

AUTOMATIZAÇÃO DO PMOC COM SENSORES IOT E BLOCKCHAIN: UMA PROPOSTA PARA GARANTIA DE CONFIABILIDADE E INTEGRIDADE DE DADOS

Amanda Victoria Soares De Alencar¹, Jônatas Silva Pereira, Leonardo Ramos Lombardo³, Rogério Thomazella⁴

¹Graduando em Automação Industrial, Fatec Bauru, amanda.alencar@fatec.sp.gov.br

²Graduando em Automação Industrial, Fatec Bauru, jonatas.pereira5@fatec.sp.gov.br

³Graduando em Automação Industrial, Fatec Bauru, leonardo.lombardo@fatec.sp.gov.br

⁴Doutor em Engenharia Elétrica Fatec Bauru, rogerio.thomazella@cps.sp.gov.br

RESUMO

O Plano de Manutenção, Operação e Controle (PMOC) é essencial para assegurar a qualidade do ar em ambientes climatizados, conforme as normas da ANVISA. O preenchimento do PMOC depende majoritariamente de registros manuais feitos por técnicos ou via aplicativos digitais, sendo suscetível a erros humanos e inconsistências. Este estudo propõe uma metodologia híbrida de automação, integrando sensores IoT embarcados nos equipamentos de ar condicionado, transmissão segura de dados via Wi-Fi ou Bluetooth para um aplicativo de uso técnico, e registro confiável por meio de *blockchain*. A solução objetiva elevar a confiabilidade, rastreabilidade e integridade das informações do PMOC, mantendo a possibilidade de inserção manual de observações. O desenvolvimento de um aplicativo complementar permitirá visualização, auditoria e validação dos dados, oferecendo uma abordagem moderna e segura para gestão da manutenção de sistemas HVAC.

Palavras-chave: Automatização de Dados. Sensores de Temperatura. Segurança Preditiva. Condicionador de ar – AC. PMOC.

1 INTRODUÇÃO

A manutenção de sistemas de ar condicionado é fundamental para garantir a saúde e o conforto ambiental em ambientes internos, especialmente em edificações comerciais e residenciais, onde as pessoas passam grande parte do tempo. Reconhecendo essa necessidade, a legislação brasileira, por meio da Resolução ANVISA nº 9/2003, estabelece o Plano de Manutenção, Operação e Controle (PMOC), que orienta inspeções periódicas, manutenção preventiva e corretiva, além do controle da qualidade do ar interno. No entanto, a execução manual do PMOC ainda depende de registros manuais, mesmo quando auxiliados por aplicativos, o que pode acarretar vulnerabilidades como omissões, registros incorretos, baixa rastreabilidade e atrasos nas ações de manutenção, comprometendo a eficiência do sistema e a saúde dos ocupantes.

O avanço das tecnologias de Internet das Coisas (IoT) e *blockchain* oferece uma oportunidade para automatizar o preenchimento do PMOC, proporcionando monitoramento em tempo real por meio de sensores embarcados nos equipamentos, que capturam informações críticas e as transmitem via Wi-Fi ou Bluetooth para o aplicativo do técnico. Paralelamente, a utilização da *blockchain* assegura que cada

registro seja imutável, auditável e confiável, garantindo a integridade dos dados coletados.

O preenchimento manual do PMOC apresenta riscos significativos, como inconsistências e baixa confiabilidade dos dados, o que pode comprometer a segurança do ambiente climatizado e a conformidade legal perante a legislação vigente. Assim, surge a questão: Como garantir a integridade, confiabilidade e rastreabilidade das informações do PMOC, minimizando falhas humanas e melhorando a gestão da manutenção dos sistemas HVAC?

Este projeto propõe o desenvolvimento de um sistema automatizado para o preenchimento do Plano de Manutenção, Operação e Controle (PMOC), com o uso de tecnologias emergentes como Internet das Coisas (IoT) e *blockchain*. Sensores IoT serão integrados aos equipamentos de climatização para monitorar, em tempo real, variáveis como temperatura, umidade e tempo de operação. Os dados coletados serão transmitidos por meio de redes sem fio (Wi-Fi ou Bluetooth) a um aplicativo móvel, destinado ao uso por técnicos responsáveis pelas manutenções.

