apresenta características como baixo consumo de banda, baixa sobrecarga computacional e elevada escalabilidade, tornando-o adequado para aplicações de monitoramento contínuo em ambientes industriais.

No sistema desenvolvido neste trabalho, o ESP32 atua como publisher, enviando periodicamente os dados de temperatura e umidade coletados pelo sensor DHT22 a um broker MQTT. Posteriormente, essas informações são encaminhadas ao servidor responsável pelo armazenamento, processamento e visualização em tempo real.

A utilização do MQTT neste projeto foi motivada pela necessidade de uma comunicação

**Ano VII, v.1 2026 | submissão: 26/05/2026 | aceito: 29/05/2026 | publicação: 01/06/2026**

eficiente, confiável e de baixo custo computacional, adequada ao cenário de monitoramento ambiental contínuo em linhas de produção SMT.

## **2.5 Processo SMT e Influência das Condições Ambientais**

A tecnologia Surface Mount Technology (SMT) é amplamente utilizada na fabricação de placas eletrônicas devido à sua capacidade de aumentar a densidade de componentes nas placas de circuito impresso (PCB), reduzir os custos de produção e elevar a produtividade em larga escala. Nesse processo, os componentes eletrônicos são montados diretamente sobre a superfície da PCB, eliminando a necessidade de perfurações utilizadas em tecnologias mais antigas, como o processo through-hole (ASHOK; SHARMA, 2020).

O processo SMT é composto por diversas etapas críticas, entre as principais, destacam-se:

- aplicação da pasta de solda (solder paste printing);
- posicionamento automático de componentes (pick and place);
- soldagem por refusão (reflow soldering);
- inspeção óptica automatizada (AOI);
- testes funcionais.

Cada uma dessas etapas pode ser impactada por condições ambientais inadequadas, especialmente temperatura e umidade relativa do ar

Segundo David M. Jacobson e Gopal Hegde em *Microelectronics Manufacturing*

Em *Engineering and Technology*, níveis inadequados de umidade podem causar a absorção dessa umidade por componentes sensíveis, aumentando o risco de falhas durante o processo de soldagem, como o fenômeno conhecido como popcorn, caracterizado pela expansão interna da umidade durante o aquecimento.

Além disso, temperaturas elevadas podem comprometer a estabilidade da pasta de solda, alterando sua viscosidade e reduzindo sua eficiência durante o processo de impressão de pasta de solda (solder paste printing), ao mesmo tempo em que níveis elevados de umidade podem acelerar processos de oxidação em componentes eletrônicos e superfícies metálicas, afetando diretamente a qualidade da soldagem (LEA, 1997).

De acordo com a norma IPC, especialmente em documentos como IPC J-STD-033, componentes sensíveis à umidade devem ser armazenados e utilizados sob condições ambientais controladas para evitar degradação e falhas no processo produtivo.

Em ambientes industriais em que o monitoramento é realizado manualmente ou de forma periódica, variações ambientais podem passar despercebidas, aumentando o risco de defeitos e

Ano VII, v.1 2026 | **submissão: 26/05/2026** | **aceito: 29/05/2026** | **publicação: 01/06/2026**

retrabalho. Nesse contexto, sistemas automatizados de monitoramento contínuo tornam-se importantes para viabilizar ações preventivas e garantir maior estabilidade ao processo produtivo.

O sistema proposto neste trabalho busca atuar diretamente nesse cenário, realizando o monitoramento contínuo da temperatura e da umidade do ambiente, permitindo maior rastreabilidade e a prevenção de falhas decorrentes das condições ambientais.

### 3. Desenvolvimento

#### 3.1 Arquitetura Geral do Sistema

O sistema desenvolvido é composto por três camadas principais: dispositivo embarcado, comunicação e aplicação no servidor. A arquitetura foi projetada para garantir a coleta contínua de dados, a transmissão eficiente de informações e a visualização em tempo real.

Na camada de aquisição, o dispositivo baseado no ESP32 é responsável pela leitura dos dados ambientais por meio do sensor DHT22. Esses dados são exibidos localmente em um display LCD e enviados periodicamente a um broker de mensagens.

