


AUTOMAÇÃO E OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA DE SISTEMAS DE AR-CONDICIONADO VIA CONTROLE CENTRALIZADO COM DISPOSITIVOS IOT

AUTOMATION AND ENERGY OPTIMIZATION OF AIR CONDITIONING SYSTEMS VIA CENTRALIZED CONTROL WITH IOT DEVICES

AUTOMATIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN MEDIANTE CONTROL CENTRALIZADO CON DISPOSITIVOS IOT

 <https://doi.org/10.56238/arev7n10-109>

Data de submissão: 14/09/2025

Data de publicação: 14/10/2025

Leandro Ferrarezi Valiante

Mestre em Ciência da Computação

Instituição: Instituto Federal de Rondônia

E-mail: leandro.valiante@ifro.edu.br

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3021868094199055>

Ricardo Bussons da Silva

Mestre em Educação

Instituição: Instituto Federal de Rondônia

E-mail: ricardo.bussos@ifro.edu.br

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2147798471022457>

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a implementação de um sistema de controle centralizado para condicionadores de ar em uma instituição de ensino, utilizando dispositivos de Internet das Coisas (IoT) de baixo custo, baseados no microcontrolador ESP32. A solução integra emissores e receptores de infravermelho para replicar os comandos originais dos aparelhos, conectados a uma plataforma web para monitoramento, agendamento e acionamento remoto. O sistema realiza requisições HTTP periódicas ao servidor, que verifica a conformidade entre o estado desejado e o real, reenviando comandos quando necessário para garantir a sincronização. A metodologia incluiu levantamento técnico dos aparelhos, montagem e programação dos módulos, instalação física no ambiente e desenvolvimento da interface web com backend e banco de dados relacional. Este armazena identificadores dos dispositivos, códigos infravermelhos e agendas de execução, garantindo escalabilidade e rastreabilidade das ações. Os resultados obtidos evidenciam que a combinação de hardware acessível e protocolos de comunicação simples pode oferecer soluções eficientes para automação e gestão de climatização em ambientes educacionais. Apesar das limitações, como dependência de rede Wi-Fi e necessidade de linha de visada para transmissão IR, o sistema mostrou potencial significativo para economia de energia, melhoria do conforto térmico e expansão futura com sensores adicionais e suporte a múltiplos protocolos.

Palavras-chave: Internet das Coisas. ESP32. Controle de Ar-Condicionado. Eficiência Energética. Automação.

ABSTRACT

This paper presents the development and implementation of a centralized control system for air conditioning units in an educational institution, using low-cost Internet of Things (IoT) devices based

on the ESP32 microcontroller. The solution integrates infrared emitters and receivers to replicate the devices' original commands, connected to a web platform for monitoring, scheduling, and remote activation. The system makes periodic HTTP requests to the server, which verifies compliance between the desired and actual status, resending commands when necessary to ensure synchronization. The methodology included a technical survey of the devices, assembly and programming of the modules, physical installation in the environment, and development of the web interface with a backend and relational database. This database stores device identifiers, infrared codes, and execution schedules, ensuring scalability and traceability of actions. The results demonstrate that the combination of affordable hardware and simple communication protocols can offer efficient solutions for automation and HVAC management in educational environments. Despite limitations, such as Wi-Fi network dependence and line-of-sight requirements for IR transmission, the system demonstrated significant potential for energy savings, improved thermal comfort, and future expansion with additional sensors and support for multiple protocols.

Keywords: Internet of Things. ESP32. Air Conditioning Control. Energy Efficiency. Automation.

