

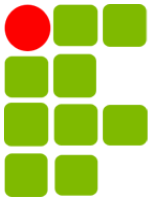
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
Campus Campina Grande
Coordenação do Curso de Engenharia de Computação

Sistema de Monitoramento de Salas de Aula

Ayrtton Lucas Silva
Gabriel Lopes Rodrigues e Silva

Orientador: Prof. Dr. Fagner de Araújo Pereira

Campina Grande, 17 de novembro de 2026



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
Campus Campina Grande

Sistema de Monitoramento de Salas de Aula

Ayrtton Lucas Silva
Gabriel Lopes Rodrigues e Silva

Trabalho apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia de Computação do IFPB - Campus Campina Grande, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Computação.

Orientador: Prof. Dr. Fagner de Araújo Pereira

Campina Grande, 17 de novembro de 2026

Catalogação na fonte:
Ficha catalográfica elaborada por Thiago Ferreira Cabral de Oliveira – CRB 15/628

S586s SILVA, Ayrtton Lucas.
Sistema de Monitoramento de Salas de Aula / Ayrtton Lucas Silva, Gabriel Lopes Rodrigues e Silva. - Campina Grande, 2026.
34 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Bacharelado em Engenharia de Computação) - Instituto Federal da Paraíba, 2026.
Orientador: Prof. Fagner de Araújo Pereira.

1. Engenharia de computação. 2. Automação. 3. Internet das Coisas. I. Silva, Gabriel Lopes Rodrigues e. II. Pereira, Fagner de Araújo. III. Título.

CDU 004.9

Agradecimentos

Os autores agradecem à Associação para Promoção da Excelência do Software Brasileiro - Softex, no âmbito dos Projetos de Interesse Nacional nas Áreas de TIC (PPI) do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), com recursos da Lei nº 8.248, de 23 de outubro de 1991, publicado como Residência em TIC 09 (processo 01245.014045/2022-75) e ao Laboratório Assert do IFPB.

Sistema de Monitoramento de Salas de Aula

Ayrtton Lucas Silva[1], **Gabriel Lopes Rodrigues e Silva**[1], **Fagner de Araújo Pereira**[1]

[1]Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB)
Campus Campina Grande

{ayrtton.lucas, lopes.rodrigues}@academico.ifpb.edu.br,
fagner.pereira@ifpb.edu.br

Abstract. *Inefficient use of lighting and air conditioning in classrooms generates high costs and compromises the sustainability of educational institutions. In this context, this work presents the development of an automation system focused on the smart control of these environments, integrating sensors, actuation devices, and network communication. The solution uses an ESP32 as a central unit responsible for processing attendance and temperature data, activating relays, and transmitting information. The collected records are stored, allowing for continuous monitoring and a history of activities. To complement the system, a web interface was created that enables real-time monitoring and management of the installed devices. The proposal is technically feasible and provides an accessible alternative to reduce waste, improve classroom operation, and support decisions related to energy management in educational environments.*

Keywords: *Intelligent automation, Internet of Things (IoT), Remote monitoring, Energy efficiency, Educational environments.*

Resumo. *O uso ineficiente de iluminação e climatização em salas de aula gera custos elevados e compromete a sustentabilidade das instituições de ensino. Diante desse cenário, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de automação voltado ao controle inteligente desses ambientes, integrando sensores, dispositivos de acionamento e comunicação em rede. A solução utiliza um ESP32 como unidade central, responsável por processar dados de presença e temperatura, acionar relés e transmitir informações. Os registros coletados são armazenados, permitindo acompanhamento contínuo e histórico das atividades. Para complementar o sistema, foi criada uma interface web que possibilita monitoramento em tempo real e gerenciamento dos dispositivos instalados. A proposta é tecnicamente viável e fornece uma alternativa acessível para reduzir desperdícios, aprimorar a operação de salas de aula e apoiar decisões relacionadas à gestão energética em ambientes educacionais.*

Palavras-chave: *Automação inteligente, Internet das Coisas (IoT), Monitoramento remoto, Eficiência energética, Ambientes educacionais.*

1. Introdução

As instituições de ensino enfrentam um problema recorrente relacionado ao desperdício de energia elétrica, provocado principalmente pelo hábito de usuários deixarem luzes e equipamentos ligados em ambientes acadêmicos desocupados. Esse comportamento, bastante frequente, assume proporções preocupantes, resultando em impactos financeiros e ambientais significativos.

A proposta deste projeto consiste na utilização de sensores de movimento PIR (Passive Infrared) para detectar a presença de pessoas nos ambientes, módulos de relés e emissores LEDs infravermelhos para o controle automático de lâmpadas e aparelhos de ar-condicionado, respectivamente, além de sensores DHT11 (Digital Humidity and Temperature) para a verificação da temperatura ambiente. A plataforma ESP32 atua como unidade central de processamento, integrando e coordenando todos os dispositivos.

