

## 15º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2024

### **Sistema Supervisório para Monitoramento de Ar-Condicionado Industrial: Prevenindo Paradas Não Programadas**

Igor S. Candiani<sup>1</sup>, João V. S. Faleiros<sup>2</sup>, Érico P. Felix<sup>3</sup>, Ueslei C. Santos<sup>4</sup>,

<sup>1</sup>Graduando Engenharia de Controle e Automação, Aluno, IFSP, Câmpus Salto, igor.candiani@aluno.ifsp.edu.br.

<sup>2</sup>Graduando Engenharia de Controle e Automação, Aluno, IFSP, Câmpus Salto, joao.faleiros@aluno.ifsp.edu.br.

<sup>3</sup>Graduado em Engenharia Mecânica, Professor EBTT, IFSP, Câmpus Salto, ericopfelix@ifsp.edu.br.

<sup>4</sup>Graduado em Engenharia Elétrica, Professor EBTT, IFSP, Câmpus Salto, ueslei.costa@ifsp.edu.br.

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.04.05.02-5 Automação Eletrônica de Processos Elétricos e Industriais.

**RESUMO:** A crescente demanda por eficiência e confiabilidade em sistemas de climatização industrial, especialmente em ambientes críticos como salas de painéis elétricos, destaca a importância de estratégias de manutenção preditiva para evitar falhas catastróficas e perdas financeiras significativas. Este trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema supervisório para monitoramento de falhas em ares-condicionados industriais, focando na detecção precoce de problemas em ventiladores e compressores. Uma metodologia que envolve a aplicação de sensores para coleta de dados em tempo real, processada por um microcontrolador ESP32 e apresentada em uma interface homem máquina. Os resultados demonstraram que o sistema é capaz de identificar falhas simuladas com eficácia, emitindo alertas em tempo hábil e gerando gráficos que facilitam a análise histórica dos parâmetros monitorados. A validação do sistema revelou um baixo índice de falsos positivos e uma definição adequada dos limites operacionais, evidenciando sua robustez e confiabilidade. Conclui-se que o sistema proposto representa uma solução acessível e inovadora para a implementação de manutenção preditiva, contribuindo para a redução de custos, aumento da disponibilidade dos equipamentos e otimização da eficiência energética.

**PALAVRAS-CHAVE:** manutenção preditiva; climatização industrial; monitoramento em tempo real; falhas de equipamentos; eficiência energética; microcontrolador ESP32.

### **Supervisory System for Monitoring Industrial Air Conditioning: Preventing Unscheduled Shutdowns**

**ABSTRACT:** The growing demand for efficiency and reliability in industrial air conditioning systems, especially in critical environments such as electrical panel rooms, highlights the importance of predictive maintenance strategies to avoid catastrophic failures and significant financial losses. This work aims to develop a supervisory system for monitoring failures in industrial air conditioning systems, focusing on the early detection of problems in fans and compressors. A methodology that involves the application of sensors for real-time data collection, processed by an ESP32 microcontroller and presented in a human-machine interface. The results demonstrated that the system is capable of effectively identifying simulated failures, issuing timely alerts and generating graphs that facilitate the

historical analysis of the monitored parameters. The validation of the system revealed a low rate of false positives and an adequate definition of the operational limits, evidencing its robustness and reliability. It is concluded that the proposed system represents an accessible and innovative solution for the implementation of predictive maintenance, contributing to cost reduction, increased equipment availability and optimization of energy efficiency.

**KEYWORDS:** predictive maintenance; industrial air conditioning; real-time monitoring; equipment failures; energy efficiency; ESP32 microcontroller.

## **INTRODUÇÃO**

A crescente demanda por confiabilidade e eficiência energética em ambientes industriais exige atenção especial aos sistemas de climatização, em particular aos ar-condicionados industriais responsáveis por manter a temperatura adequada em ambientes críticos, como salas de painéis elétricos. Falhas nesses sistemas podem resultar em paradas não programadas, com perdas financeiras significativas, como apontado por (FLOWER, 2024), que estima um custo médio de US\$ 9.000 por minuto para grandes empresas, e até mesmo colocar em risco a segurança das operações. A manutenção preditiva, com base no monitoramento contínuo de parâmetros como corrente, RPM, vibração e temperatura, surge como estratégia para antecipar falhas em sistemas de climatização (DORNELES, 2023), garantindo a disponibilidade dos equipamentos e evitando falhas catastróficas.