Na camada de comunicação, utilizou-se o broker RabbitMQ, responsável por intermediar a troca de mensagens entre o dispositivo e o servidor.

Por fim, na camada de aplicação, foi desenvolvida uma solução composta por um serviço consumidor, responsável pelo processamento e armazenamento dos dados, e por uma API HTTP para disponibilizar as informações ao usuário final por meio de uma interface web.



**Figura 1 – Arquitetura geral do sistema.**

#### 3.2 Desenvolvimento do Dispositivo Embarcado

##### 3.2.1 Coleta e Exibição dos Dados

A leitura dos dados de temperatura e de umidade é realizada a cada 5 segundos pelo sensor DHT22. Os valores obtidos são exibidos imediatamente no display LCD 16x2, permitindo o monitoramento local em tempo real.

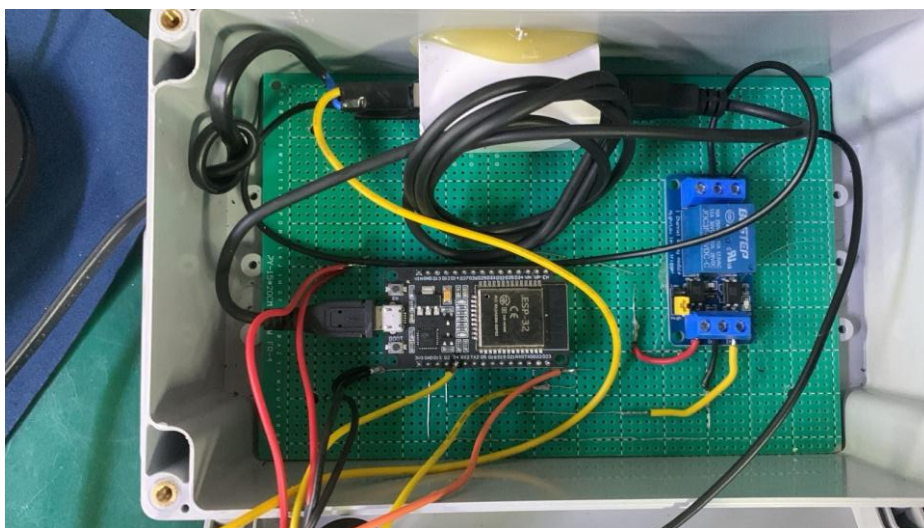


Figura 2 – Protótipo físico do sistema (parte interna).



Figura 3 – Protótipo físico do sistema (parte externa).

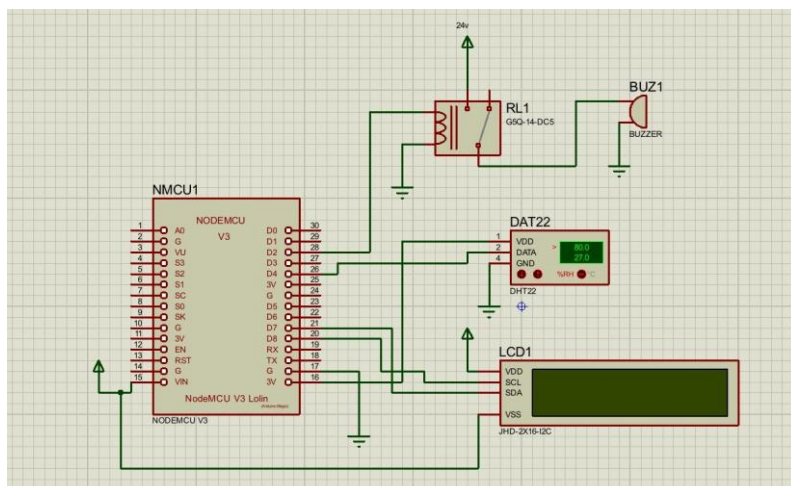


Figura 4 – Esquema elétrico do sistema.

Ano VII, v.1 2026 | **submissão: 26/05/2026** | **aceito: 29/05/2026** | **publicação: 01/06/2026**

Os dados são enviados em formato estruturado, contendo:

- temperatura;
- umidade;
- *timestamp* da leitura;
- Identificação do dispositivo.
- 

### 3.2.2 Lógica de Alerta

O sistema possui um mecanismo de alerta baseado em limites de operação previamente definidos no firmware. Esses limites definem valores máximos e mínimos aceitáveis de temperatura e de umidade.