O uso da tecnologia *blockchain* garantirá a integridade, rastreabilidade e segurança dos registros, assegurando que as informações não sejam alteradas ou perdidas, o que é essencial para fins de auditoria e conformidade com as normas da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Dessa forma, o sistema proposto visa otimizar o controle das manutenções, reduzir falhas operacionais, prevenir fraudes e contribuir para a melhoria da qualidade do ar em ambientes climatizados.

O preenchimento manual do PMOC, apesar de ser uma exigência legal conforme a Lei nº 13.589/2018 e RDC nº 09/2003 da ANVISA, apresenta vulnerabilidades que comprometem a qualidade das informações registradas. A adoção de um sistema automatizado com sensores *IoT* e comunicação segura proporciona dados objetivos, padronizados e confiáveis. A integração com *blockchain* assegura a integridade e transparência dos registros, melhorando a confiabilidade técnica e jurídica do processo. Além de cumprir a legislação, o projeto contribui para a saúde dos ocupantes dos ambientes climatizados, redução de custos com manutenção corretiva e preditiva, e alinhamento às diretrizes da LGPD.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Plano de Manutenção, Operação e Controle – PMOC

Conforme a Lei nº 13.589/2018, o PMOC (fig.1) é uma exigência legal no Brasil para locais com ar-condicionado central ou sistemas com mais de 60.000 BTU/h. Ele serve para garantir que o ar respirado nesses ambientes seja limpo e seguro, ajudando a prevenir doenças e problemas respiratórios. Entre os principais pontos do PMOC estão a limpeza regular dos equipamentos, a inspeção técnica, a manutenção preventiva e o registro de todas as ações feitas, sempre com acompanhamento de um profissional qualificado. Seu objetivo principal é proteger a saúde das pessoas e manter o bom funcionamento dos sistemas de climatização.



Figura 1 – Estrutura do PMOC



Fonte: Delf Engenharia (2019).

2.2 Internet das Coisas (IoT)

A Internet das Coisas (IoT) (fig.02), consiste em uma rede de dispositivos capazes de coletar e transmitir dados por sensores e comunicação digital, permitindo automatização e monitoramento contínuo. Segundo Gubbi et al. (2013), a *IoT* integra sensores, processamento distribuído e conectividade para suporte a sistemas inteligentes. Em *Heating, Ventilation and Air Conditioning* (HVAC), essa tecnologia permite controle térmico mais eficiente, maior confiabilidade operacional e suporte avançado à manutenção preditiva, baseada na medição contínua de variáveis como temperatura, umidade, pressão diferencial, vibração e qualidade do ar (Al-Fuqaha et al., 2015).

Com o aumento da demanda por respostas rápidas, surgem limitações no uso exclusivo da nuvem, especialmente quanto à latência e dependência de conexão constante. Assim, o *edge computing* torna-se essencial para processar dados localmente e garantir operação mesmo sem internet, como destacam Shi et al. (2016). Essa capacidade fortalece a execução do PMOC ao tornar os registros objetivos e automatizados, substituindo práticas declarativas por evidências contínuas. Estudos em edifícios inteligentes indicam, inclusive, reduções significativas de consumo energético quando sensores direcionam o controle de climatização (ASHRAE, 2019).

Apesar dos benefícios, persistem desafios como segurança cibernética, compatibilidade com sistemas legados e manutenção dos sensores. Portanto, tecnologias complementares: como *blockchain* e autenticação forte, tornam-se importantes para elevar a confiabilidade e integridade dos dados. Assim, a *IoT* consolida-se como elemento fundamental para a Manutenção 4.0 e para a transformação do PMOC em um processo técnico e verificável.



Figura 2 - Ilustra o ecossistema do IoT



Fonte: Faberhausplay (2016).