A arquitetura de comunicação do sistema é fundamentada no protocolo *WebSockets*, implementado por meio da biblioteca *Socket.IO*, em substituição aos modelos convencionais como HTTP ou MQTT. Esta escolha justifica-se pela necessidade de um canal de comunicação bidirecional e *full-duplex*, que estabelece uma conexão persistente entre o hardware (ESP32), o servidor backend e a interface de usuário através do envio padronizado de *JavaScript Object Notations* (JSONs). Os dados sensoriados são emitidos como eventos assíncronos para um servidor central em Node.js, que gerencia a lógica de negócio e coordena a persistência em um banco de dados MongoDB Atlas.

Esta abordagem *Not Only SQL* (NoSQL) confere flexibilidade ao armazenamento de logs históricos e estados dos dispositivos, assegurando a integridade e a rastreabilidade das informações para a gestão eficiente do consumo energético. Tal infraestrutura permite o armazenamento contínuo e a sincronização instantânea dos dados, sendo adequada para sistemas que demandam monitoramento remoto e resposta imediata a eventos. O MongoDB Atlas também oferece recursos nativos de escalabilidade, integração multiplataforma e persistência das informações, possibilitando o registro histórico e a posterior análise de padrões de uso nos ambientes monitorados. Por fim, os dados armazenados são acessados por meio de uma interface web desenvolvida com HTML, CSS e JavaScript.

Este trabalho apresenta a proposta conceitual e os fundamentos técnicos da solução, abordando sua arquitetura e discutindo sua aplicabilidade como uma alternativa eficaz para a gestão mais eficiente do consumo de energia elétrica em instituições de ensino.

1.1. Definição do Problema

O desperdício de energia elétrica em ambientes educacionais é uma realidade recorrente, especialmente em salas de aula. Nesses locais, luzes e equipamentos, como o ar-condicionado, frequentemente permanecem ligados mesmo na ausência de pessoas. Esse consumo desnecessário impacta diretamente os custos operacionais e a sustentabilidade ambiental das instituições. Diante desse cenário, emerge a necessidade de uma solução de automação eficiente que possibilite o controle inteligente desses dispositivos, fundamentado na detecção da presença de indivíduos e na temperatura ambiente.

Conforme apontado por Paixão[1], o setor de edificações no Brasil figura como o maior consumidor de energia elétrica, quase metade de toda a energia utilizada. No

contexto das edificações universitárias federais brasileiras, a despesa com energia elétrica representa um dos maiores itens das despesas mensais. Esse fato determina a urgência de aprimorar o uso da energia, particularmente ao considerar o crescente contingenciamento orçamentário que as instituições têm enfrentado.

A adoção de soluções tecnológicas em ambientes educacionais não deve se restringir apenas ao ensino, mas também à infraestrutura de suporte à sustentabilidade institucional. Nossa abordagem, alinhada ao conceito de smart buildings, utiliza dados em tempo real para otimizar as operações e a eficiência energética.

1.2. Objetivo Geral

O objetivo central deste projeto é combater o desperdício de energia elétrica, inicialmente no Campus Campina Grande do IFPB, adotando uma solução tecnológica. Para isso, foi desenvolvido e implementado um sistema de automação inteligente que realiza o controle dinâmico de equipamentos (iluminação e ar-condicionado) com base na presença de ocupantes e na temperatura ambiente. Adicionalmente, o sistema permite o monitoramento contínuo do ambiente, gerando dados sobre o uso das salas. Tais dados subsidiarão os administradores na tomada de decisões no contexto da gestão energética e na otimização de recursos.

1.2.1. Objetivos Específicos

Dentro do objetivo geral, encontram-se as seguintes metas específicas:

- Automatizar o acionamento de iluminação e climatização, utilizando relés e emissores infravermelhos, de modo a ajustar o funcionamento dos equipamentos conforme o uso real das salas;
- Implementar um sistema embarcado baseado em ESP32 para coleta e processamento de informações provenientes de sensores de presença e temperatura;
- Estabelecer comunicação entre dispositivos via WebSocket, garantindo troca eficiente e confiável de dados entre os módulos do sistema;
- Armazenar registros simultaneamente no Banco de Dados, permitindo histórico detalhado de ocupação, ativação dos equipamentos e condições ambientais;
- Desenvolver uma interface web para acompanhamento remoto em tempo real, consulta ao histórico de dados e gerenciamento dos dispositivos monitorados.

1.2.2. Materiais

Em relação aos materiais, foram utilizados:

- Microcontrolador ESP32;
- Sensor de movimento PIR;
- Relé eletromecânico de 5V;
- Fonte de alimentação 5V;
- Servidor remoto para armazenamento de dados;
- Interface de monitoramento online;
- Sensor de temperatura DHT11;

- Emissor LED Infravermelho;
- Transistor BC 547 NPN;
- Resistores de 220Ω e 10kΩ.

1.2.3. Métodos

Em relação aos métodos, foram realizados:

- A configuração do ESP32 como cliente WebSocket;
- A leitura do sensor PIR por meio de interrupções de hardware;
- O controle do relé baseado nos sinais do sensor PIR e em recursos de temporização;
- A leitura do sensor de temperatura;
- O controle de temperatura do ar-condicionado, por meio de emissores infravermelhos, com base na temperatura ambiente;
- O registro de dados de ocupação de ambientes e da temperatura no servidor;
- O download dos registros da atividade do dispositivo no banco em um arquivo JSON;
- O desenvolvimento de uma aplicação web para monitoramento em tempo real dos ambientes monitorados;
- A implementação de recursos de adição e remoção de dispositivos monitores no menu de controle da aplicação web.

