



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DO TOCANTINS
CAMPUS ARAGUATINS
CURSO SUPERIOR DE LICENCIATURA EM COMPUTAÇÃO**

AGATHA CHRISTIE DANTAS BORGES CLAUDIANO

**SISTEMA DE CONTROLE E MONITORAMENTO DE AR-CONDICIONADO PARA
OTIMIZAÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO EM AMBIENTES INSTITUCIONAIS**

**ARAGUATINS
2025**

AGATHA CHRISTIE DANTAS BORGES CLAUDIANO

**SISTEMA DE CONTROLE E MONITORAMENTO DE AR-CONDICIONADO
PARA OTIMIZAÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO EM AMBIENTES
INSTITUCIONAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do
Curso de Licenciatura em
Computação, do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do
Tocantins – Campus Araguatins, para
a obtenção parcial do grau de
Licenciado em Computação.

Orientador: Prof. Esp. Alan Gomes
Silva

**ARAGUATINS
2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

- C615s Claudiano, Agatha Christie Dantas Borges
 Sistema de controle e monitoramento de ar-condicionado para
 otimização do consumo energético em ambientes institucionais /
 Agatha Christie
 Dantas Borges Claudiano. – Araguatins, TO, 2025.
 42 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Computação) –
 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins,
 Campus Araguatins, Araguatins, TO, 2025.
- Orientador: Esp. Alan Gomes Silva
1. IoT. 2. Eficiência Energética. 3. ESP32. I. Silva, Alan Gomes. II.
 Título.

CDD 004

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)



Ministério da Educação
Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins
Campus Araguatins

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO DO TRABALHO: SISTEMA DE CONTROLE E MONITORAMENTO DE AR-CONDICIONADO PARA OTIMIZAÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO EM AMBIENTES INSTITUCIONAIS

AUTOR: Agatha Christie Dantas Borges Claudiano

ORIENTADOR: Prof. Esp. Alan Gomes Silva

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, *Campus* Araguatins, como parte das exigências para a conclusão do Curso de Licenciatura em Computação.

Aprovado em 03 de dezembro de 2025.

Prof. Esp. Alan Gomes Silva

Presidente da Banca

Prof. Dr.: Ramasio Ferreira de Melo

Primeiro avaliador

Prof. Me. Rogério Pereira de Sousa

Segundo avaliador



Documento assinado eletronicamente por **ALAN GOMES SILVA, Servidor**, em 22/12/2025, às 09:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rogério Pereira de Sousa, Servidor**, em 22/12/2025, às 10:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ramasio Ferreira de Melo, Servidor**, em 06/02/2026, às 20:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.iftto.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2998390** e o código CRC **9FE852D2**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, meu refúgio e minha força quando a vida e a faculdade colocaram desafios que eu duvidava conseguir enfrentar, Ele que me sustentou nos dias de cansaço, acalmou meu coração nas incertezas e me guiou.

À minha família, base da minha existência. Mainha Juvanisa Dantas, por me criar com amor e firmeza e plantar em mim valores que levarei para sempre. À minha mãe, Jocineide Dantas, que sempre fez o possível e o impossível por mim. Às minhas tias Jocicleide Dantas, Josimeire Dantas e Jovaneide Dantas, por contribuírem com minha formação e me ensinarem o valor do estudo. E à minha irmã Maria Clara Dantas, com quem aprendi que irmandade é apoio e crescimento conjunto. Cada um de vocês compõe quem me tornei.

À minha amiga Ana Lívia Ferreira, minha parceira de caminhada, que mesmo em cursos diferentes, esteve comigo nas risadas, nos surtos e nos momentos em que tudo parecia demais, sua amizade foi apoio, respiro e companhia essencial. E às minhas amigas Mayelle Araújo, Hallanna Sena e Michelle Duarte, obrigada por me levantarem nos dias duros e por me lembrarem do meu valor quando eu mesma duvidava.

Sou grata também a todos os colegas de curso, pelas trocas, dúvidas e descobertas compartilhadas. Em especial ao Roger Alves, parceiro essencial no desenvolvimento do projeto ARCA, pela dedicação e por caminhar comigo até que tudo tomasse forma.

Ao meu orientador, professor Alan Gomes Silva, deixo um agradecimento imenso. Obrigado por confiar em mim, por acolher um projeto tão significativo e por me orientar com paciência, clareza e dedicação. Sou igualmente grata a professora Jeane Cristina de Oliveira, que foi muito mais que uma educadora, sendo apoio e cuidado em momentos importantes da minha caminhada, a Lucinalva Ferreira, que me despertou o amor pela educação, e aos professores Rogério Pereira e Ramasio Melo, que acenderam em mim a paixão pela computação e pelos desafios que ela nos permite solucionar.

Ao IFTO, instituição que transformou minha vida, ampliando meus horizontes e me proporcionando experiências que me moldaram profundamente.

E agradeço, com carinho, a mim mesma por persistir, por me reinventar, por continuar apesar do medo. Este trabalho é o reflexo das quedas, esforços e superações que me trouxeram até aqui.

Mais importante do que interpretar o mundo,
é contribuir para transformá-lo.

(Karl Marx)

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de controle e monitoramento para aparelhos de ar-condicionado voltado à otimização do consumo energético em ambientes institucionais. O protótipo foi construído utilizando o microcontrolador ESP32 e sensores específicos para análise das condições do ambiente, como o sensor DHT22 para leitura de temperatura e umidade, o sensor de presença PIR HC-SR501 para detecção de ocupação e um emissor infravermelho para envio dos comandos ao equipamento de climatização. A integração desses componentes permite identificar automaticamente quando o ambiente está vazio e ajustar o funcionamento do ar-condicionado, reduzindo o tempo de operação e evitando desperdícios comuns em salas que permanecem ligadas sem necessidade. Os testes realizados no IFTO – Campus Araguatins demonstraram que o sistema é capaz de diminuir de forma consistente o uso indevido dos equipamentos, representando uma solução prática, acessível e de fácil aplicação em ambientes educacionais. Diante do elevado consumo associado à climatização, a proposta apresentada se mostra relevante por oferecer um meio eficiente de racionalizar o uso da energia elétrica, contribuindo para a redução de custos e para práticas institucionais de sustentabilidade.

Palavras-chaves: IoT. Eficiência Energética. ESP32.

ABSTRACT

This work presents the development of a control and monitoring system for air conditioning units aimed at optimizing energy consumption in institutional environments. The prototype was built using the ESP32 microcontroller and specific sensors for environmental analysis, including the DHT22 sensor for temperature and humidity measurement, the PIR HC-SR501 sensor for occupancy detection, and an infrared emitter responsible for sending commands to the air conditioning equipment. The integration of these components allows the system to automatically identify when a room is unoccupied and adjust the operation of the air conditioner, reducing its operating time and preventing the common waste associated with units left running without need. Tests carried out at IFTO – Araguatins Campus demonstrated that the system consistently decreases improper use of the equipment, representing a practical, low-cost, and easily applicable solution for educational environments. Considering the high energy demand associated with air conditioning, the proposed system proves to be relevant by offering an efficient way to rationalize electricity use, contributing to cost reduction and supporting institutional sustainability practices.

Keywords: IoT. Energy Efficiency. ESP32.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Problema da Pesquisa.....	10
1.2 Justificativa	10
1.3 Objetivos	11
1.3.1 Objetivo geral.....	11
1.3.2 Objetivos específicos	11
2 REVISÃO DE LITERATURA	12
2.1 Eficiência Energética em Instituições	12
2.2 Internet das Coisas (IoT)	13
2.3 O microcontrolador ESP32.....	13
2.4 Sensores e Atuadores	15
2.4.1 Sensor de Temperatura e Umidade DHT22	16
2.4.2 Sensor de Presença PIR HC-SR501.....	16
2.4.3 Módulo Transmissor IR	18
2.5 Ambiente de Desenvolvimento	20
2.6 Trabalhos Relacionados e Análise Comparativa.....	20
2.6.1 Comparação com Sistemas de Mercado e a Barreira de Custo	20
2.6.2 Análise de Trabalhos Acadêmicos Semelhantes.....	21
2.6.3 Diferenciais e Posicionamento do Projeto ARCA	21
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	22
3.1 Arquitetura Geral do Sistema.....	22
3.2 Materiais Utilizados	23
3.2.1 Hardware	24
3.2.2 Software e Bibliotecas.....	24
3.3 Montagem do Protótipo.....	25
3.3.1 Diagrama Esquemático.....	25
3.3.2 Descrição das Conexões	26

3.4 Desenvolvimento do Firmware e Lógica de Controle	27
3.5 Arquitetura de Comunicação e Interface.....	28
3.6 Procedimentos de Teste e Validação	28
3.6.1 Validação de Desempenho e Funcionalidade	28
3.6.2 Análise Quantitativa do Impacto Energético.....	30
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
4.1 Implementação Física do Protótipo.....	31
4.2 Validação Funcional dos Sensores	32
4.2.1 Responsividade do Sensor PIR (Presença)	32
4.2.2 Estabilidade do Sensor DHT22 (Temperatura).....	33
4.3 Validação do Atuador e da Lógica de Controle	33
4.3.1 Eficácia do Módulo Transmissor IR.....	33
4.3.2 Comprovação da Lógica de Otimização.....	33
4.3.3 Validação da Interface de Monitoramento	35
4.4 Análise Quantitativa do Impacto Energético.....	36
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	38
REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

O consumo de energia em instituições públicas de ensino é fortemente influenciado pelo uso contínuo de sistemas de climatização, especialmente em salas de aula e ambientes administrativos que permanecem ocupados ao longo de todo o dia. Em cenários onde a climatização representa parcela relevante da demanda elétrica, estratégias de gestão inteligente tornam-se essenciais para equilibrar conforto térmico e sustentabilidade, reduzindo desperdícios sem comprometer a qualidade do ambiente (VALIANTE; SILVA, 2025).