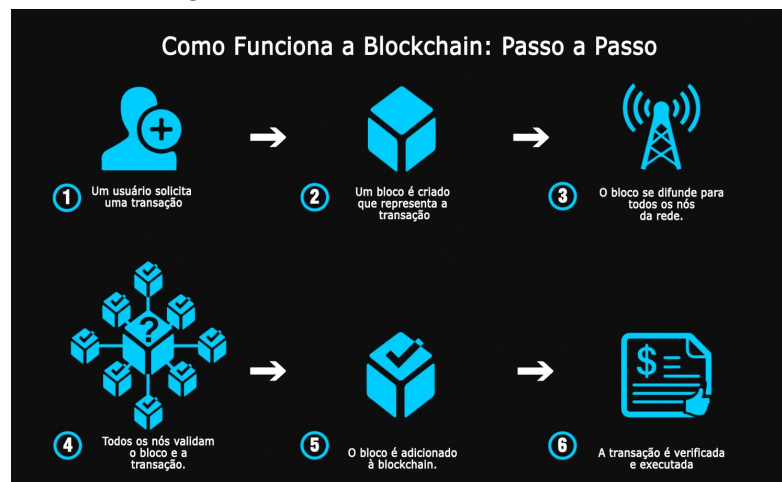
2.3 Blockchain

A tecnologia *blockchain* (fig.03) tem evoluído para aplicações além das criptomoedas, destacando-se como ferramenta para garantir integridade, autenticidade e rastreabilidade em processos industriais. Conforme Crosby et al. (2016), o modelo de *distributed ledger* permite registrar dados de forma imutável e auditável, o que beneficia diretamente a manutenção predial e a gestão de ativos. Estudos recentes mostram que a *blockchain* reduz fraudes documentais e aumenta a confiabilidade das intervenções técnicas. Sua estrutura encadeada de blocos, baseada em hashes e carimbos de tempo, assegura detecção imediata de alterações, tornando-se adequada para registros técnicos (Al-Refaie; Al-Hawadi; Lepkova, 2022).

Em aplicações industriais, soluções com *smart contracts* aumentam a automação e a transparência dos registros de manutenção, como demonstrado por Otamendi et al. (2025). No setor predial, pesquisas indicam ganhos de rastreabilidade e eficiência quando *blockchain* é integrada aos serviços de manutenção. Apesar dos benefícios, desafios persistem quanto à integração com sistemas legados e à padronização de metadados. Assim, evidências recentes confirmam que a *blockchain* fortalece o PMOC ao oferecer registros invioláveis, auditáveis e adequados a processos regulatórios, como também apontam (Tuli et al., 2018).



Figura 3 – Estrutura do Blockchain



Fonte: 101blockchains (2018).

2.4 Aplicativo (Refrigeração)

A automação do PMOC por meio de um aplicativo móvel que integra *IoT* e *blockchain* representa uma inovação prática na gestão de sistemas de refrigeração e climatização. O app permite monitoramento em tempo real de variáveis como temperatura, umidade, pressão, vibração, consumo energético e qualidade do ar, possibilitando manutenção preditiva, redução de custos e aumento da confiabilidade dos equipamentos (Cespedes-Cubides; Xie *et al.*, 2023)

Estudos recentes mostram que a combinação de edge/fog computing com blockchain em ambientes IoT possibilita o processamento de dados local, a preservação da integridade das informações e a manutenção de registros auditáveis, mesmo quando há conectividade intermitente, fortalecendo a confiabilidade de sistemas de monitoramento e manutenção (Alzoubi *et al.*, 2022). Assim, o aplicativo transforma o PMOC em um sistema baseado em evidências, com geração automatizada de relatórios, acompanhamento online e registros seguros por meio de blockchain, consolidando-se como ferramenta essencial para a Manutenção 4.0 (SMACNA Brasil, 2023; Bongini *et al.*, 2025).

3 MATERIAIS E MÉTODOS — VERSÃO PARA PROTÓTIPO

3.1 Caracterização do Estudo

O estudo apresenta uma proposta de protótipo de aplicativo para PMOC Automático, baseado em conceitos de IoT, análise de dados e blockchain. Como o protótipo ainda não foi testado, os materiais, sensores e fluxos aqui descritos configuram sugestões preliminares para implementação futura.

3.2 Materiais Propostos

3.2.1 Hardware

- Microcontrolador ESP32 (BLE/Wi-Fi);
- Smartphones para comunicação;
- Sensores ambientais e elétricos;
- Equipamentos básicos de apoio (cabos, fontes, notebook).