RESUMEN

Este artículo presenta el desarrollo e implementación de un sistema de control centralizado para unidades de aire acondicionado en una institución educativa, utilizando dispositivos de Internet de las Cosas (IoT) de bajo costo basados en el microcontrolador ESP32. La solución integra emisores y receptores infrarrojos para replicar los comandos originales de los dispositivos, conectados a una plataforma web para monitoreo, programación y activación remota. El sistema realiza solicitudes HTTP periódicas al servidor, que verifica la correspondencia entre el estado deseado y el real, reenviando comandos cuando es necesario para asegurar la sincronización. La metodología incluyó un estudio técnico de los dispositivos, ensamblaje y programación de los módulos, instalación física en el entorno y desarrollo de la interfaz web con una base de datos relacional y de backend. Esta base de datos almacena identificadores de dispositivos, códigos infrarrojos y cronogramas de ejecución, lo que garantiza la escalabilidad y la trazabilidad de las acciones. Los resultados demuestran que la combinación de hardware asequible y protocolos de comunicación simples puede ofrecer soluciones eficientes para la automatización y la gestión de HVAC en entornos educativos. A pesar de las limitaciones, como la dependencia de la red Wi-Fi y los requisitos de visibilidad directa para la transmisión infrarroja, el sistema demostró un potencial significativo de ahorro energético, mejora del confort térmico y su futura expansión con sensores adicionales y compatibilidad con múltiples protocolos.

Palabras clave: Internet de las Cosas. ESP32. Control de Aire Acondicionado. Eficiencia Energética. Automatización.

1 INTRODUÇÃO

O aumento das temperaturas médias globais e a maior frequência de ondas de calor já afetam diretamente cidades e edifícios, pressionando sistemas de climatização e elevando o consumo elétrico. No setor de edificações, a demanda final de energia responde por cerca de um terço do consumo global e por parcela substancial das emissões de CO₂, o que torna a eficiência em climatização uma frente estratégica tanto de mitigação quanto de adaptação nas instituições de ensino (IPCC, 2023; IPCC, 2022). A trajetória atual de aquecimento amplia riscos para a saúde e o bem-estar, exigindo intervenções tecnológicas e de gestão em ambientes construídos, inclusive em escolas e universidades (IPCC, 2023).

Nesse contexto, a climatização artificial cresce rapidamente no mundo: a Agência Internacional de Energia (IEA, 2018) estima que, sem políticas eficazes, a demanda energética de condicionadores de ar poderá mais que triplicar até 2050. Por outro lado, dobrar a eficiência média dos aparelhos e otimizar sua operação pode reduzir em até 45 % o consumo projetado para resfriamento (IEA, 2018). Tais números evidenciam que soluções técnicas e de gestão - além da simples substituição de equipamentos - são decisivas para conter custos, emissões e picos de carga em campi educacionais.

As condições térmicas inadequadas também prejudicam a aprendizagem e a permanência estudantil. Evidências mostram que dias mais quentes durante o período letivo reduzem o desempenho em provas padronizadas, com impactos mais severos em eventos de calor extremo; a disponibilidade de ar-condicionado atenua parte desse efeito (PARK; GOODMAN; HURWITZ, 2020). Em paralelo, a Organização Mundial da Saúde alerta que o calor excessivo dificulta atividades cognitivas, aumenta ausências e pode levar escolas a interromper atividades durante ondas de calor (WHO, 2024).

Considerando esse contexto, racionalizar o consumo de energia é fundamental não apenas para reduzir custos operacionais, mas também para minimizar os impactos ambientais associados à geração e ao uso de eletricidade. Em muitos países, a matriz energética ainda depende, em parte, de combustíveis fósseis, cuja queima contribui significativamente para as emissões de gases de efeito estufa e, conseqüentemente, para o agravamento do aquecimento global. Em instituições de ensino, onde a demanda por climatização pode representar parcela relevante do consumo elétrico, a adoção de estratégias de gestão inteligente, como o controle centralizado de condicionadores de ar, possibilita alinhar conforto térmico e sustentabilidade. Ao otimizar o uso de equipamentos, evitar desperdícios e ajustar o funcionamento de acordo com a real necessidade, cria-se um ciclo virtuoso em que eficiência energética, responsabilidade ambiental e economia de recursos caminham juntos, contribuindo para metas institucionais e globais de desenvolvimento sustentável.

Diante desse quadro, sistemas centralizados de controle e gestão de climatização (BEMS/EMS) emergem como soluções de alto impacto. Ao integrar sensores, agendas acadêmicas, dados de ocupação e informações meteorológicas, tornam possível o comissionamento contínuo, a programação por zonas e o “load shedding”, entregando conforto com menor gasto energético. Estudos recentes relatam economias significativas de energia e melhorias operacionais quando a climatização é gerida de forma centralizada e baseada em dados - uma abordagem pertinente para instituições de ensino que precisam conciliar conforto térmico, sustentabilidade e restrições orçamentárias (FAUCHIER-MAGNAN; MOREJOHN; PRITONI, 2022; AZEVEDO et al., 2016; WEI et al., 2020).