Nos prédios públicos, esse desafio é ainda mais evidente devido à limitação de mecanismos de monitoramento e à dependência de ações manuais, o que frequentemente resulta no funcionamento desnecessário de aparelhos de ar-condicionado em períodos de ausência de usuários. Medidas simples de supervisão e controle, especialmente quando apoiadas por tecnologias acessíveis, têm potencial para gerar reduções significativas de consumo e impacto financeiro positivo (MME; CEPEL, 2015).

O avanço de tecnologias digitais reforça essas possibilidades. A Internet das Coisas permite integrar sensores e equipamentos a sistemas capazes de monitorar condições ambientais, detectar presença e automatizar processos de forma contínua. Essa conectividade amplia o controle sobre o uso de recursos, tornando possível ajustar o funcionamento dos equipamentos às reais necessidades do ambiente (LACERDA, 2015).

Nesse contexto, surge o Projeto ARCA – Administração e Redução de Consumo para Ar-condicionado, uma solução desenvolvida para otimizar o uso dos condicionadores de ar em instituições de ensino. O ARCA monitora temperatura, umidade e ocupação, tomando decisões automáticas para evitar acionamentos desnecessários e reduzir o desperdício energético, sem exigir intervenção constante dos usuários. Por ser de baixo custo e fácil implementação, o sistema oferece uma alternativa prática para instituições que buscam maior eficiência operacional e uso responsável da energia.

1.1 Problema da Pesquisa

De que maneira o desenvolvimento de um protótipo de baixo custo, baseado no microcontrolador ESP32 e sensores ambientais, pode contribuir para a otimização do consumo energético de ar-condicionado em ambientes institucionais?

1.2 Justificativa

O presente trabalho se insere no contexto da urgência em otimizar os recursos energéticos em edificações públicas, um desafio que impacta diretamente a sustentabilidade econômica e ambiental. No Instituto Federal do Tocantins (IFTO) – Campus Araguatins, o problema é notório, a fatura de energia referente a Outubro/2025 registrou um consumo total de 82.600,56 kWh, resultando em um custo de R\$ 87.742,56. Com 84 unidades de ar-condicionado instaladas, este equipamento é o principal vetor dessa carga. Rocha (2012) destaca que o consumo dos sistemas de ar-condicionado e de iluminação, juntos, respondem por mais de 70% da energia elétrica de um prédio público típico. O principal fator de desperdício, neste cenário, é o erro humano, traduzido no esquecimento de equipamentos ligados em salas desocupadas.

O Projeto ARCA surge como uma alternativa viável às soluções de gestão predial comercial (Building Management Systems – BMS), que são frequentemente inacessíveis devido ao alto custo e complexidade, o que inviabiliza sua adoção pelo orçamento público. A proposta é desenvolver um sistema de controle e monitoramento de baixo custo baseado em tecnologia da Internet das Coisas (IoT). Borges (2024) ressalta que a IoT se destaca globalmente ao permitir a interconexão entre objetos físicos e sistemas digitais.

A viabilidade técnica e econômica do protótipo é sustentada pelo seu hardware, onde é utilizado o microcontrolador ESP32, que é a unidade de processamento central, cuja escolha é validada por Ramos (2021), que em seus estudos enfatiza que o uso do ESP32 em aplicações IoT é notável pela sua robustez, conectividade e custo-benefício. A seleção de componentes acessíveis, como o sensor PIR e o transmissor IR, valida o caráter de baixo custo do ARCA, tornando a solução economicamente

escalável para a replicação no campus.

A principal contribuição técnica e acadêmica reside na prova de conceito da arquitetura de controle autônomo com processamento local, que garante a resiliência e a tolerância a falhas de rede. Essa robustez funcional, somada ao impacto quantitativo, justifica a pesquisa: a análise de resultados projeta uma significativa economia financeira mensal de R\$ 15.066,20. Este resultado final estabelece o ARCA como um modelo tecnicamente validado e economicamente viável para a gestão energética sustentável do Instituto Federal do Tocantins.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Desenvolver um protótipo funcional e de baixo custo, baseado no microcontrolador ESP32, para o controle e monitoramento autônomo de aparelhos de ar-condicionado, demonstrando uma solução acessível e viável para a otimização do consumo energético em ambientes institucionais.

1.3.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Estudar os conceitos de eficiência energética e as tecnologias de automação aplicáveis ao projeto.
- Especificar e selecionar os componentes eletrônicos do protótipo, priorizando soluções de baixo custo, código aberto e fácil aquisição.
- Montar o circuito eletrônico do protótipo, detalhando o diagrama esquemático e as conexões físicas entre os componentes.
- Desenvolver o firmware (software embarcado) em C++ para o ESP32, implementando a lógica de leitura dos sensores e o controle do ar-condicionado.
- Implementar a lógica de controle autônomo, capaz de gerenciar o aparelho com base na detecção de presença e nos níveis de temperatura.

- Validar o funcionamento do protótipo por meio de testes funcionais em ambiente controlado, verificando a eficácia da solução de baixo custo na automação do aparelho.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo apresenta os conceitos fundamentais que norteiam o desenvolvimento do protótipo, abordando desde a problemática do consumo energético até as tecnologias de hardware e software utilizadas na solução proposta.

2.1 Eficiência Energética em Instituições

A gestão do consumo de recursos em edificações públicas é um pilar da sustentabilidade e responsabilidade fiscal. No centro dessa gestão está o conceito de eficiência energética, que, segundo Lima (2018), se resume em utilizar menos energia para produzir o mesmo conforto ou serviço. Ou seja, o foco não é cortar o uso, mas sim otimizá-lo.

A implementação dessa otimização contribui diretamente para a saúde financeira e ambiental das organizações. Conforme destacam D’Albuquerque et al. (2017), a implementação da eficiência energética pode contribuir para o equilíbrio das contas públicas e com a sustentabilidade organizacional, uma vez que impacta nas esferas social, econômica e ambiental. Em instituições de ensino, onde o orçamento é constantemente desafiado, a redução dos custos operacionais de energia representa um ganho imediato.

Neste cenário, a climatização surge como o ponto de maior atenção. No Brasil, o ar-condicionado representa uma parcela significativa da demanda energética em edificações, elevando custos operacionais e contribuindo para o desperdício de recursos (Pangoni & Barbosa, 2023). Esse desperdício é frequentemente potencializado pelo fator comportamental, onde o esquecimento de aparelhos ligados em salas vazias ou a operação em temperaturas não ideais elevam a demanda energética de forma desnecessária.

Dessa forma, a aplicação de tecnologias de automação em sistemas de climatização não é apenas uma modernização, mas uma medida ativa e indispensável para garantir que a energia seja consumida de maneira inteligente, eliminando o erro humano e alinhando a operação da infraestrutura com os princípios de eficiência.

2.2 Internet das Coisas (IoT)

O avanço da Internet das Coisas (IoT) fundamenta o desenvolvimento de soluções voltadas à automação e monitoramento em tempo real. Diferentemente da simples conexão entre computadores, a IoT conecta dispositivos físicos em rede, possibilitando o processamento e a troca de dados de forma integrada (Wollschlaeger; Sauter; Jasperneite, 2017).

Sua principal contribuição para a automação predial é transformar dados brutos em ações inteligentes. Conforme Cavalcante (2018), a IoT permite a coleta contínua de dados e o controle remoto de dispositivos. No caso da climatização, variáveis como temperatura e presença humana deixam de ser apenas observadas para se tornarem gatilhos que orientam decisões automatizadas do sistema.

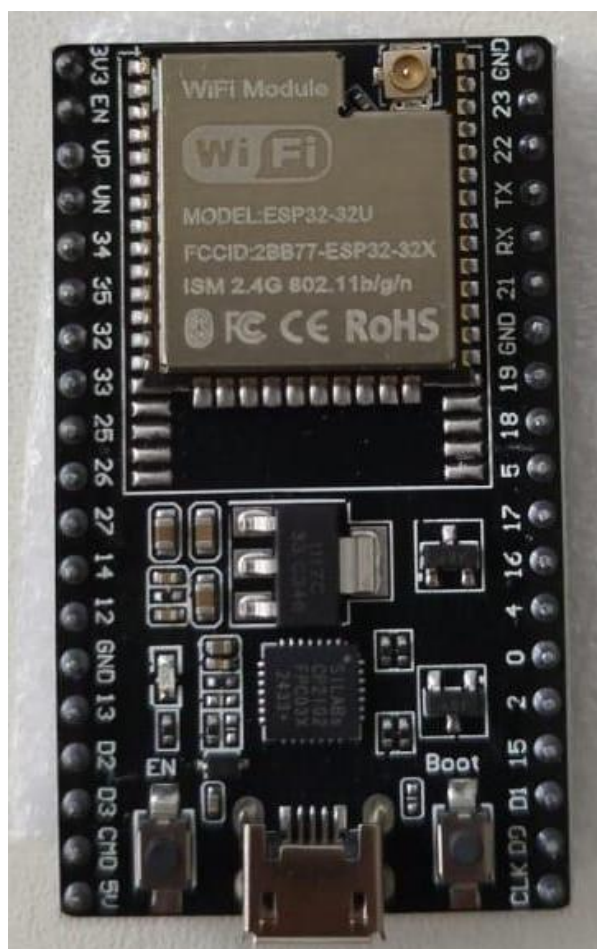
Esse paradigma é especialmente relevante em grandes instituições, como universidades, onde Oliveira e Dusse (2024) destacam a transformação dos campi em laboratórios vivos para tecnologias IoT, buscando a concretização dos chamados Campus Inteligentes. O protótipo desenvolvido integra-se a esse contexto como um nó IoT, descentralizando o controle e promovendo uma gestão eficiente do consumo energético.

2.3 O microcontrolador ESP32

O microcontrolador é o núcleo lógico do protótipo, responsável por executar o firmware, processar informações e estabelecer comunicação com os periféricos. Para esta aplicação, adotou-se o ESP32, um *System on Chip* (SoC) da Espressif Systems, amplamente utilizado em soluções de Internet das Coisas.