3.2.2 Softwares e plataformas

- Flutter ou React Native;
- Backend em Node.js com banco MongoDB/PostgreSQL;
- Blockchain privada (Hyperledger Fabric ou Ethereum Private);
- Ferramentas de teste (MQTT Explorer, Insomnia).

Base de dados prevista

- Leituras dos sensores;
- Registros manuais de PMOC para comparação;
- Logs operacionais.

3.3 Funcionamento Proposto do Protótipo

Sugere-se que o sistema funcione da seguinte forma:

1. Coleta automática de dados pelo módulo IoT;
2. Envio dos dados para o aplicativo via BLE/Wi-Fi;
3. Preenchimento automático sugerido do PMOC com base em critérios técnicos;
4. Validação manual pelo técnico;
5. Registro do PMOC em blockchain para garantir rastreabilidade;
6. Geração de relatórios para auditoria.

3.4 Arquitetura e Interfaces

Inclui:

- Tela de login com autenticação;
- Tela de conexão com o equipamento;
- Dashboard com indicadores;
- Tela para PMOC automático;
- Histórico e auditoria;

- Tela de relatórios e gestão.

Essas telas representam uma proposta de design, sujeita a ajustes durante o desenvolvimento.

3.5 Sensores Recomendados

A escolha dos sensores a seguir é propositiva, indicando modelos adequados para um futuro desenvolvimento e validação do protótipo.

Sensores de pressão

- Danfoss AKS 32R, Honeywell PX2 ou transdutores 4–20 mA;
- Pressostatos SPDT para alta/baixa.

Aplicação sugerida: diagnóstico de falta de gás, obstrução ou superaquecimento.

Sensores de temperatura

- NTC 10k, PT100/PT1000 ou DS18B20.

Locais recomendados: serpentina, ar de retorno e ar insuflado.

Sensores de umidade

- DHT22, SHT31 ou AM2301.

Aplicação: avaliação básica de conforto térmico.

Corrente e tensão

- Corrente: SCT-013, ACS712, INA219;
- Tensão: módulos AC 127/220 V.

Aplicação: identificação preliminar de sobrecargas e falhas elétricas.

Pressão diferencial do filtro

- MPX5010DP, MPX5100DP ou SDP610.

Aplicação: monitorar saturação do filtro — item relevante do PMOC.

Qualidade do ar

- MH-Z19B (CO₂), MQ-135 (COVs), PMS5003 (material particulado).

Aplicação: complementar requisitos da qualidade do ar.

Microcontrolador e comunicação

- ESP32 com BLE/Wi-Fi, protocolo MQTT ou BLE GATT.