O objetivo geral desde trabalho é desenvolver e implementar um sistema de controle centralizado para condicionadores de ar em uma instituição de ensino, utilizando dispositivos de Internet das Coisas (IoT) de baixo custo, como o microcontrolador ESP32, integrados a uma plataforma web para monitoramento e acionamento remoto, visando otimizar o consumo de energia, reduzir custos operacionais e manter condições térmicas adequadas para o ambiente de aprendizagem. Para atingir este objetivo geral, o trabalho foi dividido nos seguintes objetivos específicos: (i) Projetar e construir módulos de controle baseados em ESP32, capazes de se comunicar via rede sem fio e de acionar ou desligar os condicionadores de ar de forma individual ou em grupos, de acordo com critérios predefinidos; (ii) desenvolver uma interface web responsiva para gestão centralizada, permitindo o monitoramento em tempo real, o agendamento de funcionamento e a configuração de parâmetros operacionais dos dispositivos; e (iii) avaliar o desempenho do sistema implantado em termos de economia de energia, confiabilidade de operação e impacto no conforto térmico, utilizando métricas quantitativas e feedback dos usuários.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo constitui a base conceitual e técnica que sustenta o desenvolvimento deste trabalho, oferecendo o embasamento necessário para a compreensão das tecnologias e métodos aplicados. Nesta seção, apresentam-se os conceitos fundamentais relacionados à Internet das Coisas (IoT), aos sistemas web e à comunicação por infravermelho utilizada em controles remotos de condicionadores de ar.

2.1 INTERNET DAS COISAS (IOT) E APLICAÇÕES EM HVAC

A Internet das Coisas (IoT) pode ser definida como uma rede de objetos físicos dotados de sensores, atuadores e capacidade de processamento, interligados por meio de tecnologias de comunicação para coletar, processar e transmitir dados sem a necessidade de intervenção humana

constante (BANDYOPADHYAY; SEN, 2011). Sua aplicação no controle de sistemas de climatização (HVAC) permite que dados de temperatura, umidade, ocupação e qualidade do ar sejam monitorados e utilizados para ajustar o funcionamento dos equipamentos em tempo real, resultando em maior eficiência energética (ZENATIX, 2022).

Carli et al. (2020) destacam que arquiteturas IoT com controle preditivo (Model Predictive Control – MPC) são capazes de integrar sensores, atuadores, gateways, bancos de dados e interfaces de usuário em um ciclo fechado de automação, proporcionando melhorias tanto no conforto térmico quanto na economia de energia.

2.2 SISTEMAS WEB NO CONTROLE DE DISPOSITIVOS IOT

Sistemas web são componentes centrais em soluções IoT, servindo como camada de interface e controle. No padrão Web of Things (WoT), cada dispositivo é descrito por meio de Thing Descriptions, que especificam suas propriedades, ações e eventos de forma padronizada, garantindo interoperabilidade entre diferentes fabricantes e plataformas (W3C, 2025).

Alves et al. (2020) demonstram a aplicação de um sistema web integrado a um backend em nuvem (AWS), utilizando comunicação híbrida Bluetooth Low Energy (BLE) e Wi-Fi, permitindo monitoramento de parâmetros ambientais e controle de climatização via navegador ou aplicativo móvel.

2.3 SINAIS DE INFRAVERMELHO EM CONTROLES REMOTOS

A maioria dos controles remotos de ar-condicionado opera utilizando LEDs emissores de infravermelho (IR) com comprimento de onda próximo de 940 nm, modulados em frequências típicas de 36-38 kHz, que codificam comandos em pulsos que o receptor do equipamento interpreta (WIKIPÉDIA, 2025a).