Seu uso é consolidado em projetos de IoT devido às capacidades integradas de Wi-Fi e Bluetooth, essenciais para aplicações que dependem de conectividade sem fio estável e contínua (ESPRESSIF, 2025). A integração desses módulos ao processador reduz a complexidade do hardware e viabiliza a construção de dispositivos conectados de forma eficiente.

Figura 1 – Microcontrolador ESP32

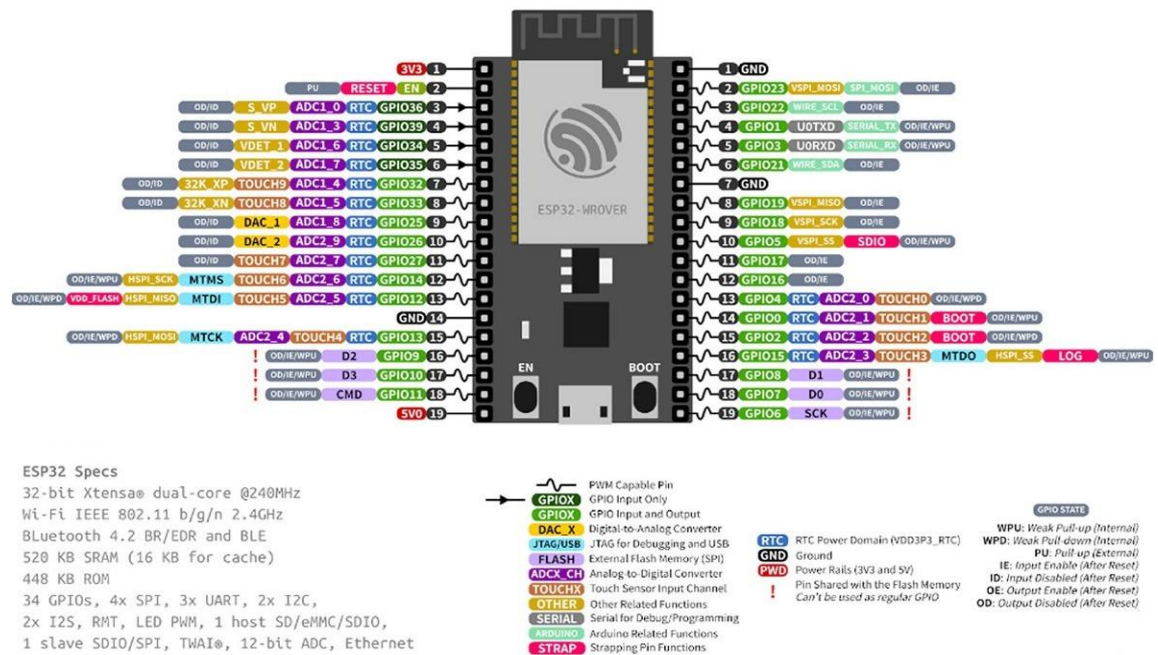


Fonte: Autor (2025).

O ESP32 oferece desempenho superior em relação a microcontroladores tradicionais, com maior capacidade de processamento e memória, o que garante maior confiabilidade na execução de sistemas IoT (ARTUR, 2023). Sua arquitetura permite que tarefas de monitoramento e controle sejam realizadas localmente, atendendo ao princípio de que dispositivos podem ser gerenciados remotamente por meio de terminais móveis, como destacado por Pereira (2020).

A interface física do microcontrolador é composta pelos Pinos de Propósito Geral de Entrada e Saída (GPIOs), que permitem a integração com sensores e atuadores. O ESP32 disponibiliza uma variedade de pinos digitais e analógicos, tornando-o capaz de controlar diversos dispositivos e módulos (GOMES, 2023).

Figura 2 – Pinagem do ESP32 (GPIO)



Fonte: UsaInfo.

No protótipo, esses GPIOs permitem a leitura dos sensores e o acionamento do módulo transmissor infravermelho, assegurando o funcionamento do ciclo de automação.

2.4 Sensores e Atuadores

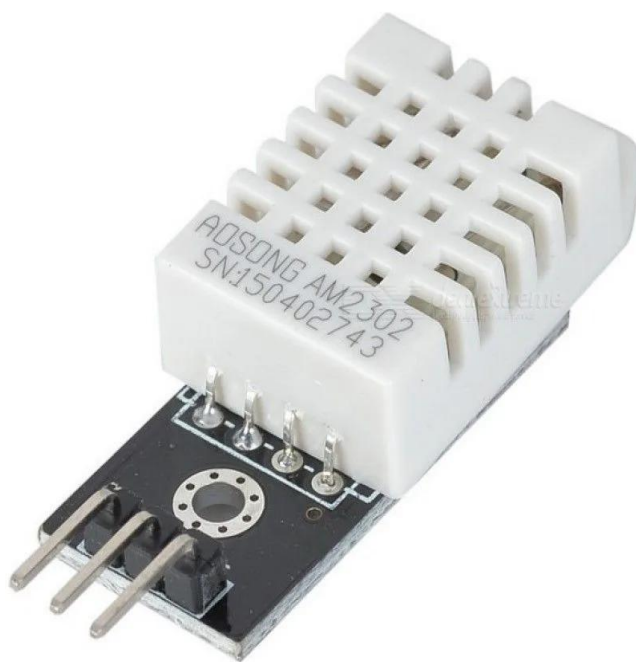
Esta seção descreve os componentes periféricos que possibilitam a interação do microcontrolador com o ambiente físico. Os sensores fornecem os dados de entrada para a lógica de automação, enquanto o atuador converte a decisão do *firmware* em uma ação física de controle sobre o equipamento de climatização.

2.4.1 Sensor de Temperatura e Umidade DHT22

O monitoramento das condições térmicas e higrométricas do ambiente é realizado pelo sensor digital DHT22, este sensor é essencial para a regra de conforto, pois fornece os dados que definem se o ambiente precisa de resfriamento.

Sua principal característica reside na sua precisão e facilidade de uso, fornecendo leituras de temperatura e umidade já calibradas. Conforme afirma Freitas (2018), o sensor se destaca por possuir um microchip embarcado que realiza a conversão analógico-digital internamente, oferecendo resultados por meio de um pino de dados digitais. Essa funcionalidade garante a consistência dos dados de entrada para a lógica de automação.

Figura 3 – Sensor de Temperatura e Umidade DHT22



Fonte: HUBOT.

2.4.2 Sensor de Presença PIR HC-SR501

A detecção de ocupação da sala, vital para a lógica de economia de energia, é realizada pelo sensor passivo infravermelho (PIR) modelo HC-SR501. O sensor PIR é um dispositivo eletrônico utilizado para detectar a presença de seres vivos ou objetos

em movimento com base nas emissões de calor infravermelho (GAMI, 2018). Seu princípio de funcionamento baseia-se na variação da radiação infravermelha captada por um componente piroelétrico. O PIR não detecta objetos estáticos, mas sim o movimento de pessoas.

Figura 4 – Sensor de Movimento Presença PIR HC-SR501



Fonte: Eletrogate.

Este modelo de PIR se destaca pela facilidade de uso e customização, pois possui a possibilidade de ajuste de tempo de delay, sensibilidade e configuração de trigger, tornando assim fácil o seu uso em projetos básicos que necessitam verificar a presença humana (ADAFRUIT INDUSTRIES, 2014).

A eficácia do sensoriamento é determinada pelas características físicas do componente, que exigem uma análise mais detalhada para a confiabilidade do sistema ARCA.

- Campo de Visão e Distância Máxima: A área de atuação do sensor PIR é dimensionada pela abertura horizontal de sua lente de Fresnel e pela distância máxima de sua atuação (SILVA, 2013). O HC-SR501, em sua configuração padrão, oferece um campo de visão angular de aproximadamente 110° e 120°, além de uma distância máxima de detecção ajustável, nominalmente entre 3 e

7 metros. Essa amplitude é um fator crítico na determinação do posicionamento ideal do protótipo na sala, garantindo a cobertura total do ambiente.

- **Sensibilidade e Taxa de Erro:** A sensibilidade do sensor é ajustável através de um potenciômetro, permitindo que o sistema seja calibrado para ignorar ruídos irrelevantes. Uma sensibilidade muito alta, embora maximize o alcance, aumenta a chance de falsos positivos, elevando a taxa de erro de acionamento. O ajuste fino é essencial para que o sistema não mantenha o ar-condicionado ligado desnecessariamente, comprometendo a economia de energia proposta.
- **Limitações Operacionais (Tempo de Bloqueio):** Uma limitação inerente aos sensores PIR é o tempo de bloqueio (Block Time) ou tempo morto, que é um período fixo, tipicamente de 2,5 segundos, após a detecção de um pulso. Durante esse tempo, o sensor é intencionalmente desativado para se estabilizar, ignorando quaisquer novos movimentos. Essa característica deve ser considerada na lógica de firmware, para que o sistema de controle não interprete essa breve e forçada inatividade como uma ausência real do usuário.

No contexto deste protótipo, o PIR atua como o principal gatilho para a ativação e desativação do temporizador de ausência no *firmware*, determinando o estado de ocupação da sala. A customização do *trigger* para o modo repetível garante que o movimento contínuo mantenha a sala no estado "Ocupada", prevenindo o desligamento automático.

2.4.3 Módulo Transmissor IR

O Módulo Transmissor Infravermelho (IR) é um componente de atuação utilizado em sistemas de controle remoto, cuja função é a emulação de sinal. Este método permite a comunicação não invasiva com diversos equipamentos eletrônicos (Newton Braga, 2011).

O módulo empregado neste protótipo é um componente de alta potência (1W a 3W), com tensão de operação de 5V e capacidade de emissão em 940 nm, o que o diferencia dos módulos padrão. Sua característica técnica mais relevante é o alcance linear de emissão de 30-40 metros, superando amplamente os limites de tubos

infravermelhos comuns e tornando-o ideal para o controle de equipamentos em grandes ambientes (ALIEXPRESS, 2025).