Este trabalho propõe um sistema supervisor para monitoramento de falhas em ar-condicionados industriais, visando a detecção precoce de problemas em ventiladores e compressor. Sensores coletarão dados em tempo real, processados por um microcontrolador ESP32 e enviados para uma interface homem-máquina (IHM). A IHM exibirá os dados, gerará gráficos e emitirá alertas, auxiliando na tomada de decisões de manutenção preditiva. O objetivo é minimizar o tempo de inatividade, aumentar a vida útil dos equipamentos, otimizar a eficiência energética, reduzir custos e aumentar a segurança em ambientes industriais.

## **FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **Sistemas Embarcados e Comunicação I2C**

Sistemas embarcados são sistemas computacionais projetados para executar tarefas específicas, frequentemente com requisitos de tempo real e restrições de recursos (HEATH, 2003). A popularização de microcontroladores poderosos e de baixo custo, como o ESP32, tem impulsionado a aplicação desses sistemas em diversas áreas, incluindo a indústria 4.0 (LEE; LEE, 2015).

No contexto do monitoramento de ar-condicionado, o ESP32 atua como o cérebro do sistema, coletando dados dos sensores, processando-os e transmitindo as informações relevantes. A comunicação com os sensores se dá através do protocolo I2C (Inter-Integrated Circuit), um protocolo de comunicação serial síncrono que se destaca pela simplicidade e eficiência, permitindo a conexão de múltiplos dispositivos a um único barramento utilizando apenas dois fios (SDA e SCL) (STMICROELECTRONICS, 2024). Essa característica é crucial para reduzir a complexidade do circuito e o número de conexões necessárias, tornando o sistema mais confiável e escalável.

## Manutenção Preditiva

A indústria 4.0 tem promovido a busca por técnicas de manutenção mais eficientes e eficazes, com foco na prevenção de falhas e na otimização do tempo de vida útil dos ativos. Nesse contexto, a manutenção preditiva surge como uma ferramenta poderosa para garantir a disponibilidade e confiabilidade de equipamentos industriais, como o ar-condicionado.

Diferente da manutenção corretiva, que atua apenas após a falha, e da preventiva, que se baseia em intervalos de tempo fixos, a manutenção preditiva utiliza dados coletados em tempo real para identificar padrões anormais de funcionamento, permitindo a programação de intervenções pontuais e eficazes (JARDINE; TSANG, 2013). Essa abordagem traz uma série de vantagens, tais como a redução de custos. A detecção precoce de falhas permite a realização de reparos pontuais e menos custosos, evitando danos maiores aos equipamentos e prolongando sua vida útil. Além disso, aumenta a disponibilidade, uma vez que as paradas não programadas são minimizadas. Isso ocorre porque a manutenção é realizada de forma programada e estratégica, garantindo a continuidade da operação.

Outro benefício é a melhoria da segurança, pois ao identificar problemas em estágio inicial, a manutenção preditiva contribui para a segurança das instalações e dos trabalhadores, evitando acidentes e falhas catastróficas. Finalmente, a otimização da eficiência energética também se destaca, visto que o monitoramento contínuo permite identificar e corrigir desvios que impactam o consumo de energia, como o desgaste de componentes, otimizando a eficiência do sistema.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Arquitetura do Sistema

O sistema supervisorio para monitoramento de ar-condicionado industrial proposto neste trabalho foi desenvolvido com base na arquitetura ilustrada na Figura 1.

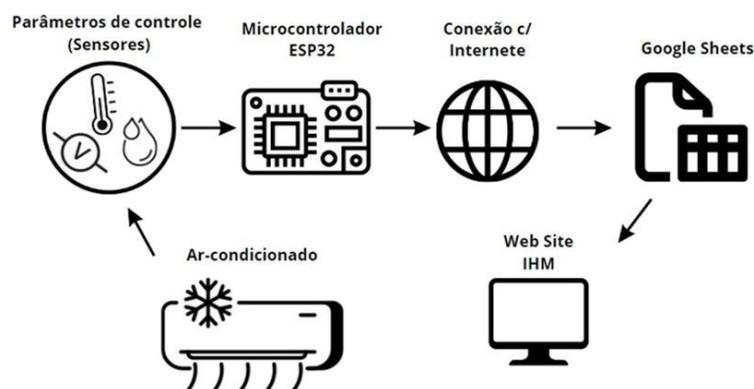


Figura 1: Diagrama ilustrando a dinâmica do sistema

Onde são utilizados os seguintes componentes:

- **Sensores:**

- **Corrente (SCT-013-010):** Instalado na linha de alimentação do motor do ventilador e do compressor, mede a corrente elétrica consumida, fornecendo informações sobre a carga do motor e possíveis anomalias, como sobrecarga ou falhas no circuito.
- **RPM (BOS01JK):** Fixado próximo ao eixo do ventilador, detecta a velocidade de rotação, permitindo identificar reduções no RPM que podem indicar desgaste nos rolamentos,

problemas de lubrificação ou obstrução na entrada/saída de ar.