Protocolos como NEC, RC-5 e RC-6 são comuns em eletrodomésticos, mas aparelhos de ar-condicionado frequentemente usam protocolos proprietários, com pacotes de dados mais longos e complexos, incluindo informações sobre estado, temperatura, modo de operação e velocidade do ventilador (WIKIPÉDIA, 2025b).

Wei et al. (2020) ressaltam que, para decodificação desses sinais, é necessário o uso de receptores IR compatíveis e, em alguns casos, de osciloscópios ou analisadores lógicos para capturar o formato exato do protocolo, permitindo assim a reprodução via microcontroladores como o ESP32.

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo de natureza aplicada, com abordagem quantitativa e qualitativa, de caráter experimental e descritivo. O objetivo é desenvolver, implementar e avaliar um sistema de controle centralizado para condicionadores de ar em uma instituição de ensino, utilizando dispositivos de Internet das Coisas (IoT) de baixo custo, como o microcontrolador ESP32, e uma plataforma web para gerenciamento remoto.

3.1 AMBIENTE DE ESTUDO

O experimento foi conduzido em salas de aula e setores administrativos da instituição, selecionados de forma intencional considerando a disponibilidade de infraestrutura elétrica, cobertura de rede sem fio e demanda de climatização. Foram instalados módulos de controle baseados em ESP32 acoplados a emissores e receptores de infravermelho, configurados para reproduzir os sinais dos controles remotos originais dos aparelhos.

3.2 PROCEDIMENTOS DE DESENVOLVIMENTO

A metodologia contempla quatro etapas principais:

- a) Levantamento técnico – Identificação dos modelos de condicionadores de ar existentes, análise dos protocolos de infravermelho utilizados e levantamento das condições ambientais e de uso.
- b) Desenvolvimento e programação dos dispositivos IoT – Configuração do ESP32 para recepção, armazenamento e emissão de códigos IR, comunicação via protocolo HTTP e integração com a rede local.
- c) Desenvolvimento da plataforma web – Criação de uma interface responsiva para controle e monitoramento dos dispositivos, com recursos de agendamento, ajuste de parâmetros e visualização de dados históricos.
- D)** Implantação piloto e testes – Instalação do sistema em campo, execução de testes funcionais e coleta de métricas de consumo energético, confiabilidade de operação e conforto térmico.

3.3 COLETA E ANÁLISE DE DADOS

A coleta de dados será realizada por meio de:

- Leitura automática de consumo de energia elétrica através de medidores digitais;
- Registros de operação gerados pela plataforma web, incluindo horários de acionamento e desligamento;
- Sensores ambientais para aferição de temperatura e umidade relativa do ar;

- Questionários aplicados a usuários (professores, alunos e equipe técnica) para avaliação subjetiva do conforto térmico e usabilidade do sistema.