2. Estrutura do Projeto

2.1. Fundamentação Teórica

A gestão eficiente de energia elétrica em instituições é uma situação desafiadora que demanda soluções inovadoras. Conforme destacado por Oliveira et al.[2], sistemas automatizados e integrados de monitoramento são essenciais para criar alternativas viáveis na redução do desperdício energético. A capacidade desses sistemas de analisar padrões de utilização de energia, como iluminação e climatização, em ambientes desocupados, é crucial para promover a economia financeira e a sustentabilidade ambiental. Corroborando essa perspectiva, Noor et al.[3] demonstra como o consumo de energia muitas vezes passa despercebido no dia a dia, fornecendo informações importantes para a análise e melhor compreensão do problema.

Partindo do pressuposto da imperatividade de reduzir o desperdício, este projeto propõe o desenvolvimento de uma solução prática e integrada que une hardware e software por meio de tecnologias baseadas em Internet das Coisas (IoT).

No cenário atual, a transformação digital tem remodelado o panorama tecnológico global, com IoT emergindo como uma das invenções mais importantes do século XXI, conforme destacado por Shah et al.[4]. A capacidade de interligar objetos físicos através de sensores e outras tecnologias para integração e troca de dados oferece oportunidades sem precedentes na otimização de processos e na gestão eficiente de recursos.

Essa conectividade possibilita a emergência dos smart buildings, que empregam automação e análise de dados para gerenciar de forma eficiente sistemas como segurança, iluminação, ventilação, climatização, entre outros. A aplicação de tais conceitos é particularmente relevante em instituições de ensino, onde o consumo de energia elétrica representa uma despesa considerável e um ponto de atenção para a sustentabilidade.

Parisio et al.[5] enumera estratégias baseadas em regras para lidar com sistemas de gerenciamento de energia, sendo elas:

- Loop aberto: aquela que não faz uso da informação para alterar as saídas programadas;
- Reativa: aquela que usa a informação do estado atual e estados passados do sistema para alterar as saídas programadas;
- Preditiva: aquela que altera as saídas programadas se prever mudanças no uso do ambiente.

O sistema IoT desenvolvido neste projeto faz uso da abordagem reativa para analisar o estado atual do sistema e, assim, agir.

2.2. Trabalhos relacionados

A utilização de sensores de presença para o controle automatizado da iluminação já é tradicionalmente aplicada em ambientes de baixa circulação. Contudo, a adaptação dessa premissa para cenários de ocupação prolongada, como salas de aula, exige abordagens mais complexas. A fim de contextualizar e fundamentar as decisões arquiteturais do presente projeto, destacam-se a seguir implementações relevantes na literatura recente.

No sistema desenvolvido por Chong et al.[6], a dependência de um temporizador estático foi substituída por uma lógica direcional de contagem de indivíduos. Através do

posicionamento estratégico de dois sensores PIR (um à esquerda e outro à direita da via de acesso), o sistema determina o vetor de movimento do usuário, inferindo se há entrada ou saída do recinto. Essa contabilização direcional mitiga a ocorrência de falsos negativos típicos em ambientes de ocupação estática, em que a ausência de grandes movimentos faria o sistema desativar a iluminação incorretamente. Os dados processados são exibidos localmente por meio de uma interface *Liquid Crystal Display* (LCD).

Por sua vez, Wibowo, Suheri e Yugianus[7] propuseram um sistema focado em automação e eficiência energética em laboratórios universitários de informática. O protótipo foca no controle automatizado de iluminação e ar-condicionado por meio de uma abordagem híbrida de agendamento por calendário (*scheduling*) e detecção de ocupação física baseada em sensores. Embora a solução integre hardware e software através de uma plataforma web dedicada, os autores relataram que a eficácia prática e a reatividade do sistema foram limitadas por barreiras de hardware e problemas de sincronismo na comunicação. Além disso, o foco em agendamentos rígidos torna a solução pouco flexível para ambientes dinâmicos de salas de aula de uso múltiplo, onde as aulas nem sempre obedecem estritamente a horários predefinidos fixos e exigem intervenção ativa imediata dos administradores.

Em uma vertente focada em telemetria, Katsoulis, Koulouras e Christakis[8] propuseram um sistema de aquisição de dados ambientais empregando o microcontrolador ESP32 integrado a sensores de temperatura e umidade (DHT22), luminosidade *Light Dependent Resistor* (LDR) e captação acústica. Visando a otimização do consumo energético por meio da IoT, a arquitetura destaca-se pelo reforço nas camadas de rede, suportando comunicação via *wi-fi*, *Long Range Wide Area Network* (LoRaWAN) ou uma topologia híbrida de ambas.

Com um escopo voltado para a atuação remota e o monitoramento de consumo, o trabalho de Noor et al.[3] utiliza um Arduino UNO associado a módulos relé para seccionar o fornecimento de corrente de múltiplos equipamentos do ambiente. O controle é realizado via aplicativo móvel e a infraestrutura de software, fundamentada em uma base de dados relacional (MySQL) e linguagem PHP, permite a geração de relatórios detalhados sobre o gasto energético das cargas acopladas.