Figura 5- Módulo Transmissor Infravermelho de Alta Potência



Fonte: AlieExpress.

O seu funcionamento baseia-se na conversão de pulsos digitais (recebidos do microcontrolador) em luz infravermelha codificada. O componente principal é um LED emissor que opera tipicamente na frequência modulada de 38 kHz, um padrão industrial que garante a compatibilidade com receptores de aparelhos como o ar-condicionado. Adicionalmente, o ângulo de emissão de 120 graus (ALIEXPRESS, 2025) otimiza a cobertura de ambientes amplos. Com essa capacidade de transmissão em alta potência, este módulo permite o controle de equipamentos infravermelhos através de programação própria, sendo adequado para diversas aplicações.

2.5 Ambiente de Desenvolvimento

O desenvolvimento do firmware para o protótipo foi realizado utilizando a Arduino IDE (Integrated Development Environment), programada em linguagem C/C++. A escolha desta IDE é justificada pela sua natureza open-source.

Apesar do nome, a Arduino IDE é uma ferramenta robusta para a compilação de programas a serem enviados para diversos microcontroladores. Ela possui compatibilidade com vários tipos de placas, incluindo o ESP32 (MARTINS, 2019).

Além disso, a ampla adoção e a vasta comunidade de desenvolvimento são vantagens decisivas. A IDE do Arduino oferece uma vasta biblioteca para diversos tipos de dispositivos, sensores e serviços (MACIEL, 2024). Essa disponibilidade de recursos simplifica a integração de todos os componentes do protótipo e ao ESP32, acelerando o processo de prototipagem e garantindo a confiabilidade do código.

2.6 Trabalhos Relacionados e Análise Comparativa

A viabilidade do projeto depende do seu posicionamento frente às soluções de mercado e aos desenvolvimentos acadêmicos correlatos, comprovando a originalidade da proposta.

2.6.1 Comparação com Sistemas de Mercado e a Barreira de Custo

A gestão de grandes cargas energéticas em edifícios, como em campus educacionais, é tipicamente realizada por Building Energy Management Systems (BEMS). Embora sejam soluções de alto desempenho, sua principal limitação para o setor público é o elevado custo de implementação e a complexidade de manutenção.

O protótipo foi intencionalmente concebido como uma alternativa de baixo custo para preencher essa lacuna. O foco é otimizar o consumo da climatização, que é a maior carga individual de um prédio institucional, utilizando hardware acessível, diferente da abrangência de um sistema BEMS completo.

2.6.2 Análise de Trabalhos Acadêmicos Semelhantes

A literatura em IoT e automação para eficiência energética oferece a base para o desenvolvimento do ARCA, validando os componentes centrais:

- Viabilidade do Controle Não Invasivo: Trabalhos como os de Santos (2021), em que foi desenvolvido o SResfri Gestão, e Valiante e Silva (2025) demonstram a eficácia do controle de ar-condicionado através da emulação de sinais infravermelhos (IR) via microcontroladores (Arduino ou ESP32). Esses estudos estabelecem que a técnica não invasiva é funcional e viável para gerenciamento remoto de equipamentos de refrigeração.
- Controle por Variáveis: Outros projetos exploraram o controle por variáveis específicas. Dias Júnior (2022) validou uma lógica de otimização residencial que desliga o aparelho com base na temperatura definida pelo usuário. O trabalho SResfri Gestão (SANTOS, 2021) também foca no controle da umidade e temperatura ideal em um ambiente.

2.6.3 Diferenciais e Posicionamento do Projeto ARCA

O protótipo proposto é diferente dos trabalhos relacionados por sua lógica de automação descentralizada e seu foco no erro humano:

- Lógica Autônoma de Presença (Foco na Economia): Diferentemente do sistema centralizado de Valiante e Silva (2025), que depende de um servidor para agendamento, o ARCA opera com lógica embarcada. A decisão de desligamento é acionada autonomamente pelo sensor de presença (PIR) e pelo timeout interno de 15 minutos, resolvendo o problema de esquecimento de equipamentos ligados em salas vazias.
- Solução Escalável e Acessível: Ao empregar o microcontrolador ESP32 com Wi-Fi (em seu TCC) e componentes de baixo custo, o ARCA oferece uma solução IoT que pode ser facilmente replicada em todas as salas do campus, algo não abordado pela complexidade de grandes sistemas.

- **Combinação de Lógicas:** O ARCA combina a Regra de Conforto (ligar se estiver quente) com a Regra de Economia (desligar se estiver vazio), utilizando a comprovação de presença como o gatilho primário para otimização energética.

Esta análise confirma que, embora a tecnologia do ARCA utilize componentes e técnicas já validadas na academia, a arquitetura de controle autônomo para otimização energética por presença e baixo custo representa uma proposta inovadora e estrategicamente relevante para instituições de ensino.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo apresenta a metodologia empregada no desenvolvimento e na validação do protótipo de controle de ar-condicionado. A pesquisa possui caráter experimental, conforme Gil (2008), que a define como aquela em que o pesquisador manipula variáveis e controla condições com o objetivo de testar hipóteses e verificar a eficácia de uma solução proposta.

No contexto deste trabalho, essa metodologia se materializa na construção de um sistema de hardware e software de baixo custo. As etapas envolvem a definição da arquitetura geral do sistema, a montagem física do dispositivo, o desenvolvimento do firmware e a realização de testes sistemáticos destinados a avaliar o desempenho e a funcionalidade do protótipo.

3.1 Arquitetura Geral do Sistema

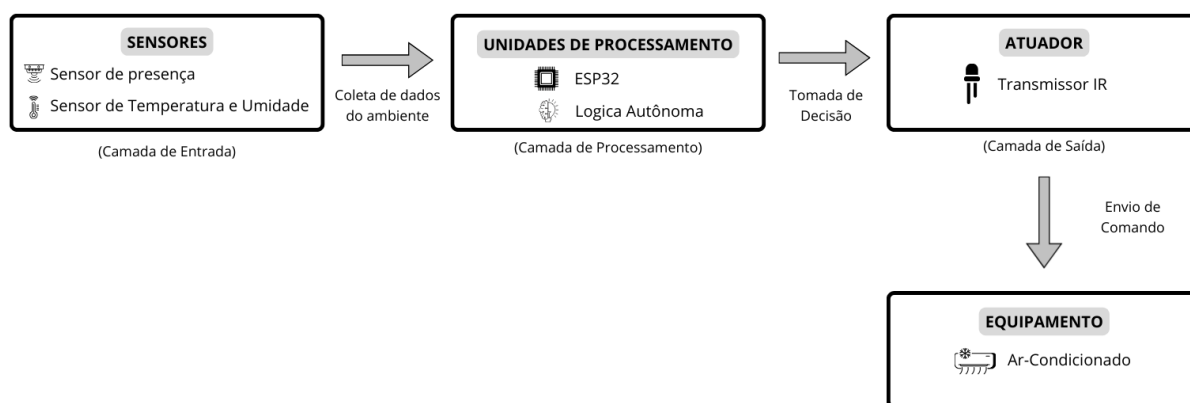
A arquitetura do protótipo foi concebida para operar de forma autônoma, garantindo que a lógica de decisão seja executada localmente no dispositivo. Esta abordagem assegura o funcionamento da automação de economia de energia independentemente de uma conexão com a internet e reforça o objetivo de baixo custo do projeto, ao não exigir uma infraestrutura de servidores complexa para a funcionalidade central.

- **Camada de Entrada (Sensoriamento):** Responsável por coletar os dados brutos do ambiente. É composta pelo Sensor de presença (PIR HC-SR501) , que

detecta movimento humano, e pelo Sensor de Temperatura e Umidade (AM2302/DHT22) , que mede as condições térmicas da sala.

- Camada de Processamento (Controle): O núcleo do sistema, centralizado no microcontrolador ESP32. Ele recebe os dados da Camada de Entrada, executa a Lógica Autônoma embarcada e realiza a "Tomada de Decisão" sobre quando uma ação de controle deve ser executada.
- Camada de Saída (Atuação): Composta pelo Transmissor Infravermelho (IR) , que recebe o comando lógico da Camada de Processamento e o converte em um sinal infravermelho ("Envio de Comando"), simulando o controle remoto para ligar ou desligar o Ar-Condicionado.

Figura 6 – Arquitetura Geral do Sistema



Fonte: Autor (2025).

Este modelo de arquitetura em camadas separa as responsabilidades do sistema, facilitando o desenvolvimento, os testes e futuras manutenções, ao mesmo tempo em que mantém a simplicidade e o baixo custo do protótipo.

3.2 Materiais Utilizados

A seleção de materiais foi um pilar deste projeto, alinhada diretamente ao objetivo de desenvolver uma solução de baixo custo e alta replicabilidade. Foram priorizados componentes de hardware de fácil aquisição e código aberto, além de bibliotecas de software que aceleram o desenvolvimento e são mantidas pela comunidade.

3.2.1 Hardware

Os componentes de hardware foram escolhidos por sua excelente relação custo-benefício e adequação técnica ao problema. O ESP32 foi selecionado como unidade central de processamento, com Wi-Fi integrado, que foi essencial para a facilidade do projeto e capacidade de processamento suficiente para a lógica autônoma. Os sensores PIR HC-SR501 e AM2302 (DHT22) foram escolhidos por serem soluções acessíveis, de simples integração e com precisão adequada para o monitoramento de presença e temperatura ambiente. O **Quadro 1** detalha os componentes de hardware essenciais e suas respectivas funções no protótipo.