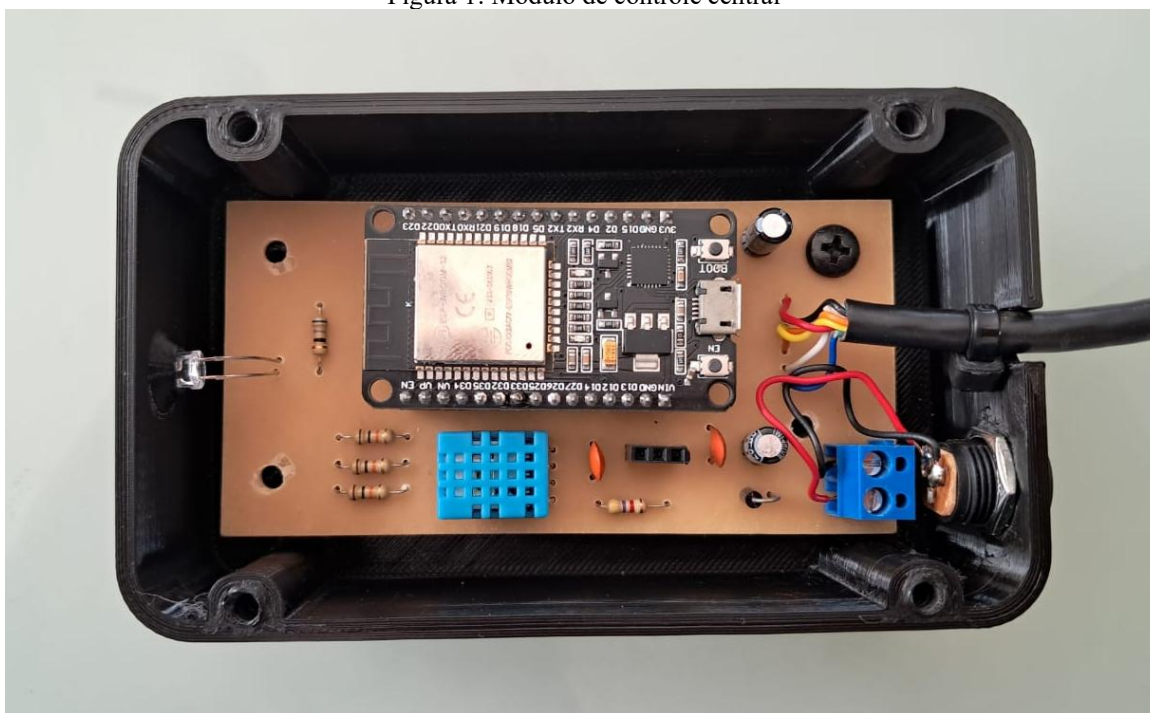
Os dados quantitativos serão analisados com métodos estatísticos descritivos e comparativos, avaliando variações de consumo antes e depois da implantação. Os dados qualitativos serão submetidos à análise de conteúdo, identificando percepções e sugestões de melhoria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os módulos de controle foram montados utilizando o microcontrolador ESP32 como unidade central, escolhido por sua capacidade de processamento, conectividade Wi-Fi integrada e compatibilidade com bibliotecas para emissão e recepção de sinais infravermelhos.

Cada módulo recebeu um emissor IR de 940 nm, posicionado de forma a ter visada direta com o receptor da central de ar, e um receptor IR para o aprendizado dos comandos originais. Foram também incorporados sensores de temperatura e umidade (DHT11) para registrar as condições ambientais locais, conforme se pode observar na Figura 1.

Figura 1: Módulo de controle central



Fonte: elaborado pelos próprios autores.

O protótipo foi montado em um invólucro (*case*) confeccionado por impressão 3D com filamento PLA (Ácido Polilático), garantindo proteção física e isolamento elétrico aos componentes.

O firmware foi desenvolvido em C++ na IDE Arduino, empregando bibliotecas específicas para a emulação de sinais infravermelhos (IR) e para a comunicação via protocolo MQTT. Na programação, cada dispositivo recebeu um identificador único (UUID), permitindo seu endereçamento, gerenciamento e rastreamento através de plataforma web centralizada.

A instalação seguiu um mapeamento prévio dos pontos de climatização da instituição. Os dispositivos foram posicionados próximos aos condicionadores de ar, preferencialmente em locais elevados para melhor emissão do sinal IR, como pode ser observado na Figura 2. Cada módulo foi alimentado por fonte DC de 5V conectada à rede elétrica local, com adaptadores adequados para segurança e estabilidade de tensão. Após a instalação física, foi realizada a calibração dos sinais de cada ar-condicionado por meio da função de “aprendizado” implementada no firmware, na qual o receptor IR do módulo captura e armazena os códigos de cada botão relevante do controle remoto original.

Figura 2: Protótipo instalado próximo a central de ar



Fonte: elaborado pelos próprios autores.

A plataforma web foi implementada com arquitetura cliente-servidor, onde o backend gerencia a comunicação com o dispositivo ESP32 e o banco de dados. A interface web responsiva foi desenvolvida com HTML5, CSS3 e JavaScript, permitindo que usuários autorizados acessem as funções de controle, monitoramento e agendamento. Durante a configuração inicial, cada dispositivo

cadastrado recebeu associação a um ou mais aparelhos de ar-condicionado, com seus respectivos códigos IR registrados no banco de dados.