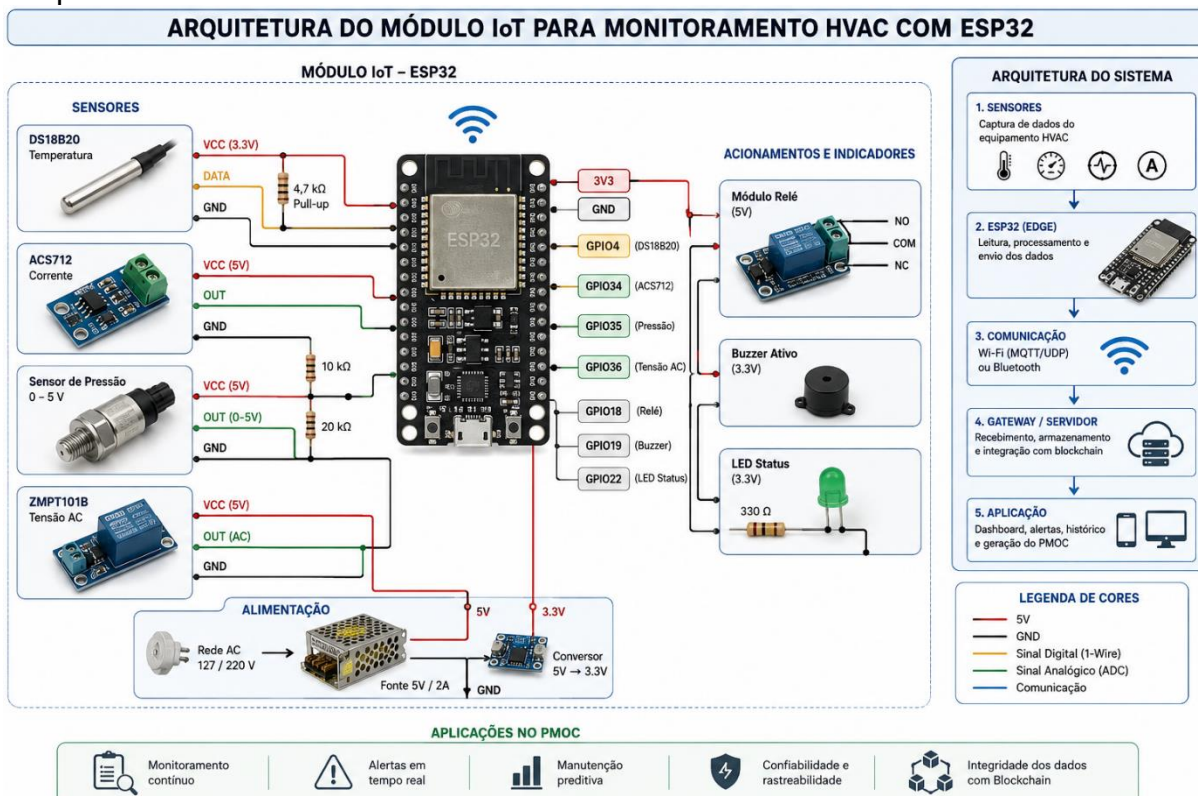
3.6 Processo Proposto de Validação

Sugere-se que, quando implementado, o protótipo seja avaliado quanto a:

- consistência e precisão dos sensores;
- estabilidade da comunicação BLE/Wi-Fi;
- tempo para gerar o PMOC automático;
- adequação ao PMOC e à legislação pertinente.

A Figura 4 apresenta a arquitetura proposta do módulo IoT desenvolvido para o monitoramento de sistemas HVAC aplicados ao PMOC automatizado. O diagrama ilustra a integração entre o microcontrolador ESP32 e os sensores responsáveis pela aquisição das variáveis operacionais dos equipamentos de climatização, incluindo temperatura, pressão, corrente elétrica e tensão da rede. Também são demonstrados os módulos auxiliares de acionamento e sinalização, bem como a comunicação sem fio com o gateway central e o sistema supervisório. A arquitetura foi concebida com base nos conceitos de edge computing e Internet das Coisas (IoT), permitindo coleta contínua de dados, monitoramento em tempo real e futura integração com blockchain para garantir integridade, rastreabilidade e confiabilidade dos registros do PMOC.

Figura 4 – Arquitetura do módulo IoT baseado em ESP32 para monitoramento de sistemas HVAC aplicados ao PMOC automatizado, integrando sensores de temperatura, pressão, corrente e tensão, com comunicação sem fio e supervisão em tempo real.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

As Figuras 4 a 9 apresentam as principais interfaces desenvolvidas para o protótipo da plataforma SmartClima, demonstrando a viabilidade da aplicação no monitoramento automatizado de sistemas HVAC integrados ao PMOC. A Figura 4 apresenta a tela inicial do sistema, denominada “Central de Comando”, responsável pela visualização operacional dos ativos monitorados em tempo real, incluindo indicadores de ordens de serviço, status da rede IoT e alertas críticos. Essa interface centraliza as informações operacionais e permite acompanhamento remoto das condições dos equipamentos climatizados.

A Figura 5 ilustra o painel do Gateway IoT responsável pela sincronização dos dispositivos ESP32 conectados à rede. O sistema demonstrou comunicação simultânea com quinze ativos distribuídos em diferentes ambientes, evidenciando a capacidade de monitoramento em larga escala. A sincronização via protocolo UDP permitiu atualização contínua dos dados operacionais em tempo real.

Figura 5 – Tela inicial da plataforma SmartClima apresentando a central de comando para monitoramento operacional em tempo real dos ativos HVAC e gerenciamento das ordens de serviço.