Quadro 1 – Componentes utilizados no projeto e suas funções

COMPONENTES	FUNÇÕES
ESP32	Microcontrolador responsável pelo gerenciamento de sensores, lógica de automação e envio de comandos ao ar-condicionado
Sensor PIR HC-SR501	Deteção de presença e movimento humano no ambiente
Sensor AM2302 (DHT22)	Mede a temperatura e a umidade do ambiente em tempo real
Módulo transmissor IR	Envia os comandos de ligar, desligar para o ar-condicionado
Placa de expansão	Facilita as conexões elétricas entre o ESP32 e os sensores
Jumpers	Cabos para conexões elétricas entre os módulos

Fonte: Autor (2025).

3.2.2 Software e Bibliotecas

O firmware do protótipo foi desenvolvido em linguagem C++ utilizando o ambiente de desenvolvimento (IDE) do Arduino, devido à sua simplicidade, vasta comunidade e grande disponibilidade de bibliotecas. Para garantir o funcionamento correto e abstrair a complexidade de comunicação com os componentes, foram utilizadas as seguintes bibliotecas-chave:

- **AM2302-Sensor.h**: Biblioteca utilizada para realizar a comunicação e a leitura dos dados digitais de temperatura e umidade do sensor AM2302 (DHT22).
- **IRremote.hpp**: Biblioteca fundamental para o projeto, responsável por modular e enviar os sinais infravermelhos no protocolo correto para o ar-condicionado.
- **ac_LG.hpp**: Uma classe de extensão (helper) da IRremote, que simplifica o envio de comandos específicos para aparelhos LG, dispensando a captura manual dos códigos IR.
- **WiFi.h**: Esta é a biblioteca nativa do ESP32 responsável por gerenciar a conectividade de rede. Ela foi utilizada para conectar o microcontrolador à rede Wi-Fi local, fornecendo a base de comunicação para o envio de dados.
- **PubSubClient.h**: Esta biblioteca implementa o protocolo MQTT. Operando sobre a conexão Wi-Fi estabelecida pela WiFi.h, ela permitiu ao protótipo conectar-se a um broker, publicar os dados dos sensores e receber comandos.

3.3 Montagem do Protótipo

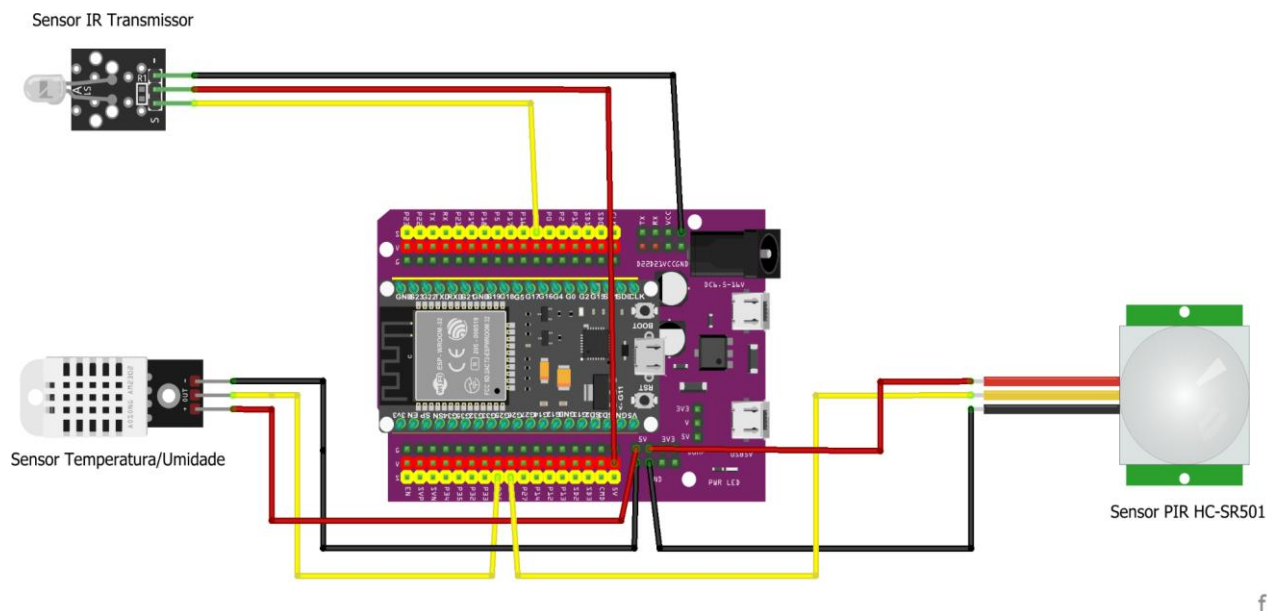
A montagem física do protótipo é a etapa onde os componentes de hardware, listados na Seção 3.2.1, são integrados eletricamente. Para garantir a clareza, a replicabilidade e a correta instalação, a montagem foi baseada em um diagrama esquemático detalhado.

3.3.1 Diagrama Esquemático

Para a representação visual do circuito, foi utilizado o software Fritzing, uma ferramenta de código aberto voltada para a prototipagem eletrônica. O diagrama

esquemático, apresentado na Figura 7, ilustra todas as conexões entre o microcontrolador ESP32, os sensores e o atuador.

Figura 7 – Diagrama esquemático do protótipo



Fonte: Autor (2025).

3.3.2 Descrição das Conexões

As pinagens (GPIOs - General Purpose Input/Output) do ESP32 foram definidas no firmware e são cruciais para o funcionamento do sistema. As principais conexões de dados são:

- **GPIO 26:** Conectado ao pino de sinal (OUT) do Sensor de presença PIR HC-SR501.
- **GPIO 25:** Conectado ao pino de dados (DATA) do Sensor de Temperatura e Umidade AM2302.
- **GPIO 4:** Conectado ao pino de sinal (DATA) do Módulo Transmissor IR.

As conexões de alimentação (VCC) e Terra (GND) de cada componente foram conectadas às saídas de 5V, 3.3V e GND da placa de expansão, respectivamente, seguindo as especificações de tensão de cada módulo.

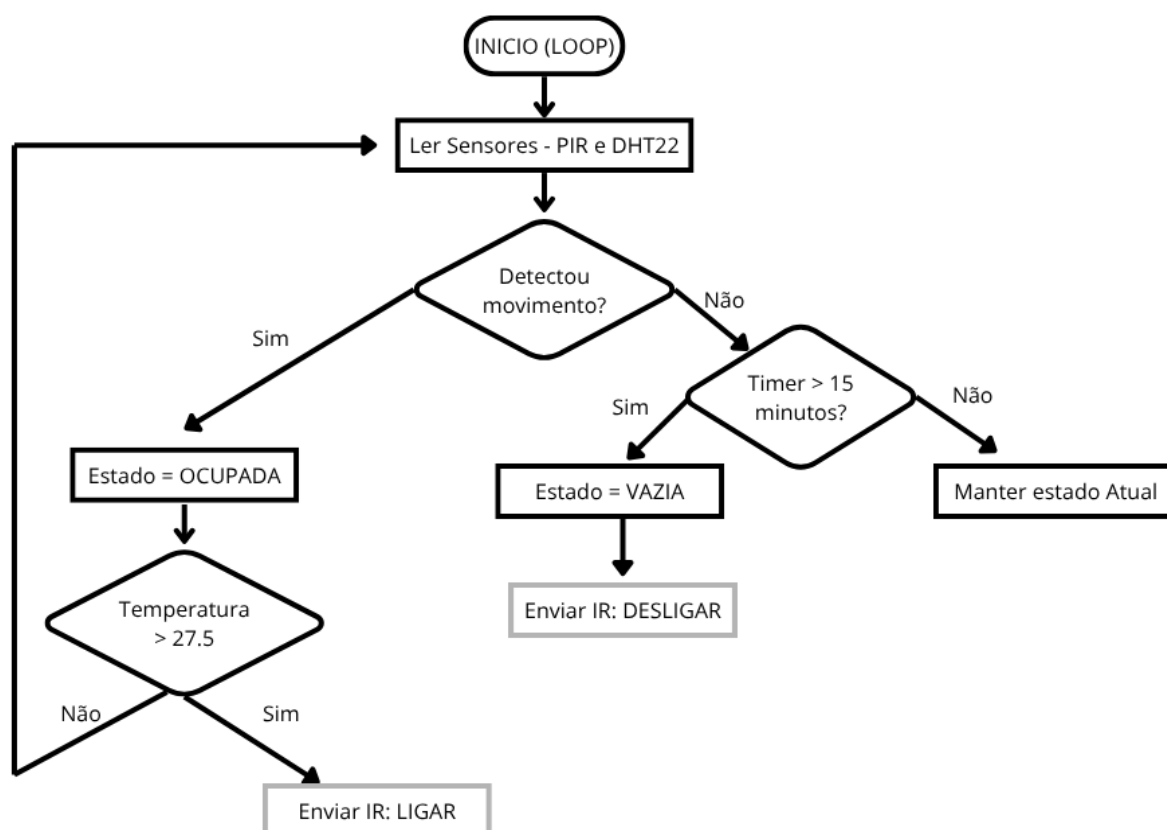
3.4 Desenvolvimento do Firmware e Lógica de Controle

O desenvolvimento do firmware teve como foco principal a autonomia do sistema, o código foi estruturado para que o microcontrolador execute todo o processo de decisão localmente.

A lógica opera em um ciclo de processamento contínuo (*loop*), configurado para realizar a leitura dos sensores e a atualização de estados a cada intervalo de 5 segundos. Esta abordagem de amostragem periódica garante a estabilidade do sistema e evita reações instáveis a ruídos momentâneos no ambiente.

O fluxo de funcionamento, ilustrado na **Figura 8**, baseia-se em uma máquina de estados que gerencia duas variáveis principais: o tempo de ausência e a temperatura ambiente.

Figura 8 – Fluxograma da lógica de funcionamento



Fonte: Autor (2025).