Quando os valores medidos ultrapassam esses limites, o sistema aciona um buzzer para sinalizar sonoramente.

O comportamento do alerta segue a seguinte lógica:

- O buzzer é acionado por 15 segundos;
- após esse período, permanece desligado por 1 minuto e 30 segundos;
- Caso a condição de alerta persista, o ciclo é reiniciado automaticamente.

Esse mecanismo evita alertas contínuos e excessivos, mantendo a efetividade da sinalização sem causar desconforto operacional.

### 3.3 Sistema de Comunicação

A comunicação entre o dispositivo e o servidor é realizada por meio do broker RabbitMQ, que atua como intermediário na troca de mensagens.

O broker é executado em um ambiente containerizado com Docker, o que facilita a implantação e o isolamento dos serviços.

O modelo adotado é baseado em publicação e consumo de mensagens, no qual:

- o ESP32 atua como *publisher*;
- O serviço back-end atua como consumidor.

### 3.4 Back-end e Persistência de Dados

O back-end foi desenvolvido com a plataforma ASP.NET, sendo responsável tanto pelo consumo de mensagens quanto pela disponibilização de dados por meio de uma API HTTP.

Ano VII, v.1 2026 | **submissão: 26/05/2026** | **aceito: 29/05/2026** | **publicação: 01/06/2026**

### **3.4.1 Serviço Consumidor**

Um serviço dedicado atua como consumidor das mensagens publicadas no broker RabbitMQ. Esse serviço permanece em execução contínua, monitorando a fila de mensagens. Sempre que uma nova mensagem é recebida, os dados são processados e armazenados em um banco de dados.

### **3.4.2 Modelagem do Banco de Dados**

A estrutura de persistência foi projetada de forma simples e eficiente, sendo composta por duas entidades principais:

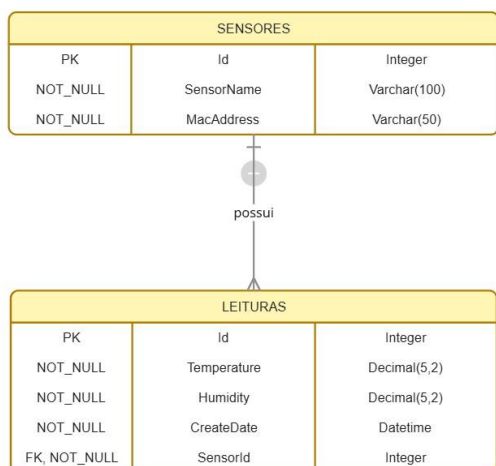
#### **Tabela Sensores**

- Id;
- SensorName;
- MacAddress.

#### **Tabela Leituras**

- Id;
- Temperature;
- Humidity;
- CreateDate;
- SensorId (chave estrangeira).

Essa separação permite maior flexibilidade no gerenciamento dos dispositivos e maior rastreabilidade dos dados coletados.



**Figura 5 – Diagrama de entidade-relacionamento.**

### 3.4.3 API HTTP

A aplicação back-end disponibiliza uma API HTTP para o consumo de dados pelo front-end.

Foram implementados os seguintes endpoints:

- **GET /sensors** → retorna todos os sensores cadastrados;
- **GET /sensors/{id}** → retorna os detalhes de um sensor específico;
- **GET /sensors/last** → retorna a última leitura de cada sensor;
- **POST /sensors** → permite o cadastro de novos sensores.

A comunicação entre os *controllers* e a lógica de negócio é realizada por meio do padrão Mediator, promovendo desacoplamento e melhor organização do código.

### 3.5 Interface Web

O front-end foi desenvolvido com React e Vite, visando maior desempenho durante o desenvolvimento e na geração da aplicação. Para estilização, foi utilizado o Tailwind CSS.

A interface principal apresenta um painel com cards que representam os sensores cadastrados no sistema. Cada *card* exibe:

- nome do sensor;
- temperatura atual;
- umidade atual;
- status da condição (normal ou alerta).