A Tabela 1 resume as diferenças tecnológicas entre os trabalhos supracitados e a solução desenvolvida neste projeto, evidenciando o contraste nas abordagens de comunicação e armazenamento de dados.

Tabela 1. Comparativo tecnológico entre trabalhos relacionados e a solução proposta.

Trabalho	**Camada de Hardware (Sensores e Atuadores)**	**Camada de Rede**	**Camada de Aplicação / Dados**
Chong et al.[6]	Microcontrolador AT89S51, 2x Relé, 2x Sensor PIR, Tela LCD	Não aplicável (Apenas local)	Não aplicável
Katsoulis, Koulouras e Christakis[8]	Microcontrolador ESP32, Sensores DHT22, LDR e Som, Tela OLED	LoRaWAN e *wi-fi*	ChirpStack e Node-RED
Noor et al.[3]	Arduino UNO WiFi REV2, Módulos Relé	*wi-fi* e HTTP	Android Studio, PHP, banco relacional MySQL
Proposta Atual	**ESP32, Sensor PIR, DHT11, Relés e Emissor IR**	***wi-fi* e WebSockets (*Full-Duplex*)**	**Node.js, Frontend Web e banco NoSQL MongoDB Atlas**

2.3. Modelo de Arquitetura

Na Figura 1, é apresentado o modelo de arquitetura empregado e os equipamentos utilizados.

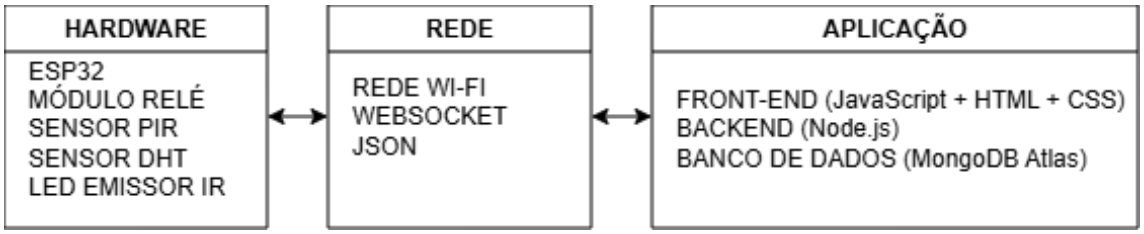


Figura 1. Modelo de Arquitetura

A arquitetura está estruturada em três camadas principais: Camada de Hardware, Camada de Rede e Camada de Aplicação. Cada uma delas desempenha um papel específico para garantir a coleta de dados, a comunicação eficiente e a interação do usuário.

A Camada de Hardware é a camada física do sistema, onde estão os dispositivos responsáveis pela coleta de dados e pela execução de ações. Cada dispositivo coletor de dados, instalado em cada ambiente monitorado, é baseado no microcontrolador ESP32, responsável pelo processamento local dos sinais dos sensores e atuadores e pela comunicação com a camada de rede. O Sensor PIR faz a detecção de movimento, verificando a presença ou ausência de pessoas no ambiente. O Sensor DHT11 mede a temperatura do ambiente. O relé eletromecânico permite o acionamento da carga elétrica de iluminação (lâmpadas) do ambiente.

O coletor de dados analisa a presença de pessoas no local com base no sinal do sensor PIR e determina se há ou não a necessidade de acionar a carga de iluminação. O coletor também monitora a temperatura ambiente com base no sinal do sensor DHT11 e

determina se há ou não a necessidade de acionar o equipamento de ar condicionado, bem como fazer o ajuste de temperatura do aparelho.

A Camada de Rede faz a ponte entre o hardware e a aplicação Web. Essa camada garante que a informação capturada pelo hardware seja transmitida de forma rápida e segura para o sistema de aplicação. O LED Emissor Infravermelho é usado para a transmissão de sinais IR, operando como um controle remoto do ar condicionado. Todos esses dispositivos se conectam ao ESP32 por meio de interfaces próprias (pinos de I/O de propósito geral).

O protocolo responsável pela comunicação entre o ESP32 e a internet/localhost é o WebSocket, que roda sobre a pilha TCP/IP. É um protocolo leve, ideal para IoT, usado pelo ESP32 para enviar dados dos sensores e receber comandos a partir da aplicação Web, utilizando o formato JSON e padronizando a comunicação full-duplex entre o sistema. Do lado da aplicação, temos HTTPS/WebSocket como tecnologias usadas para o envio e recebimento de dados em tempo real.

A Camada de Aplicação é responsável pela interface com o usuário e pelo armazenamento e gerenciamento de dados. O front-end Web (HTML, CSS, JavaScript) é a interface visual acessada pelo usuário, que pode visualizar dados dos sensores, receber notificações e enviar comandos ao sistema.

O MongoDB (Database) é encarregado da persistência de dados, armazenando informações do histórico, estados dos dispositivos e variáveis operacionais. Além disso, o backend, desenvolvido em Node.js, assume o papel de receber, processar e responder às requisições dos usuários por meio de uma API, atuando como intermediário entre o front-end e o banco de dados.