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Na Figura 6 é apresentado o painel de ativos monitorados, contendo diferentes categorias de equipamentos HVAC, como Chillers, Fan Coils, sistemas VRF, Roof-Top e Split Hi-Wall. Cada equipamento possui identificação individual por sensor IoT e indicação de status online, permitindo rastreabilidade operacional e futura integração com o histórico de manutenção do PMOC.

Figura 6 – Painel do gateway IoT demonstrando a sincronização dos dispositivos ESP32 conectados à rede e o gerenciamento centralizado da comunicação dos sensores.

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A Figura 7 apresenta uma das telas de monitoramento detalhado do equipamento “Chiller Alternativo – Bloco C”, onde são exibidos parâmetros operacionais importantes para manutenção preditiva, como temperatura da evaporadora, pressão de baixa, pressão de alta, corrente elétrica e tensão de alimentação. Os dados coletados indicaram operação dentro das faixas nominais previamente configuradas pelo sistema.

Figura 7 – Interface de monitoramento dos ativos HVAC contendo identificação individual dos equipamentos, status operacional online e supervisão em tempo real dos sistemas climatizados.

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A Figura 8 demonstra o módulo gráfico do sistema, denominado “Osciloscópio Digital”, responsável pela visualização temporal das variáveis monitoradas. O gráfico possibilita análise contínua de oscilações de pressão, corrente e demais sinais elétricos, permitindo identificação antecipada de anomalias operacionais e contribuindo para estratégias de manutenção preditiva.

Figura 8 – Tela de monitoramento detalhado do equipamento “Chiller Alternativo – Bloco C”, apresentando variáveis operacionais como temperatura, pressão, corrente elétrica e tensão de alimentação.

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Por fim, a Figura 9 apresenta o sistema de etiquetagem inteligente dos ativos, utilizando QR Code para identificação digital dos equipamentos monitorados. Essa funcionalidade permite acesso rápido ao histórico de manutenção, registros do PMOC e parâmetros operacionais diretamente pelo aplicativo, aumentando a rastreabilidade e a confiabilidade das informações armazenadas no sistema.

Figura 9 – Interface gráfica do módulo “Osciloscópio Digital”, utilizada para visualização temporal das variáveis monitoradas e análise de comportamento operacional dos sistemas HVAC.

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Os resultados obtidos demonstram que a proposta de automatização do PMOC utilizando IoT, sensores inteligentes e blockchain apresenta elevado potencial para modernização dos processos de manutenção em sistemas HVAC. A integração entre os módulos ESP32, sensores ambientais e elétricos, comunicação sem fio e plataforma supervisória permitiu estruturar um sistema capaz de monitorar continuamente os equipamentos climatizados, oferecendo maior confiabilidade operacional, rastreabilidade dos registros e suporte à manutenção preditiva. Além disso, a utilização de dashboards gráficos, identificação digital por QR Code e armazenamento seguro das informações fortalece a integridade dos dados técnicos e reduz vulnerabilidades associadas aos registros manuais tradicionalmente utilizados no PMOC. Dessa forma, a arquitetura proposta demonstra aderência aos conceitos de Indústria 4.0 e manutenção inteligente, constituindo uma alternativa promissora para futuras implementações em ambientes comerciais, hospitalares e industriais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base no protótipo desenvolvido, foi possível estruturar uma plataforma supervisória para monitoramento inteligente de sistemas HVAC integrada ao conceito de PMOC automatizado. O sistema apresentou uma arquitetura visual voltada ao acompanhamento em tempo real de ativos críticos de climatização, utilizando sensores IoT conectados por meio de módulos ESP32 e comunicação via rede sem fio. As telas desenvolvidas demonstraram a viabilidade operacional da proposta, permitindo monitoramento contínuo, rastreabilidade das informações e integração futura com blockchain para validação dos registros.

A interface inicial do sistema apresentou um painel centralizado denominado “Central de Comando”, contendo indicadores operacionais, status da rede IoT e alertas críticos. O gateway IoT indicou sincronização ativa via protocolo UDP com quinze dispositivos monitorados simultaneamente, evidenciando a capacidade do sistema em operar com múltiplos equipamentos HVAC distribuídos em diferentes setores da instalação. O painel também apresentou indicadores para ordens de serviço pendentes, em execução e concluídas, permitindo futura integração com rotinas automatizadas de manutenção preditiva.