Os dados são obtidos por meio dos endpoints da API e atualizados dinamicamente.

Ano VII, v.1 2026 | **submissão: 26/05/2026** | **aceito: 29/05/2026** | **publicação: 01/06/2026**

O sistema prevê uma tela de relatórios que permite a análise histórica dos dados coletados.



**Figura 6 – Tela de relatórios.**

### 3.6 Ambiente de Execução

Todos os componentes do sistema foram configurados para execução em ambiente contêinerizado utilizando Docker, incluindo:

- broker RabbitMQ;
- aplicação back-end;
- aplicação front-end;
- Serviço ao consumidor.

Essa abordagem facilita a implantação, padroniza o ambiente de execução e melhora a escalabilidade da solução.

Ao final, a arquitetura proposta garante a coleta contínua, o processamento eficiente e a visualização em tempo real dos dados ambientais. A integração entre hardware e software permite maior controle das condições do ambiente produtivo, o que contribui diretamente para a confiabilidade do processo.

### 4. Resultados Obtidos

Os testes do sistema foram realizados em três ambientes distintos: (i) linha produtiva, (ii) dry box e (iii) geladeira de armazenamento de pasta de solda. Para a análise, foi selecionado um sensor representativo de cada ambiente, considerando que o sistema foi implantado em múltiplos pontos da planta.

Cada ambiente possui características específicas de operação, com diferentes faixas aceitáveis de temperatura e de umidade. Apesar disso, a aplicação manteve o mesmo comportamento em

Ano VII, v.1 2026 | **submissão: 26/05/2026** | **aceito: 29/05/2026** | **publicação: 01/06/2026**

todos os cenários, com leitura a cada 5 segundos, envio de dados a cada 1 minuto e aplicação da mesma lógica de alerta baseada em limites previamente definidos.

#### 4.1 Análise por Ambiente

A análise dos resultados foi realizada considerando o comportamento dos sensores em cada ambiente, com foco na estabilidade das leituras e na ocorrência de alertas.

Na linha produtiva, observou-se maior variação nas temperaturas e na umidade ao longo do tempo, o que é esperado devido à influência direta do ambiente fabril. Como consequência, houve maior incidência de acionamentos do mecanismo de alerta.

No ambiente de dry box, caracterizado por rigoroso controle de umidade, os valores permaneceram mais estáveis ao longo do período analisado, com baixa ocorrência de desvios em relação aos limites estabelecidos.

Já na geladeira de armazenamento de pasta de solda, os valores de temperatura apresentaram pouca variação, mantendo-se em uma faixa reduzida, enquanto a umidade apresentou comportamento compatível com o ambiente refrigerado.

#### 4.2 Comparação com Sensor de Referência

Para validação das medições, foi realizada a comparação entre os valores obtidos pelo sensor DHT22 e os de um sensor comercial previamente utilizado no processo produtivo.

Os dois sensores foram posicionados no mesmo ambiente, permitindo a coleta simultânea de dados e a comparação direta dos valores de temperatura e de umidade.



**Figura 7 – Comparação entre o sensor desenvolvido e o comercial.**

**Ano VII, v.1 2026 | submissão: 26/05/2026 | aceito: 29/05/2026 | publicação: 01/06/2026**

A análise dos dados demonstrou que os valores obtidos pelo sistema desenvolvido apresentaram comportamento consistente em relação ao sensor de referência, acompanhando as variações ambientais ao longo do tempo.

As diferenças observadas entre os sensores foram pontuais e mantiveram-se dentro de uma faixa aceitável para aplicações de monitoramento ambiental, sem comprometer a utilização do sistema proposto.

#### **4.3 Frequência de Alertas**

Outro aspecto analisado foi a frequência de acionamento do mecanismo de alerta em cada ambiente.

Observou-se que ambientes com maior variabilidade, como a linha produtiva, apresentaram maior número de alertas, enquanto ambientes controlados, como o dry box, apresentaram menor incidência de alertas.

Esse comportamento demonstra que o sistema responde adequadamente às variações ambientais e identifica condições que estão fora dos limites estabelecidos.