O algoritmo de automação implementa duas regras de controle distintas:

1. **Controle de Ocupação (Timeout):** O sistema monitora continuamente o sensor PIR. A cada detecção de movimento, um temporizador interno é reiniciado. Se o sensor não registrar presença por um período consecutivo de 15 minutos (*timeout*), o sistema altera o estado lógico da sala de "Ocupada" para "Vazia".
2. **Acionamento por Transição:** Para garantir a eficiência e evitar o envio repetitivo de sinais infravermelhos, o comando de desligamento é disparado estritamente no momento da transição de estado (quando a sala passa de Ocupada para Vazia). Da mesma forma, o comando para ligar o ar-condicionado só é enviado se houver presença confirmada somada a uma temperatura ambiente superior a 27,5°C.

3.5 Arquitetura de Comunicação e Interface

Para cumprir os requisitos de monitoramento e controle manual, o sistema foi projetado com uma interface remota. O ESP32, utilizando sua conectividade Wi-Fi embarcada, é responsável por transmitir os dados coletados pelos sensores para um ambiente de visualização. Essa arquitetura permite que os usuários acompanhem o estado do ambiente e, se necessário, acionem o ar-condicionado manualmente pelo dashboard.

3.6 Procedimentos de Teste e Validação

Para garantir a eficácia do protótipo, o procedimento de validação foi dividido em duas fases essenciais: a Validação de Desempenho e Funcionalidade e a Validação Quantitativa e Impacto Energético.

3.6.1 Validação de Desempenho e Funcionalidade

Esta fase inicial concentrou-se em confirmar se o hardware reagiu corretamente aos estímulos do ambiente e se o microcontrolador era capaz de comandar o equipamento de ar-condicionado real. O objetivo foi confirmar a integridade dos sinais e a correta execução da lógica programada.

A validação ocorreu através da observação do comportamento físico dos componentes (acionamento do aparelho, detecção de movimento) em conjunto com o monitoramento dos logs de depuração via Interface Serial (Console da IDE Arduino). O Quadro 2 detalha o roteiro de testes funcionais aplicado:

Quadro 2 – Matriz de testes funcionais realizados

COMPONENTE / FUNÇÃO	PROCEDIMENTO REALIZADO	CRITÉRIO DE APROVAÇÃO
SENSORES (ESTABILIDADE)	Monitoramento das leituras de temperatura e umidade no Monitor Serial	As leituras devem se apresentar estáveis (sem variações bruscas ou erros de "NaN") e coerentes com o ambiente.
DETECÇÃO DE PRESENÇA	Simulação de movimento em frente ao sensor PIR e observação imediata da variável de estado no log do sistema.	O log deve exibir "Sala Ativa: TRUE" imediatamente após o movimento.
ATUADOR (EMISSOR IR)	Posicionamento do protótipo próximo ao ar-condicionado e envio de comandos ("Ligar", "Desligar") via código.	O aparelho de ar-condicionado deve responder fisicamente aos comandos (sinal sonoro/abertura de aletas), confirmando a eficácia da biblioteca IR.

Fonte: Autor (2025).

Para comprovar a eficiência do sistema, métricas quantitativas de desempenho dos componentes foram estabelecidas durante os testes funcionais:

- **Tempo de Resposta dos Sensores:** A agilidade do sistema foi aferida medindo-se o tempo transcorrido desde a ocorrência do evento de estímulo (movimento ou alteração de temperatura/umidade) até a efetiva alteração na variável de estado no firmware.

- Taxa de Erro do PIR: A confiabilidade do sensor de presença foi validada através de testes controlados de calibração. Estes testes foram focados em identificar e eliminar a ocorrência de falsos positivos (detecção sem movimento) e falsos negativos (falha em detectar movimento). O sucesso da calibração permitiu estabelecer uma Taxa de Erro Funcional mínima para a aplicação da lógica de presença/ausência.

3.6.2 Análise Quantitativa do Impacto Energético

Para validar o potencial de economia do protótipo, a comprovação da eficiência energética foi realizada através de uma Análise Quantitativa Projetiva. Este método utiliza a eficácia funcional da lógica de timeout (comprovada nos testes de trigger e desligamento) em conjunto com os parâmetros técnicos do ar-condicionado para modelar a energia evitada.

- Medição da Redução de Tempo de Funcionamento ($T_{\text{redução}}$)

O potencial de otimização de uso foi determinado através da validação da Lógica de Otimização. O teste funcional comprovou que, após a transição para o estado de "Ausência", o timeout de 15 minutos é rigorosamente executado, resultando no desligamento autônomo do aparelho.

Essa comprovação funcional serviu de base para estabelecer um cenário de hipótese conservadora de redução de tempo de funcionamento $T_{\text{redução}}$ em uso real. O valor de referência adotado para esta variável foi de 3 horas por dia, que é o correspondente à média de tempo em que as salas permanecem vazias fora do horário de pico.

- Estimativa de Consumo em kWh ($E_{\text{economizada}}$)

O impacto energético evitado foi quantificado através de um cálculo projetivo de engenharia, que relaciona o tempo de funcionamento reduzido com a potência nominal do equipamento.

A metodologia para o cálculo da energia economizada ($E_{\text{economizada}}$) é definida pela seguinte equação:

$$E_{\text{economizada}} = P_{\text{elettrica}} * T_{\text{redução}} * D_{\text{mês}}$$

Onde os valores de entrada são definidos como:

$P_{\text{elétrica}}$ - Potência elétrica estimada por unidade, com o valor de referência de 3,52 kW (para o aparelho de 30.000 BTU, considerando COP de 2,5).

$T_{\text{redução}}$ - Média de horas de funcionamento reduzidas por dia, com o valor de referência de 3 horas/dia.

$D_{\text{mês}}$ - Dias de atividade no mês, com o valor de referência de 20 dias.

Este método estabelece um modelo quantificável de impacto energético, validando o potencial de economia do Projeto ARCA.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

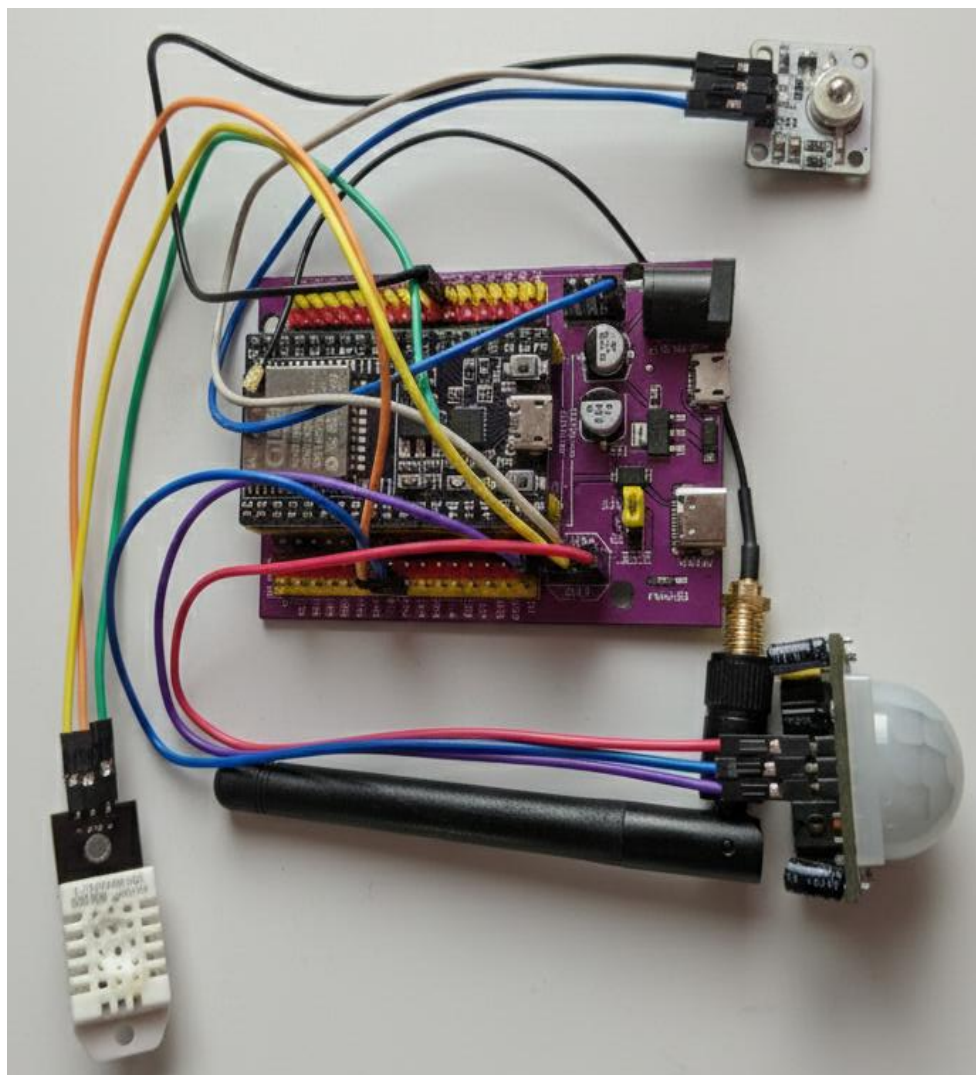
Este capítulo apresenta os resultados da implementação e validação funcional do protótipo, conforme o protocolo estabelecido na Seção 3.5. A análise dos dados e dos logs de sistema visa confirmar a viabilidade técnica e a eficácia da lógica de controle autônomo na otimização do consumo energético.

4.1 Implementação Física do Protótipo

A execução da metodologia resultou na montagem de um protótipo coeso e funcional. A utilização da placa de expansão acoplada ao ESP32, conforme detalhado no Diagrama Esquemático (**Figura 7**), simplificou a integração dos periféricos, garantindo a estabilidade das conexões elétricas e a minimização de ruídos.

A **Figura 9** ilustra o resultado final da montagem de bancada, demonstrando o baixo volume e a organização dos componentes necessários para a função de controle.