- **Vibração (BCM0001):** Posicionado no corpo do motor do ventilador, mede o nível de vibração, auxiliando na identificação de desbalanceamento do rotor, desalinhamento do eixo ou folgas mecânicas.
- **Temperatura (BFT0012):** Instalado na linha de descarga do compressor, monitora a temperatura do fluido refrigerante na saída, permitindo avaliar a eficiência do sistema de refrigeração e identificar possíveis vazamentos de gás.
- **Microcontrolador (ESP32):** Responsável por receber os dados dos sensores, processá-los e transmiti-los para a interface homem-máquina. Sua escolha se deve ao baixo custo, conectividade Wi-Fi integrada e grande comunidade de desenvolvedores.
- **Plataforma de Dados (Google Sheets):** Utilizada para armazenar os dados coletados pelos sensores, servindo como um banco de dados na nuvem. Sua API permite a integração com o ESP32 e com a IHM.
- **Interface Homem-Máquina (IHM):** Desenvolvida com o framework Flask (HOME|. . . , 2017), exibe os dados coletados em tempo real, gera gráficos históricos e emite alertas em caso de desvios nos parâmetros monitorados.

## Implementação

A implementação do sistema seguiu três etapas principais: a montagem do protótipo, a programação do ESP32 e o desenvolvimento da interface homem-máquina (IHM). Na primeira etapa, os sensores foram instalados no ar-condicionado e conectados ao ESP32, respeitando as especificações de cada sensor e utilizando resistores de pull-up/down quando necessário. A fiação foi organizada e identificada para facilitar futuras manutenções.

A segunda etapa consistiu na programação do ESP32 utilizando a linguagem C++ e o Arduino IDE. O ESP32 foi programado para inicializar a comunicação I2C e Wi-Fi, ler os dados dos sensores em intervalos regulares de 30 segundos, processar os dados aplicando filtros digitais para suavizar ruídos e melhorar a precisão das leituras, e transmitir os dados processados para o Google Sheets utilizando a biblioteca ESP-Google-Sheet-Client. Por fim, o desenvolvimento da IHM, utilizando o framework Flask, HTML, CSS e JavaScript, permitiu a autenticação no Google Sheets para recuperação dos dados armazenados, exibição dos dados dos sensores em tempo real com gráficos e indicadores visuais, geração de gráficos históricos para análise do comportamento dos parâmetros ao longo do tempo, e emissão de alertas visuais e sonoros caso os parâmetros ultrapassem os limites pré-definidos.

## Parâmetros Monitorados e Limites

A Tabela 1 apresenta os parâmetros monitorados pelo sistema, os limites mínimo e máximo estabelecidos para cada parâmetro e a descrição da falha associada a cada desvio.

Tabela 1: Parâmetros monitorados, limites e falhas associadas

Parâmetros	Limite Mínimo	Limite Máximo	Descrição da Falha
Corrente do ventilador (A)	-10% da nominal	+10% da nominal	Sobrecarga, Desgaste dos rolamentos, Falhas na bobina
RPM do ventilador	-15% da nominal	-	Desgaste dos rolamentos, Lubrificação inadequada, Obstrução
Vibração do ventilador (g)	-	+20% da nominal	Desbalanceamento do rotor, Desalinhamento do eixo, Folgas
Corrente do Compressor (A)	-15% da nominal	+15% da nominal	Sobrecarga, Falhas na bobina, Capacitor com defeito
Temperatura do compressor (°C) -	+5% da nominal	Baixo nível de gás refrigerante,	Compressor ineficiente, Obstrução

Fonte: construção do autor.

## **Validação do Sistema**

A validação do sistema ocorreu em um ambiente controlado, simulando as condições reais de funcionamento de um ar-condicionado industrial. O protótipo foi instalado em um sistema de refrigeração projetado para testes, permitindo o controle preciso dos parâmetros ambientais e a simulação de falhas. O processo de validação foi dividido em duas etapas principais: coleta de dados de referência e simulação de falhas.

Na primeira etapa, o sistema de ar-condicionado operou em condições normais por 48 horas para coletar dados de referência para cada parâmetro monitorado. Durante esse período, o sistema supervisorio registrou as leituras dos sensores a cada 30 segundos, estabelecendo uma linha de base para o comportamento normal do equipamento. Esses dados, armazenados no Google Sheets, serviram para definir os limites de operação normal, conforme apresentado na Tabela 1. Na segunda etapa, após a coleta dos dados de referência, foram simuladas falhas no sistema de ar-condicionado. No ventilador, simularam-se obstrução parcial da entrada de ar (com obstrução gradual da grade de entrada utilizando material isolante), desbalanceamento do rotor (fixando um pequeno peso na hélice) e desconexão parcial da alimentação (reduzindo a tensão do motor). No compressor, simulou-se baixo nível de gás refrigerante através da liberação controlada do gás.