Os testes conceituais envolveram diferentes categorias de equipamentos de climatização, incluindo sistemas Chiller, Fan Coil, Self-Contained, VRF, Roof-Top e Split Hi-Wall. Cada equipamento recebeu um identificador individual associado a um sensor IoT específico. Foram simulados ambientes hospitalares, administrativos e laboratoriais, tais como UTI Pediátrica, Centro Cirúrgico, Diretoria, CPD Principal, Auditório, Recepção de Laboratórios e Ala de Recuperação, demonstrando a aplicabilidade do sistema em ambientes críticos que exigem rastreabilidade rigorosa do PMOC.

Os dados coletados pelos sensores permitiram monitoramento contínuo das variáveis térmicas e elétricas dos sistemas HVAC. Em uma das simulações realizadas no equipamento “Chiller Alternativo – Bloco C”, foram obtidos os seguintes parâmetros operacionais:

- Temperatura da evaporadora: 7,7 °C;
- Pressão baixa: 57 PSI;
- Pressão alta: 222 PSI;
- Corrente elétrica: 12,5 A;
- Tensão de alimentação: 222 VAC.

Os valores permaneceram dentro das faixas nominais previamente estabelecidas pelo sistema, indicando funcionamento adequado do equipamento monitorado. O sistema também apresentou gráficos temporais em formato semelhante a um osciloscópio digital, permitindo visualização dinâmica das oscilações de pressão e corrente elétrica ao longo do tempo. Essa funcionalidade possibilita identificar tendências operacionais, oscilações anormais e possíveis falhas preditivas antes da ocorrência de paradas críticas.

O sistema demonstrou ainda a capacidade de geração automática de etiquetas digitais contendo QR Code para identificação dos ativos monitorados. Cada

equipamento pode possuir uma etiqueta única vinculada ao banco de dados da plataforma, permitindo que o técnico realize consultas instantâneas ao histórico de manutenção, registros do PMOC, leituras operacionais e ordens de serviço diretamente pelo aplicativo móvel.

Durante a simulação operacional, todos os quinze dispositivos permaneceram online, evidenciando estabilidade da comunicação entre os módulos ESP32 e o gateway IoT central. O uso de comunicação sem fio via Wi-Fi e sincronização UDP mostrou-se adequado para aplicações de monitoramento contínuo em ambientes HVAC, reduzindo necessidade de infraestrutura cabeada complexa.

A arquitetura proposta para o sistema supervisório pode ser descrita da seguinte forma:

1. *Sensores instalados nos equipamentos HVAC realizam medições de temperatura, pressão, corrente, tensão e qualidade do ar;*
2. *Os sinais analógicos são condicionados e enviados ao microcontrolador ESP32;*
3. *O ESP32 realiza processamento local (edge computing), filtragem e empacotamento dos dados;*
4. *Os dados são transmitidos via Wi-Fi utilizando protocolo MQTT ou UDP para o Gateway IoT central;*
5. *O gateway encaminha as informações para o servidor supervisório e banco de dados;*
6. *O sistema gera automaticamente registros operacionais e sugestões de preenchimento do PMOC;*
7. *Após validação do técnico responsável, os dados são registrados em blockchain privada para garantir integridade e rastreabilidade;*
8. *O aplicativo móvel e o dashboard web disponibilizam monitoramento em tempo real, históricos, alarmes e relatórios técnicos.*

O circuito eletrônico proposto para cada módulo IoT foi estruturado utilizando um ESP32 como unidade central de aquisição e comunicação. Os sensores de temperatura DS18B20 foram conectados às entradas digitais do ESP32 utilizando resistor pull-up de 4,7kΩ. Os sensores de corrente ACS712 foram ligados às entradas analógicas para monitoramento da corrente elétrica dos compressores e ventiladores. Sensores de pressão com saída analógica 0–5 V foram conectados aos canais ADC mediante circuito divisor resistivo para adequação de nível de tensão ao ESP32. Para monitoramento da tensão da rede elétrica, foi sugerido o uso de módulo ZMPT101B isolado galvanicamente. O sistema ainda contempla módulo relé para acionamento auxiliar e buzzer de alarme local em condições críticas.