Figura 9 – Protótipo ARCA montado em bancada



Fonte: Autor (2025).

4.2 Validação Funcional dos Sensores

Os testes funcionais iniciais foram dedicados à validação dos componentes de entrada (sensores), essenciais para garantir que a lógica de automação operasse com base em dados confiáveis.

4.2.1 Responsividade do Sensor PIR (Presença)

O teste de detecção de presença buscou confirmar a eficácia do sensor HC-SR501 na captação de movimento. Através do monitoramento em tempo real via *Interface Serial*, observou-se que a variável de estado do *firmware* era alterada para

OCUPADA imediatamente após o sensor registrar movimento. Isso validou o sensor como um gatilho eficaz para a lógica de acionamento, confirmando sua alta sensibilidade.

4.2.2 Estabilidade do Sensor DHT22 (Temperatura)

O teste de estabilidade do sensor DHT22 verificou a consistência dos dados. As leituras de temperatura e umidade, monitoradas por um período de cinco minutos, mostraram-se estáveis e coerentes com as condições ambientais da bancada, sem apresentar falhas de leitura (NaN). Esse resultado garante que a Regra de Conforto (acionamento por temperatura) opera com base em uma entrada de dados estável.

4.3 Validação do Atuador e da Lógica de Controle

Esta etapa comprovou a capacidade do sistema de atuar sobre o equipamento e de tomar decisões autônomas.

4.3.1 Eficácia do Módulo Transmissor IR

O teste de atuação buscou validar a comunicação entre o ESP32 e o ar-condicionado. Ao acionar os comandos via firmware, o Módulo Transmissor IR obteve 100% de sucesso na emulação do sinal. O aparelho de climatização respondeu fisicamente aos comandos ("Ligar", "Desligar") com o sinal sonoro ("bip") característico, confirmando que o uso de um atuador IR de baixo custo é viável para o controle não invasivo do equipamento.

4.3.2 Comprovação da Lógica de Otimização

O Teste de Cenário Integrado validou a capacidade do sistema de tomar decisões autônomas, comprovando a execução das regras de Conforto e Economia.

A comprovação da lógica de acionamento é dupla:

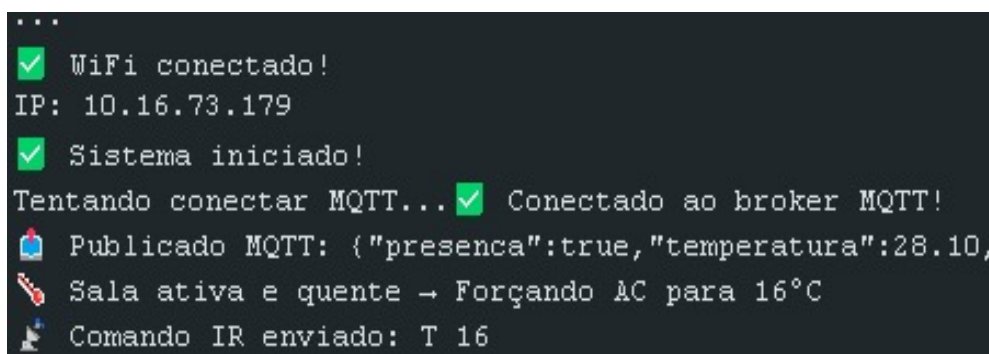
I. Regra de Conforto (Comando LIGAR)

A lógica foi validada ao simular a condição de uso: Presença Detectada e Temperatura Acima do *Setpoint* (27.5°C). O sistema demonstrou autonomia ao executar as seguintes ações:

- 1.O microcontrolador identificou a condição ideal de uso (Presença + Calor).
- 2.O *firmware* executou a lógica de acionamento.
- 3.O comando de LIGAR foi disparado imediatamente pelo Módulo Transmissor IR.

A **Figura 10** atua como a evidência forense dessa autonomia, registrando o momento exato em que o comando de acionamento foi emitido pelo microcontrolador.

Figura 10 – Log de Execução: Envio do Comando de Ligar Autônomo



```
...  
✅ WiFi conectado!  
IP: 10.16.73.179  
✅ Sistema iniciado!  
Tentando conectar MQTT...✅ Conectado ao broker MQTT!  
📡 Publicado MQTT: {"presenca":true,"temperatura":28.10,  
🌡️ Sala ativa e quente → Forçando AC para 16°C  
📡 Comando IR enviado: T 16
```

Fonte: Autor (2025).

II. Regra de Economia (Comando DESLIGAR)

A eficácia da otimização foi comprovada pela simulação da condição crítica de ausência prolongada. Este teste validou o mecanismo de economia.

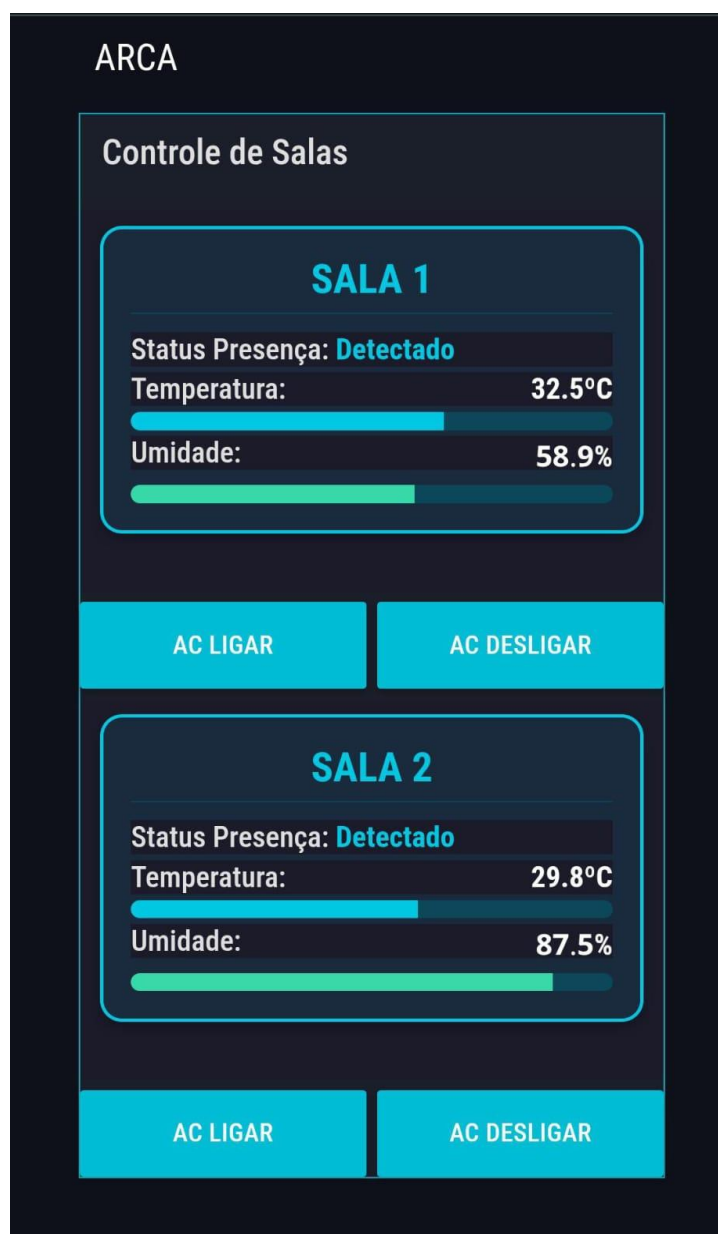
- 1.O sistema, ativado na condição OCUPADA, iniciou a contagem de tempo após o último movimento registrado pelo sensor PIR.
- 2.Ao transcorrerem os 15 minutos sem interrupção, o microcontrolador executa a lógica de transição de estado.
- 3.O comando de DESLIGAR foi disparado imediatamente.

O sucesso na execução de ambas as regras (Ligar e Desligar) comprova que o protótipo é um sistema autônomo e totalmente capaz de eliminar o desperdício de energia, validando o requisito de otimização do projeto.

4.3.3 Validação da Interface de Monitoramento

A validação dos requisitos de Controle e Monitoramento foi comprovada pela interface gráfica remota (dashboard). A **Figura 11** ilustra o painel, que cumpriu sua função de visualizar os dados de temperatura e presença em tempo real, além de permitir o acionamento manual.

Figura 11 – Interface de Monitoramento e Controle Remoto (Dashboard)



Fonte: Autor (2025).

4.4 Análise Quantitativa do Impacto Energético

A avaliação do impacto energético do sistema ARCA foi realizada com base nos dados reais do Campus Araguatins e nas características técnicas dos aparelhos de climatização instalados. O campus possui atualmente 84 unidades de ar-condicionado do tipo LG Split Teto de 30.000 BTU, utilizados em salas de aula

O funcionamento padrão desses aparelhos ocorre, em média, por 16 horas diárias, entre 7h e 23h, durante aproximadamente 20 dias por mês, considerando o calendário regular de atividades. Com a implementação do sistema ARCA, ocorre a redução automática de 3 horas diárias de funcionamento, referentes principalmente aos períodos em que os ambientes permanecem sem ocupação (como 12h–13h e 17h–19h). Essa redução é possível devido ao monitoramento de presença realizado pelo protótipo.

Para estimar o consumo elétrico dos equipamentos, considera-se que um aparelho de 30.000 BTU equivale a aproximadamente 8,79 kW de potência térmica. Em condições reais, equipamentos desta categoria operam com um Coeficiente de Desempenho (COP) em torno de 2,5, valor adotado nesta análise por representar um cenário conservador e condizente com o uso institucional. Isso significa que, para produzir 8,79 kW de refrigeração, o aparelho consome cerca de 3,52 kW de potência elétrica.