Durante a simulação das falhas, o sistema supervisorio monitorou e registrou os parâmetros do ar-condicionado no Google Sheets. Comparando os resultados com os dados de referência da Etapa 1, verificou-se a capacidade do sistema em detectar anomalias. A validação demonstrou que o sistema detectou todas as falhas simuladas, emitindo alertas na IHM em tempo hábil, com os limites pré-definidos mostrando-se adequados e baixa taxa de falsos positivos.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os resultados da validação demonstram a eficácia do sistema na detecção precoce de falhas em sistemas de ar-condicionado industrial. O sistema detectou todas as falhas simuladas, emitindo alertas na IHM em tempo hábil. Os gráficos históricos da IHM facilitaram a identificação do momento da falha e auxiliaram no diagnóstico. O sistema apresentou baixo índice de falsos positivos, comprovando a robustez dos algoritmos de detecção, e os limites pré-definidos mostraram-se adequados para identificar desvios sem gerar alertas falsos em condições normais.

## **CONCLUSÕES**

O sistema supervisorio desenvolvido neste trabalho se mostrou uma ferramenta promissora para a implementação de manutenção preditiva em ambientes industriais. Sua validação comprovou a eficácia na detecção precoce de falhas, contribuindo para a redução de custos de manutenção ao permitir reparos pontuais e evitar substituições desnecessárias. Além disso, o sistema minimiza paradas não programadas, aumentando a disponibilidade do equipamento e permitindo manutenções programadas em momentos estratégicos. A detecção precoce de anomalias também contribui para a segurança das instalações e dos trabalhadores, prevenindo acidentes e falhas catastróficas. O monitoramento contínuo e a correção de desvios otimizam a

eficiência energética do sistema de ar-condicionado. A simplicidade, baixo custo e fácil implementação, com tecnologias como ESP32, Google Sheets e Flask, tornam o sistema acessível e demonstram o potencial da IoT na indústria 4.0.

## CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

João Victor Faleiros foi responsável pela redação do artigo, assim como a montagem do sistema e pela aquisição de dados. Igor Candiani contribuiu com a programação do ESP-32, o tratamento dos dados e o desenvolvimento da IHM. A pesquisa foi orientada pelos professores Ueslei C. Santos e Érico P. Felix, que forneceram suporte e orientação técnica durante todo o processo. Todos os autores contribuíram com a revisão do trabalho e aprovaram a versão submetida.

## AGRADECIMENTOS

Os autores manifestam sua sincera gratidão aos professores Ueslei C. Santos e Érico P. Felix pela orientação dedicada e pelo incentivo constante durante o desenvolvimento deste trabalho. Agradecem também ao Instituto Federal de São Paulo, Câmpus Salto, pela disponibilização de suas instalações para estudos e testes, além do apoio à pesquisa e inovação. Um agradecimento especial à empresa Pfannenbergl do Brasil pelo empréstimo dos equipamentos de ar condicionado e pela concessão de seu espaço para a realização de testes essenciais

## REFERÊNCIAS

DORNELES, F. *Projeto Placa de Ar-Condicionado com Esp32*. 2023. Acesso em: 02 de setembro de 2024. Disponível em: <<https://www.usinainfo.com.br/blog/projeto-controle-para-ar-condicionado/>>.

FLOWER, D. *The True Cost Of Downtime (And How To Avoid It)*. 2024. Acesso em: 14 de agosto de 2024. Disponível em: <<https://www.forbes.com/councils/forbestechcouncil/2024/04/10/the-true-cost-of-downtime-and-how-to-avoid-it/>>.

HEATH, S. *Embedded Systems Design*. Burlington MA: Second edition, 2003.

HOME| Flask – Flask web development, one drop at a time. Disponível online: <https://azcv.readthedocs.io/en/latest/> (acessado em 28 julho 2024). 2017.

JARDINE, A. K.; TSANG, A. H. *Maintenance, replacement, and reliability: theory and applications*. [S.l.]: CRC press, 2013.

LEE, I.; LEE, K. The internet of things (iot): Applications, investments, and challenges for enterprises. *Business Horizons*, v. 58, p. 431–440, 2015. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:154569836>>.

STMICROELECTRONICS. *AN4221 Application note*. STMicroelectronics, 2024. Acesso em: 03 de setembro de 2024. Disponível em: <[https://www.st.com/resource/en/application/\\_note/cd00001020-an-introduction-to-i2c-interface-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/application/_note/cd00001020-an-introduction-to-i2c-interface-stmicroelectronics.pdf)>.