#### **4.4 Considerações sobre o Desempenho do Sistema**

Os resultados obtidos indicam que o sistema foi capaz de realizar a coleta, a transmissão e o armazenamento de dados de forma contínua e confiável em todos os ambientes analisados.

A arquitetura adotada demonstrou-se estável, mantendo a integridade dos dados e permitindo sua visualização em tempo real por meio da interface web.

Além disso, a utilização de limites configurados para cada ambiente possibilitou a adaptação do sistema a diferentes cenários de operação, mantendo a efetividade do mecanismo de alerta.

#### **Considerações Finais**

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um sistema de monitoramento ambiental baseado em Internet das Coisas (IoT), utilizando o ESP32 em conjunto com o sensor DHT22, com o objetivo de acompanhar, em tempo real, as variáveis de temperatura e Umidade em ambientes de produção SMT.

A solução proposta integrou diferentes camadas tecnológicas, incluindo um dispositivo embarcado, comunicação via broker RabbitMQ e uma aplicação de servidor desenvolvida em

**Ano VII, v.1 2026 | submissão: 26/05/2026 | aceito: 29/05/2026 | publicação: 01/06/2026**

ASP.NET, permitindo a coleta contínua, o processamento e a visualização dos dados por meio de uma interface web.

Os resultados obtidos demonstraram que o sistema é capaz de operar de forma estável em diferentes ambientes, incluindo a linha produtiva, o dry box e a geladeira de armazenamento de pasta de solda. A análise dos dados evidenciou que o comportamento das leituras se alinha às características específicas de cada ambiente, o que valida a capacidade do sistema de se adaptar a diferentes condições operacionais.

A comparação com um sensor comercial de referência indicou que os valores obtidos pelo sistema desenvolvido apresentam comportamento consistente, reforçando a confiabilidade da solução para aplicações de monitoramento ambiental.

Além disso, o mecanismo de alerta implementado mostrou-se eficaz na identificação de condições fora dos limites estabelecidos, contribuindo para a tomada de decisões rápidas e para a prevenção de falhas no processo produtivo.

Como principal contribuição, destaca-se a implementação de uma solução de baixo custo, escalável e de fácil integração, capaz de substituir ou complementar sistemas comerciais existentes, oferecendo maior flexibilidade e controle sobre os dados coletados.

Como trabalhos futuros, sugere-se:

- a implementação de configuração dinâmica dos limites de operação via interface web;
- a ampliação do sistema para monitoramento de múltiplas variáveis ambientais;
- a integração com sistemas industriais existentes, como MES (Manufacturing Execution Systems);
- A aplicação de técnicas de análise preditiva aos dados coletados.

Dessa forma, conclui-se que o sistema desenvolvido atende aos objetivos propostos, apresentando-se como uma alternativa viável para o monitoramento ambiental em ambientes industriais, contribuindo para a melhoria da confiabilidade e da qualidade do processo produtivo.

## Referências

- ATZORI, Luigi; IERA, Antonio; MORABITO, Giacomo. The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, v. 54, n. 15, p. 2787–2805, 2010.
- AOSONG ELECTRONICS CO., LTD. DHT22 (AM2302) Digital Temperature and Humidity Sensor Datasheet.
- ESPRESSIF SYSTEMS. ESP32 Datasheet.
- FRADEN, Jacob. *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. Cham: Springer, 2016.



**Ano VII, v.1 2026 | submissão: 26/05/2026 | aceito: 29/05/2026 | publicação: 01/06/2026**

LIGHT, Roger. MQTT Version 3.1.1. OASIS Standard, 2017.

MARWEDEL, Peter. Embedded System Design: Embedded Systems Foundations of Cyber-Physical Systems. 3. ed. Cham: Springer, 2021.

MONTROSE, Mark I. Printed Circuit Board Design Techniques for EMC Compliance. New York: IEEE Press, 1996.

OASIS. MQTT Version 3.1.1.

ROSE, Karen; ELDRIDGE, Scott; CHAPIN, Lyman. The Internet of Things: An Overview: Understanding the Issues and Challenges of a More Connected World. Internet Society, 2015.

IPC. J-STD-033: Handling, Packing, Shipping, and Use of Moisture/Reflow Sensitive Surface Mount Devices.