A **Tabela 1** apresenta um resumo das características operacionais e técnicas utilizadas na análise.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados na estimativa de impacto energético

Parâmetro	Valor
Quantidade de aparelhos	84
Capacidade térmica	30.000 BTU ($\approx$ 8,79 kW térmicos)
COP adotado	2,5
Potência elétrica estimada por unidade	3,52 kW

Horas de uso antes da automação	16 h/dia
Redução diária proporcionada pelo ARCA	3 h/dia
Dias de atividade no mês	20 dias
Tarifa média de energia	R\$ 0,85/kWh

Fonte: Autor (2025).

Com base nesses parâmetros, cada aparelho deixa de consumir aproximadamente 211 kWh por mês após a intervenção do ARCA. Considerando todas as 84 unidades, a economia energética mensal estimada chega a 17.724,94 kWh. Essa redução tem impacto financeiro direto, resultando em aproximadamente R\$ 15.066,20 poupados por mês, valor que atinge R\$ 180.794,40 por ano caso o comportamento de uso e os valores tarifários se mantenham constantes.

A **Tabela 2** apresenta de forma consolidada os resultados obtidos.

Tabela 2 – Resultados da economia energética estimada

INDICADOR	VALOR OBTIDO
Economia por unidade	211,01 kWh/mês
Economia total	17.724,94 kWh/mês
Economia financeira mensal	R\$ 15.066,20
Economia financeira anual	R\$ 180.794,40

Fonte: Autor (2025).

Para contextualizar o impacto, analisou-se também a fatura de energia do IFTO – Campus Araguatins referente ao mês de outubro de 2025, que registrou consumo total aproximado de 82.600 kWh. Com base nisso, a economia estimada representaria cerca de 21,46% de todo o consumo elétrico mensal da instituição. Isso evidencia que

o desperdício associado ao uso inadequado dos sistemas de climatização é expressivo, e que a automação proposta tem potencial real de mitigá-lo sem a necessidade de troca de equipamentos ou reformas estruturais.

Em síntese, os resultados demonstram que o sistema ARCA promove uma redução significativa na carga energética total do campus, oferecendo impacto direto tanto em termos de eficiência quanto de economia financeira. O ganho apresentado reforça a relevância da automação inteligente no contexto institucional, especialmente em ambientes com grande quantidade de equipamentos de climatização.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema desenvolvido demonstrou que soluções de automação de baixo custo podem contribuir de forma efetiva para reduzir o desperdício de energia em instituições públicas de ensino. Ao monitorar condições ambientais e a presença de usuários, o protótipo conseguiu controlar o funcionamento dos aparelhos de ar-condicionado de maneira mais adequada, evitando acionamentos desnecessários.

Os testes realizados no IFTO – Campus Araguatins evidenciaram que a abordagem adotada tem potencial para otimizar o uso dos equipamentos de climatização, gerando economia energética e diminuindo os custos operacionais. Os resultados mostram que pequenas intervenções tecnológicas, quando bem direcionadas, são capazes de promover melhorias significativas sem exigir grandes investimentos.

A solução apresentada é funcional e acessível, com grande potencial de adaptabilidade. No entanto, sua continuidade deve focar em aprimorar a capacidade de atuação e detecção. O Módulo de Atuação deve ser aprimorado para alcançar a Compatibilidade Universal, através da expansão da biblioteca de comandos IR embutida no firmware para incluir mais códigos de controle de diferentes fabricantes e modelos de ar-condicionado. Para a detecção de presença, futuras pesquisas podem superar a limitação do sensor PIR (que detecta apenas movimento) integrando soluções como o ESPCAM (câmeras de baixo custo) com visão computacional, o que permitiria a detecção e contagem de pessoas, garantindo um controle térmico mais preciso. Além disso, a arquitetura deve ser expandida para um Sistema de

Monitoramento Híbrido, possibilitando que o controle se conecte a plataformas de gestão energética na nuvem para análise centralizada e relatórios de desempenho.

De forma geral, o trabalho alcançou seu objetivo ao propor uma alternativa prática e eficiente para o uso mais responsável da energia, contribuindo tanto para a sustentabilidade quanto para o planejamento operacional da instituição.

REFERÊNCIAS

ADAFRUIT INDUSTRIES. PIR Motion Sensor. Adafruit, 2014. Disponível em: <https://learn.adafruit.com/pir-passive-infrared-proximity-motion-sensor/>. Acesso em: 1 nov. 2025.

ALIEXPRESS. Módulo transmissor infravermelho de alta potência. Disponível em: <https://pt.aliexpress.com/item/1005006520023892.html>. Acesso em: 1 nov. 2025.

ARTUR, Matheus Damaceno. Aplicação do conceito internet das coisas (IoT) e plataformas open source para monitoramento de painéis elétricos de baixa tensão. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás, Aparecida de Goiânia, 2023.

BORGES, Jôice Chrystine Santos. Internet das coisas no planejamento e gestão de bibliotecas. In: CONGRESSO NACIONAL DE EDUCAÇÃO E PRODUÇÃO CIENTÍFICA, 1., 2024. DOI: 10.51189/conaptec2024/43418.

CAVALCANTE, Alex da Silva. Projeto Ubique: sistema de monitoramento e controle de ar-condicionado. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência da Computação) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

D'ALBUQUERQUE, M. A. N.; SILVA, R. M. da; GOMES, M. de L. B. Eficiência energética em uma edificação pública: uma análise das possibilidades. *Sistemas & Gestão*, v. 12, n. 4, p. 462–470, 2017.

DIAS JÚNIOR, Gilmar Martins. Automação de ar-condicionado residencial utilizando Arduino e Android. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Análise e Desenvolvimento de Sistemas) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Campus Urutaí, Urutaí, 2022.

ELETROGATE. Sensor de Movimento Presença PIR HC-SR501. Disponível em: <https://www.eletrogate.com/sensor-de-movimento-presenca-pir>. Acesso em: 1 nov. 2025.

ESPRESSIF. ESP32 Wi-Fi & Bluetooth SoC. Disponível em: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>. Acesso em: 1 nov. 2025.

GAMI, H. Movement direction and distance classification using a single PIR sensor. *IEEE Sensors Letters*, v. 2, n. 1, p. 1–4, 2018.

GIL, Antonio Carlos. Métodos e técnicas de pesquisa social. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GOMES, Woldson Leonne Pereira. Sistema de automação IoT para gestão de ativos no cenário de Indústria 4.0. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2023.

HUBOT. Módulo sensor digital temperatura e umidade DHT22. Disponível em: <https://hubot.cl/producto/modulo-sensor-digital-temperatura-humedad-dht22-sku-527/>. Acesso em: 1 nov. 2025.

LACERDA, F.; LIMA-MARQUES, M. Da necessidade de princípios de arquitetura da informação para a internet das coisas. *Perspectivas em Ciência da Informação*, v. 20, n. 2, p. 158–171, 2015.

LIMA, Celina Moraes. Projeto de eficiência energética aplicado em escolas públicas do Estado do Ceará: metodologia, aplicação e análise de cenários. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

MACIEL, Bruna Eduarda Cruz. Desenvolvimento de uma interface gráfica para o monitoramento, automação e controle de ar-condicionado. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2024.

MARTINS, Victor Ferreira. Automação residencial usando protocolo MQTT, Node-RED e Mosquitto Broker com ESP32 e ESP8266. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. Guia para eficiência energética nas edificações públicas. Rio de Janeiro: CEPEL/MME, 2015. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/ee/publicacoes-e-estudos/GuiadeEficienciaEnergeticaemEdificiosPblicos.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2025.

NEWTON BRAGA, A. Módulo Infravermelho de Alarme (ART2011). Disponível em: <https://www.newtonbraga.com.br/projetos/17486-modulo-infravermelho-de-alarme-art2011.html>. Acesso em: 1 nov. 2025.

OLIVEIRA, Filipe Miranda de; DUSSE, Flávio. Aplicação de IoT, ESP32 e MQTT em um aparelho de ar-condicionado de uma universidade. Salvador: Universidade Católica do Salvador, 2024.

PANGONI, Fabricio; BARBOSA, Andrea Teresa Riccio. Proposta de eficiência energética para a escola técnica SENAI de Ribas do Rio Pardo-MS. *Latin American Journal of Energy Research*, v. 10, n. 1, p. 33–45, 2023.

PEREIRA, Marcelo Robson Sousa. A aplicação do microcontrolador ESP32 no ensino. 2020. Monografia (Especialização em Ensino de Física) – Universidade Federal do Amapá, Macapá, 2020.

RAMOS, P. C. Automação residencial com dispositivos de baixo custo. *Revista Brasileira de Tecnologias Aplicadas*, 2021.

ROCHA, Afrânio Cosmo Gonçalves da. Eficientização energética em prédios públicos: um desafio aos gestores municipais frente aos requisitos de governança e sustentabilidade. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso – Fundação Getulio Vargas, São Paulo, 2012.

SANTOS, Michael Dydean de Araújo. Utilizando Internet das Coisas (IoT) para controle de equipamentos de ar-condicionado: soluções e desafios tecnológicos. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Sistemas para Internet) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Campus Salgueiro, Salgueiro, 2021.

SILVA, Armando Vitor de Oliveira. Alarme com ativação por sensor presencial e alerta via SMS. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia da Computação) – Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2013.

USINAINFO. ESP32-WROOM-32U DevKitC V4 com Wi-Fi Bluetooth e CP2102. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/esp32/esp32-wroom-32u-devkitc-v4-com-wifi-bluetooth-e-cp2102-7077.html>. Acesso em: 1 nov. 2025.

VALIANTE, Leandro Ferrarezi; SILVA, Ricardo Bussons da. Automação e otimização energética de sistemas de ar-condicionado via controle centralizado com dispositivos IoT. Revista Aracê, v. 7, n. 10, 2025. DOI: 10.56238/arev7n10-109.

WOLLSCHLAEGER, M.; SAUTER, T.; JASPERNEITE, J. The future of industrial communication: automation networks in the era of the Internet of Things and Industry 4.0. IEEE Industrial Electronics Magazine, v. 11, n. 1, p. 17–27, 2017.