2.4. Estrutura de Hardware

Após a definição arquitetural, foram realizadas as conexões físicas dos componentes de hardware dos coletores de dados que seriam instalados dentro de cada sala de aula monitorada e automatizada. A conexão dos diferentes componentes físicos se dá conforme mostrado no esquema elétrico na Figura 2.

Na figura 3, está representado o fluxograma do sistema. Funciona da seguinte forma:

Após conectar o sistema à energia, o ESP inicializará e se conectará ao banco de dados. Feita a conexão, o loop começa, lendo os sensores e enviando os primeiros registros. Quando for detectada presença por parte do sensor PIR, o relé será acionado, iniciando o temporizador e enviando o registro devido, informando sua ativação. Após isso, retorna-se ao loop à espera de novas ativações ou do fim do temporizador. Quando não houver mais sinais de presença e o temporizador chegar ao fim, será enviado um novo registro indicando o desligamento da luz.

Paralelo a isso, na interface Web, temos o botão “Power Luz”, indicado na Figura 12. Ele é responsável pela alteração manual do estado do relé, em que ocorrerá o mesmo procedimento.

Já em relação ao aparelho ar-condicionado, temos funções parecidas. O sensor de temperatura foi configurado para enviar leituras novas após um certo atraso, inicialmente

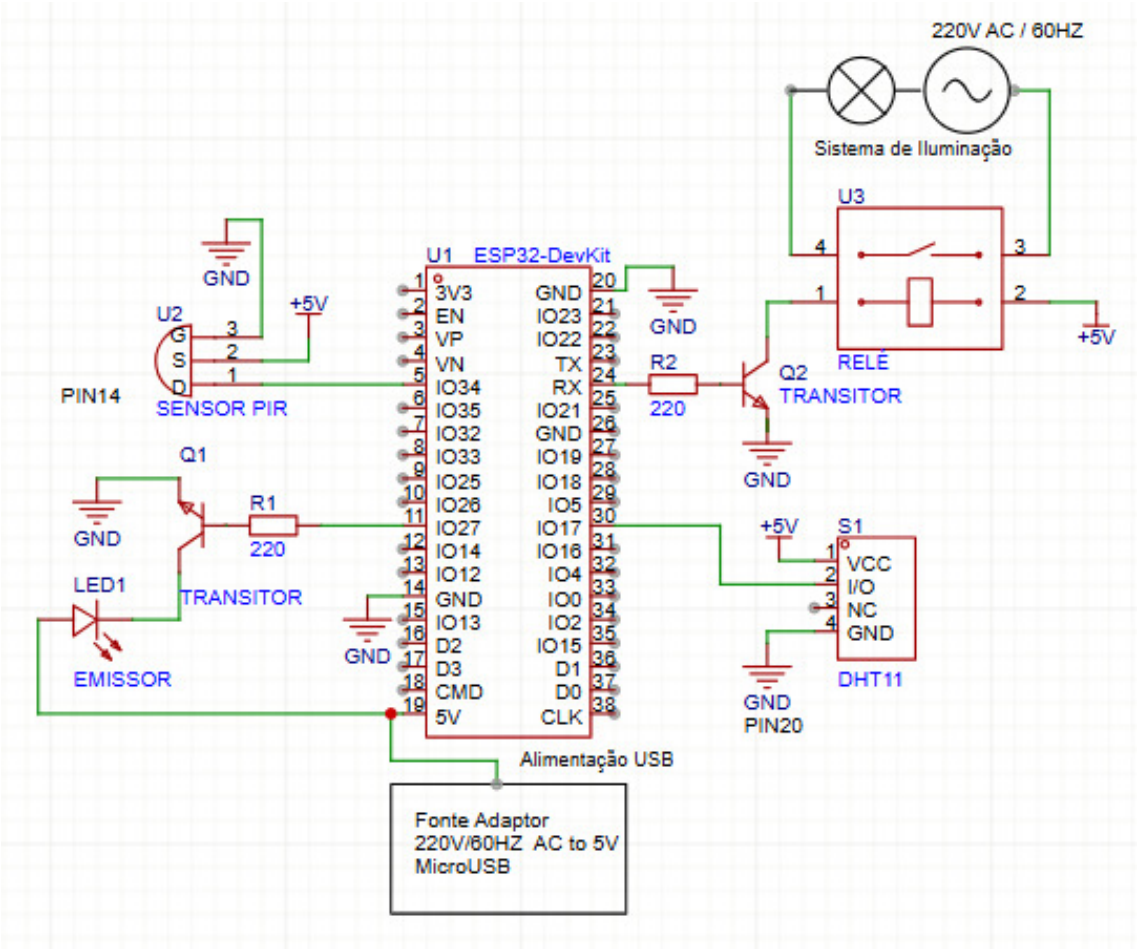


Figura 2. Esquema de Montagem dos Módulos Eletrônicos

definido em dois minutos. Ele faz a leitura, envia o registro para a interface e espera que o atraso acabe. Através da interface Web, é possível desligar o aparelho através do botão "Power Ar", dizendo ao ESP que envie o comando pré-definido de desligamento através do LED emissor.