O banco de dados foi estruturado em modelo relacional, armazenado em MySQL, para facilitar consultas e integrações futuras. A Tabela 1 apresenta as principais entidades e seus atributos:

- **Tabela devices:**

- id_device (PK) – Identificador único do dispositivo (UUID)
- location – Descrição do local de instalação (ex.: Sala 101)
- status – Estado atual do dispositivo (online/offline)

- **Tabela ac_codes:**

- id_code (PK) – Identificador do código IR
- id_device (FK) – Referência ao dispositivo correspondente
- function_name – Nome da função (ex.: ligar, modo frio, temperatura 22°C)
- ir_data – Código hexadecimal do sinal IR

- **Tabela schedule:**

- id_schedule (PK) – Identificador da agenda
- id_device (FK) – Referência ao dispositivo correspondente
- datetime_command – Data e hora de execução do comando
- id_code (FK) – Referência ao código IR a ser enviado
- repeat_pattern – Padrão de repetição (diário, semanal, etc.)

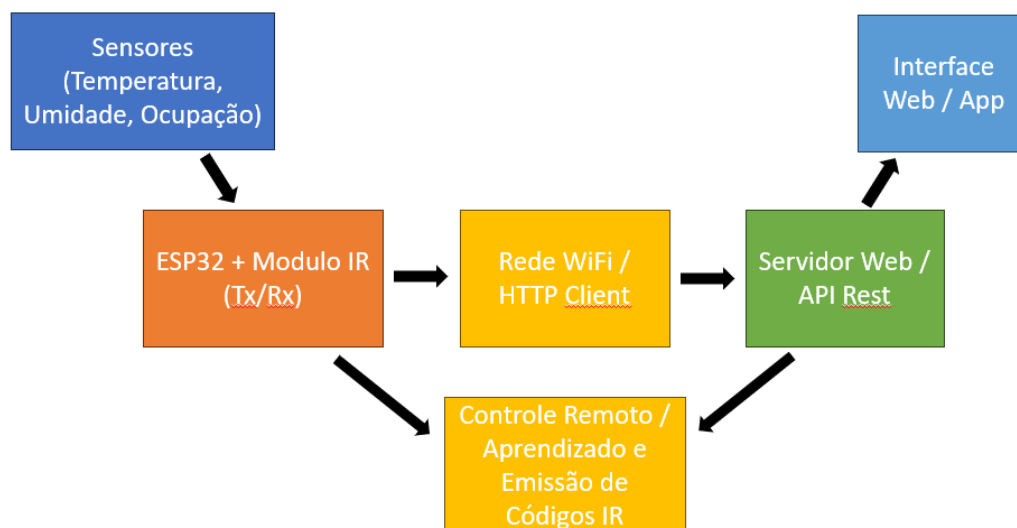
Essa estrutura possibilitou que a plataforma web identificasse cada dispositivo de forma única, recuperasse os códigos de controle correspondentes e executasse comandos agendados sem necessidade de intervenção manual. Além disso, a modelagem relacional permitiu escalabilidade, possibilitando a adição de novos dispositivos e comandos sem impacto significativo na arquitetura existente.

Como mostra a Figura 3, o dispositivo ESP32 está equipado com sensores de temperatura, umidade e ocupação, que ajudam a ter dados confiáveis sobre o funcionamento adequado do condicionador de ar, bem como auxiliam na tomada de decisão para o envio de comandos apropriados. Além dos sensores, o módulo ESP32 tem acoplado um receptor e um transmissor de sinais infravermelho, que possibilitam tanto o aprendizado de novos comandos, como a emissão de sinais para configurar os condicionadores de ar.

Ainda no fluxo apresentado na Figura 3, ve-se que o dispositivo ESP32, conectado à rede WiFi, realiza requisições via protocolo HTTP para o servidor Web. Nesta requisição, o equipamento envia

apenas a sua própria identificação, e o servidor web é responsável por verificar no banco de dados qual é a configuração adequada para aquele condicionador de ar, naquele momento. Através da agenda configurada pela Interface Web, o servidor emite as respostas ao dispositivo, que por sua vez executa os comandos pertinentes.

Figura 3: Fluxo de funcionamento do sistema



Fonte: elaborado pelos próprios autores.