A proposta mostrou-se coerente com os requisitos do PMOC, permitindo futura automatização do processo de manutenção, geração de históricos auditáveis e implementação de estratégias de manutenção preditiva baseadas em IoT e análise contínua de dados operacionais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou uma proposta de automatização do Plano de Manutenção, Operação e Controle (PMOC) utilizando tecnologias de Internet das Coisas (IoT), sensores inteligentes, comunicação sem fio e blockchain, visando aumentar a confiabilidade, rastreabilidade e integridade dos registros relacionados à manutenção de sistemas HVAC. A arquitetura desenvolvida demonstrou potencial para transformar o processo convencional de preenchimento manual do PMOC em um sistema automatizado baseado em monitoramento contínuo e aquisição de dados em tempo real.

A integração entre os módulos ESP32, sensores ambientais e elétricos, gateway IoT e plataforma supervisória permitiu estruturar uma solução capaz de acompanhar variáveis críticas dos equipamentos climatizados, como temperatura, pressão, corrente elétrica e tensão de alimentação. As interfaces gráficas desenvolvidas demonstraram a viabilidade operacional do sistema, oferecendo visualização centralizada dos ativos, análise gráfica dos parâmetros monitorados, gerenciamento de alarmes e identificação digital dos equipamentos por meio de QR Code.

A utilização conceitual da tecnologia blockchain mostrou-se adequada para garantir a autenticidade e a imutabilidade dos registros técnicos do PMOC, contribuindo para processos de auditoria, conformidade normativa e rastreabilidade das intervenções realizadas nos sistemas HVAC. Além disso, a proposta encontra-se alinhada aos conceitos da Indústria 4.0, edge computing e manutenção preditiva, possibilitando futuras expansões voltadas à inteligência artificial, análise preditiva de falhas e integração com sistemas corporativos de gestão predial.

Embora o estudo apresente uma proposta funcional em nível de protótipo e modelagem supervisória, futuras etapas incluem a implementação física completa do sistema, validação experimental dos sensores em ambientes reais, análise da estabilidade da comunicação sem fio e testes de desempenho da infraestrutura blockchain aplicada ao armazenamento dos registros do PMOC. Dessa forma, o trabalho contribui para o desenvolvimento de soluções tecnológicas aplicadas à automação predial e à modernização dos processos de manutenção em sistemas de climatização, especialmente em ambientes críticos que demandam elevado nível de confiabilidade operacional e qualidade do ar interno.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-FUQAHA, A. et al. Internet of things: a survey on enabling technologies, protocols, and applications. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 17, n. 4, p. 2347–2376, 2015.

AL-REFAIE, A.; AL-HAWADI, A.; LEPKOVA, N. Blockchain design with optimal maintenance planning. **Buildings**, v. 12, n. 11, p. 1–16, 2022.

ALZOUBI, Y.; SINGH, A.; KHAN, R. Blockchain-enabled edge computing for reliable industrial IoT. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 18, n. 3, p. 2023–2034, 2022.

ASHRAE. ASHRAE Handbook: HVAC Applications. Atlanta: American Society of Heating, **Refrigerating and Air-Conditioning Engineers**, 2019.

CARLI, R. et al. IoT based architecture for model predictive control of HVAC systems in smart buildings. *Journal of Building Engineering*, v. 32, p. 101712, 2020.

CROSBY, M. et al. Blockchain technology: beyond Bitcoin. **Applied Innovation Review**, v. 2, p. 6–19, 2016.

MARTINEZ, L.; SENHAJI HAFID, A.; GENDREAU, M. Fog computing in smart building HVAC systems: optimization and predictive maintenance. **Journal of Building Performance**, v. 8, n. 2, p. 45–61, 2024.

SHI, W. et al. Edge computing: vision and challenges. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 3, n. 5, p. 637–646, 2016.

TULI, S. et al. Edge and fog computing for industrial IoT applications: a survey. **Journal of Industrial Information Integration**, v. 10, p. 100–115, 2018.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Faculdade de Tecnologia de Bauru pelo suporte acadêmico e pela estrutura disponibilizada ao longo do desenvolvimento deste trabalho, contribuindo para a realização das atividades experimentais e para o aprimoramento dos conhecimentos técnicos aplicados ao projeto.