Há também o botão de alterar a temperatura, o "Definir Temperatura". A ativação do botão abre uma tela perguntando qual a temperatura alvo, entre 16 e 31 ºC, que é o alcance que o próprio controle do aparelho possui. Enviada a temperatura correta, uma *flag* no banco de dados será acionada, indicando ao ESP que é necessário mudar a temperatura. O ESP lerá o novo valor alvo e enviará o comando correspondente através do LED emissor.

2.5. Camada de Aplicação

Na sequência, foi desenvolvido o software responsável por estabelecer a comunicação entre o ESP32 e o usuário. O front-end foi construído para ser um dashboard interativo, apresentando em tempo real os dados coletados e permitindo a adição de dispositivos coletores de dados a partir de um identificador(*id*), entre outras funcionalidades, oferecendo uma interface centralizada de monitoramento e controle para o usuário. O sistema, como um todo, é estruturado em três camadas principais, cada uma com responsabilidades bem definidas:

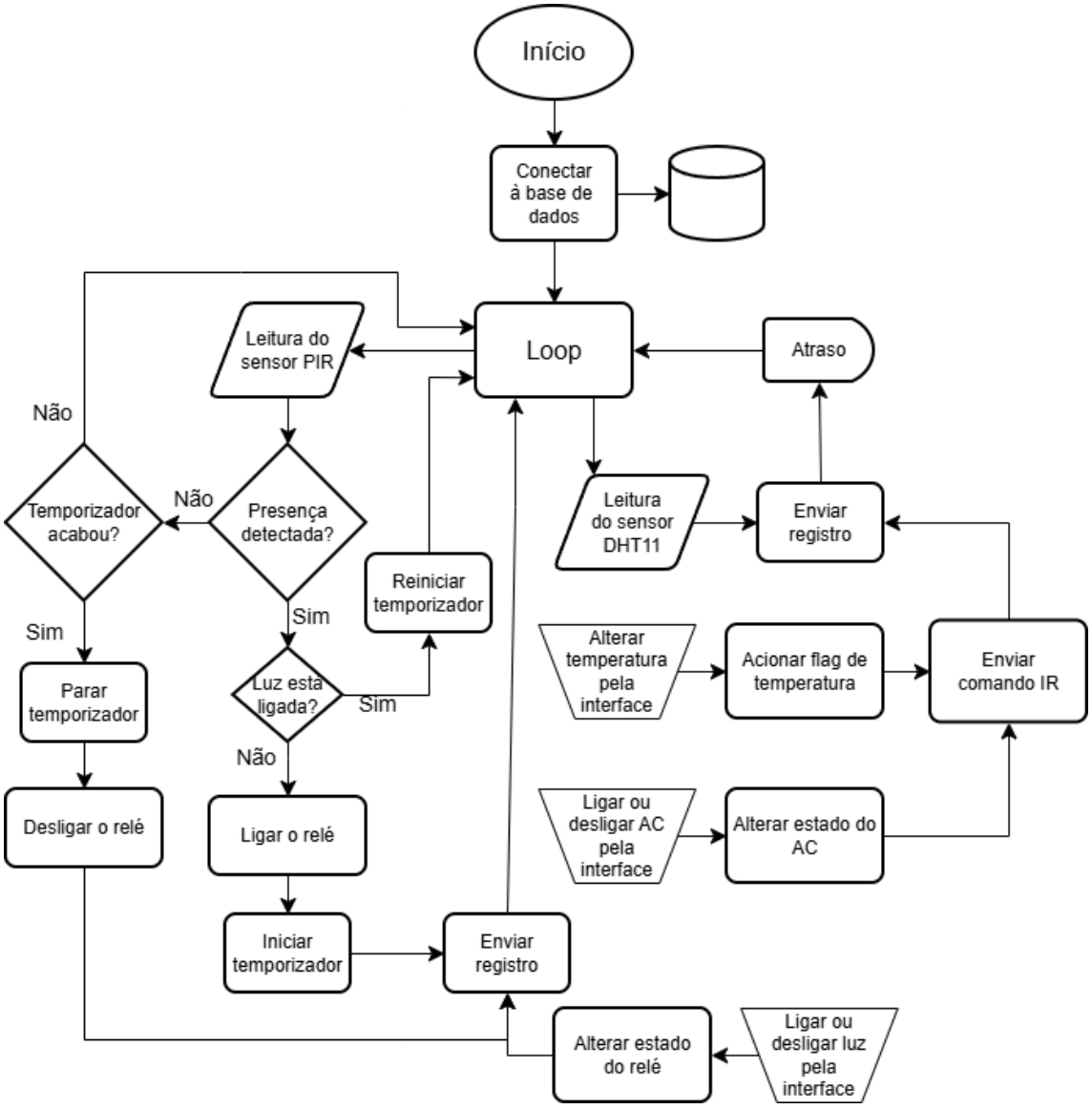


Figura 3. Fluxograma do sistema

A Camada de Aplicação é responsável pela interface com o usuário, pelo armazenamento persistente e pelo gerenciamento dos dados do sistema. O firmware do ESP32 espera o sinal do sensor PIR para iniciar um temporizador de 5 minutos, ativando o relé. Este valor não é absoluto e deve ser alterado dependendo do contexto ou da situação. Enquanto o sensor estiver ativado e o temporizador não concluir sua contagem, o sistema mantém o relé eletromecânico ativado, mantendo acionado o sistema de iluminação do ambiente, o que indica que há pessoas no ambiente monitorado.