Cada módulo ESP32 foi programado para realizar, a cada 5 segundos, uma requisição HTTP do tipo GET ao servidor central, enviando no cabeçalho ou como parâmetro de URL o seu identificador único (id_device). Este identificador, previamente registrado no banco de dados, permite ao sistema web reconhecer o módulo e associá-lo ao(s) aparelho(s) de ar-condicionado correspondente(s).

No backend, o servidor interpreta essa requisição e consulta a tabela de agenda de comandos (schedule) para verificar se existe alguma instrução pendente para aquele dispositivo. Em seguida, compara o último comando registrado para o módulo com o estado atual armazenado na base de dados.

Caso o último comando seja diferente da configuração atual prevista para o aparelho - por exemplo, se o sistema indica “ligado a 23°C” mas o comando anterior foi “desligado” -, o servidor responde à requisição enviando o código infravermelho correspondente (ir_data). Este código é transmitido pelo emissor IR acoplado ao ESP32 para o receptor do ar-condicionado, garantindo que o equipamento esteja em conformidade com a programação definida.

Essa lógica de comunicação apresenta duas vantagens principais:

- Simplicidade na sincronização – Como o módulo consulta o servidor em intervalos fixos, não é necessário manter conexões persistentes ou complexos protocolos de push, reduzindo o risco de falhas de comunicação.

- Confiabilidade no estado final – O reenvio do comando em caso de discrepância evita situações em que o aparelho permaneça em um estado diferente do planejado devido a falhas temporárias ou perda de sinal.

Nos testes iniciais, o sistema demonstrou boa confiabilidade na execução de comandos agendados, com taxa de sucesso superior a 95% em condições de linha de visada adequada entre o emissor IR e o receptor do ar-condicionado. Pequenas falhas foram registradas em ambientes com interferência de iluminação intensa ou obstáculos, o que reforça a importância do posicionamento estratégico dos módulos. A integração com o banco de dados e o uso de identificadores únicos mostraram-se eficazes para gerenciamento de múltiplos dispositivos de forma centralizada.

Apesar dos resultados positivos obtidos, o presente trabalho apresenta algumas limitações que devem ser consideradas. Em primeiro lugar, a comunicação entre o ESP32 e o servidor depende de uma rede Wi-Fi estável; em ambientes com sinal instável ou congestionado, houve registros de perda temporária de comunicação e atraso na execução dos comandos. Além disso, o sistema de emissão de sinais infravermelhos exige linha de visada entre o transmissor e o receptor do ar-condicionado, o que pode ser comprometido pela disposição física do ambiente ou pela presença de obstáculos.

Outro ponto a destacar é a compatibilidade com diferentes modelos de condicionadores de ar. Embora o sistema tenha sido projetado para armazenar e reproduzir códigos IR, alguns aparelhos utilizam protocolos proprietários complexos ou codificações variáveis, demandando maior esforço de engenharia reversa. A estratégia de consulta periódica (polling) a cada 5 segundos, embora simples e robusta, pode gerar tráfego desnecessário em redes com muitos dispositivos e não é instantânea na execução de comandos.

Como continuidade deste estudo, sugere-se a implementação de um sistema híbrido de comunicação, combinando o método de polling com notificações baseadas em MQTT ou WebSockets para redução de latência e uso de rede. A integração com sensores adicionais, como detecção de presença via PIR ou análise de consumo energético individual por aparelho, também é recomendada para tomada de decisão mais inteligente e economia de energia.

Outra possibilidade é o desenvolvimento de um módulo de aprendizado adaptativo, capaz de identificar padrões de uso e sugerir agendas otimizadas automaticamente. A expansão para protocolos de controle alternativos, como comunicação serial com unidades de ar-condicionado compatíveis, também poderia aumentar a compatibilidade e eliminar a necessidade de emissão IR em alguns casos.

Por fim, a criação de um painel de análise avançada com indicadores de desempenho, gráficos de economia energética e relatórios exportáveis fortaleceria a aplicabilidade do sistema em ambientes institucionais e corporativos, favorecendo sua adoção em larga escala.