A cada vez que o sensor PIR for acionado, o temporizador é resetado. Se a contagem for concluída, isso indica que o sensor não foi ativado há um tempo. Nesse caso, o relé é desabilitado, desativando o sistema de iluminação, semelhante a um interruptor.

O ar-condicionado é comandado pelo LED emissor infravermelho por meio de comandos armazenados no firmware do ESP32. Com o auxílio do sensor DHT11, é possível identificar a temperatura da sala e, pela interface Web, alterar a temperatura

desejada para o ambiente. Se a temperatura desejada é diferente da medida, o ESP32 envia um comando por meio do LED emissor infravermelho para o aparelho.

Os diagramas a seguir detalham as camadas, os componentes e o fluxo de operações do sistema desenvolvido.

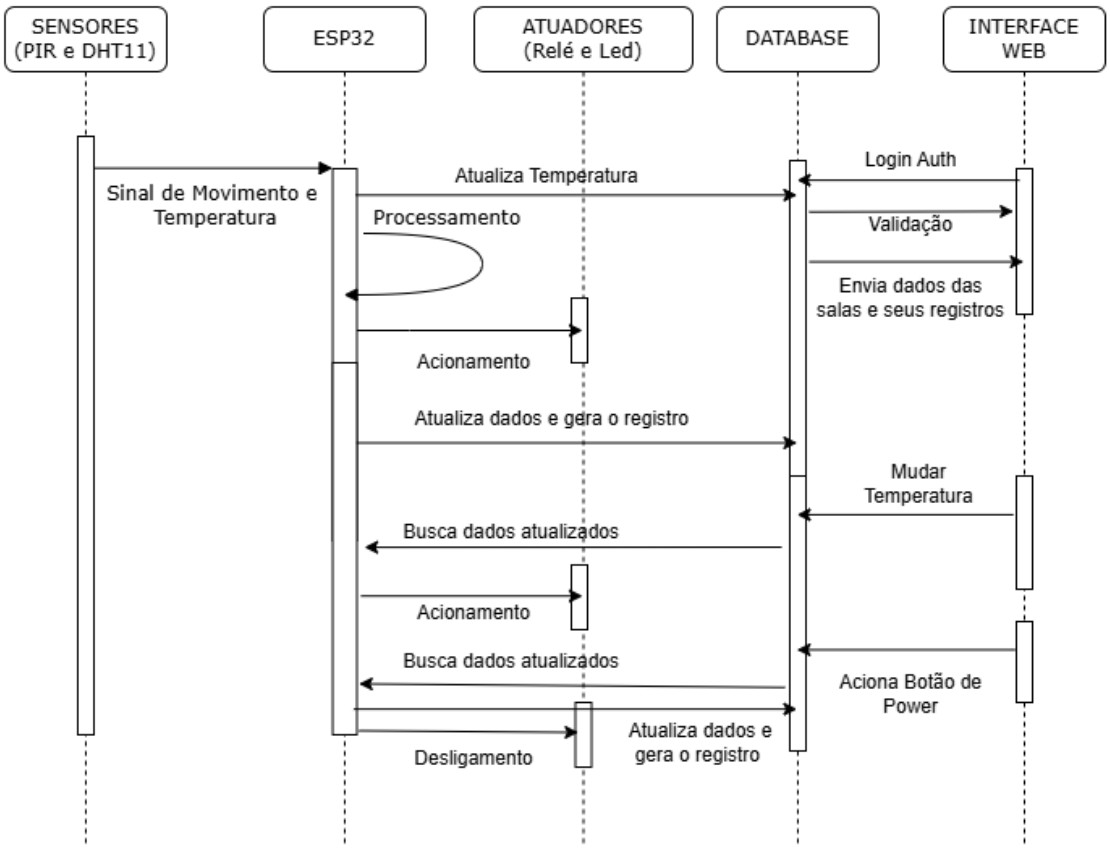


Figura 4. Diagrama de Sequências

A sequência de funcionamento de todo o processo está ilustrada no diagrama da Figura 4. O diagrama de sequência apresentado ilustra o fluxo de comunicação entre os principais componentes do sistema: sensores, ESP32, atuadores, banco de dados e interface web. Ele descreve, passo a passo, como os dados são coletados, processados, armazenados e utilizados para acionar dispositivos e atualizar informações exibidas ao usuário.

O processo inicia-se na camada de hardware, onde os sensores PIR (movimento) e DHT11 (temperatura e umidade) enviam sinais para o ESP32. Esses sinais representam informações captadas no ambiente, como a detecção de movimento e a medição da temperatura local.

Ao receber os sinais dos sensores, o ESP32 realiza o processamento dos dados, interpretando os valores e verificando se alguma ação precisa ser tomada com base na lógica programada no firmware. Quando as condições são satisfeitas, o ESP32 envia comandos aos atuadores, relé (para ativar ou desativar a carga de iluminação) e o LED infravermelho (para emitir comandos para o aparelho de ar condicionado).