5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento e a implementação do sistema de controle centralizado para condicionadores de ar, utilizando módulos ESP32, emissores e receptores infravermelhos e integração com uma plataforma web, demonstraram viabilidade técnica e potencial significativo para otimização do consumo de energia em ambientes institucionais. A solução proposta atendeu ao objetivo geral do trabalho ao permitir o gerenciamento remoto, agendamento de comandos e sincronização automática do estado dos equipamentos, contribuindo para maior conforto térmico e eficiência operacional na instituição de ensino analisada.

Os resultados obtidos evidenciam que a combinação de hardware de baixo custo com protocolos de comunicação simples, como HTTP, pode entregar alto grau de confiabilidade e flexibilidade, mesmo em ambientes complexos. A arquitetura desenvolvida permitiu fácil escalabilidade, possibilitando o cadastro e controle de múltiplos dispositivos a partir de uma única interface web. Além disso, a modelagem do banco de dados mostrou-se eficiente para armazenar informações de dispositivos, códigos IR e agendas de execução, garantindo integridade e rastreabilidade dos comandos enviados.

Apesar das limitações identificadas - como dependência de linha de visada para a comunicação IR e restrições de rede sem fio -, o sistema oferece uma base sólida para evoluções futuras, como integração de sensores adicionais, aprendizado de padrões de uso e suporte a outros protocolos de controle. Dessa forma, o presente trabalho contribui não apenas para a redução de custos e mitigação de impactos ambientais, mas também para a difusão de soluções IoT acessíveis e adaptáveis ao contexto educacional, reforçando seu papel como ferramenta estratégica para a gestão inteligente de recursos.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal de Rondônia (IFRO), Sustentec, Centro Internacional de Tecnologia de Software e Superintendência da Zona Franca de Manaus. Ao DEPESP do *Campus* Porto Velho Calama do IFRO, pelo auxílio na publicação do presente artigo por meio do EDITAL Nº 159/2025/PVCAL - CGAB/IFRO, DE 15 DE AGOSTO DE 2025.

REFERÊNCIAS

- ALVES, A. A. et al. Development of an Internet of Things System for Smart Home HVAC Monitoring and Control. In: Sustainable Energy for Smart Cities. Cham: Springer, 2020. p. 183–194. DOI: 10.1007/978-3-030-45694-8_15.
- AZEVEDO, M. et al. Energy savings by energy management systems: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 56, p. 129–135, 2016.
- BANDYOPADHYAY, D.; SEN, J. Internet of Things: Applications and Challenges in Technology and Standardization. Wireless Personal Communications, v. 58, n. 1, p. 49–69, 2011. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1105.1693>.
- CARLI, R. et al. IoT Based Architecture for Model Predictive Control of HVAC Systems in Smart Buildings. Sensors, v. 20, n. 3, p. 781, 2020. DOI: 10.3390/s20030781.
- FAUCHIER-MAGNAN, N.; MOREJOHN, J.; PRITONI, M. A low-cost centralized HVAC control system solution for energy savings in institutional buildings. In: Proceedings of the ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings. Pacific Grove, CA: ACEEE, 2022.
- IEA – International Energy Agency. The Future of Cooling: Opportunities for energy-efficient air conditioning. Paris: IEA, 2018.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. AR6 Synthesis Report – Summary for Policymakers. Geneva: IPCC, 2023.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Mitigation of Climate Change – Chapter 9: Buildings. Geneva: IPCC, 2022.
- PARK, R. J.; GOODMAN, J.; HURWITZ, M. Heat and learning. American Economic Journal: Economic Policy, v. 12, n. 2, p. 306–339, 2020.
- W3C. Web of Things: Building Blocks and Thing Description. W3C Recommendation, 2025. Disponível em: <https://www.w3.org/WoT/>.
- WEI, T. et al. Reinforcement Learning-Based BEMS Architecture for Energy Management in Buildings. Sensors, v. 20, n. 9, p. 1–17, 2020.
- WIKIPEDIA. Remote control. 2025a. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Remote_control.
- WIKIPEDIA. Consumer IR. 2025b. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Consumer_IR.
- WHO – World Health Organization. Climate change, heat and health – Fact sheet. Geneva: WHO, 2024.
- ZENATIX. How IoT is making HVAC smart and energy-efficient. 2022. Disponível em: <https://zenatix.com/how-iot-is-making-hvac-smart-and-energy-efficient/>.