O diagrama mostra momentos diferentes de acionamento e desligamento, demonstrando que o sistema responde tanto a eventos automáticos (sensores) quanto a eventos manuais (interface web).

Após qualquer processamento ou acionamento, o ESP32 envia informações atualizadas ao banco de dados. Esses dados podem incluir a temperatura atualizada, o estado dos atuadores, registros de movimento e logs de operação.

O banco de dados funciona como a base de informações centralizada, garantindo que tanto o ESP32 quanto a interface web utilizem dados atualizados. A interface web interage com o banco de dados para autenticação do usuário (Login Auth), validação das credenciais, exibição de dados das salas e registros históricos.

Após o login, as informações armazenadas são enviadas ao usuário para visualização em tempo real por meio de um dashboard. Além disso, a interface permite o envio de comandos, como alterar a temperatura desejada (envio de parâmetros) e acionar o botão de Power (solicitação de ativação/desativação). Esses comandos são enviados ao banco de dados e, em seguida, sincronizados com o ESP32.

O Ciclo de Atualização e Sincronização garante que todas as partes do sistema, como sensores, ESP32, atuadores, banco de dados e interface web, estejam sempre sincronizados. O ESP32, em particular, por meio do ambiente criado pelo WebSocket, fica alerta a comandos realizados que alteram os dados no banco, indicando que o usuário executou uma ação.

Por fim, o fluxo apresenta um evento de desligamento que, novamente, passa pelos processos de acionamento do atuador responsável e atualização dos registros no banco de dados, encerrando a operação de forma segura e documentada.

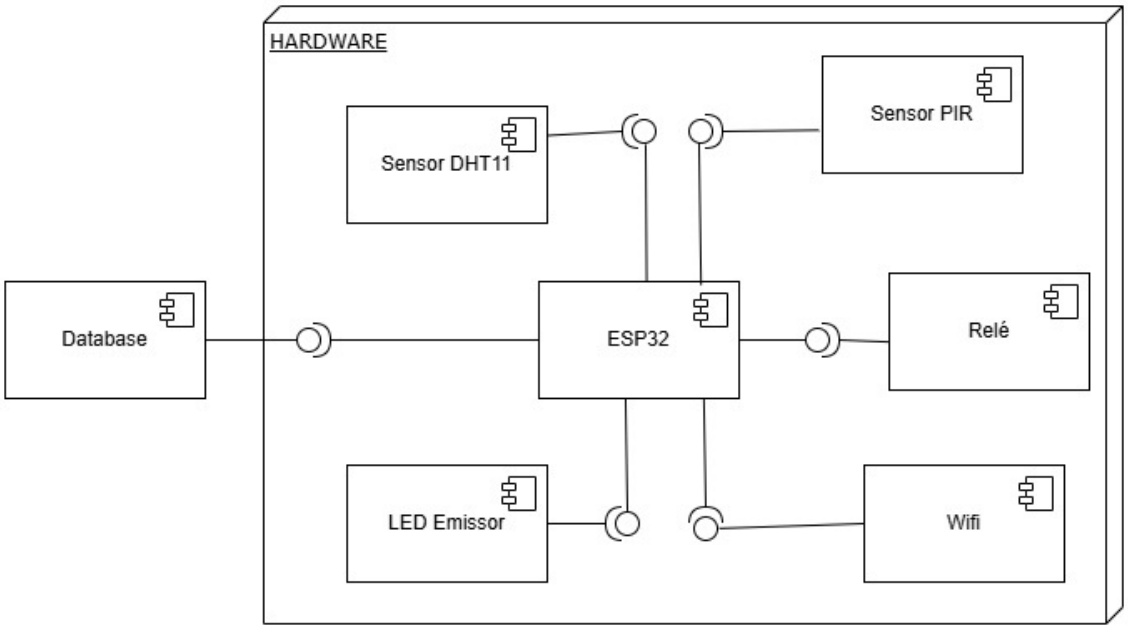


Figura 5. Diagrama de Componentes de Hardware

Na Figura 5 é apresentado o Diagrama de Componentes do módulo de hardware, detalhando a interconexão dos elementos físicos do sistema. Dentro do contêiner HARD-

WARE na Figura 5, o ESP32 atua como o controlador central, recebendo dados do Sensor PIR e acionando o relé. O wi-fi integrado ao ESP32 é fundamental para a comunicação com a rede.

Este módulo de hardware se conecta ao banco de Dados, estabelecendo a ponte para o envio e recebimento de dados com a nuvem, consolidando o ESP32 como o ponto de acesso à rede para o gerenciamento de dados remotos através dos frameworks e protocolos dos componentes do sistema.

O Diagrama de Componentes da Interface Web descreve a estrutura interna da camada de aplicação (front-end) e suas interações com o banco de dados, como mostrado na Figura 6. Agrupados no contêiner WEB, os componentes incluem o Login para autenticação de usuários, que se integra ao Mongodb Auth para validação de credenciais e gerenciamento de uma conta de usuário registrada.

Para o acesso e visualização de dados, os componentes Registro de Salas e Registro dos Dispositivos da Sala se conectam diretamente ao banco de dados, consumindo e exibindo as informações do sistema. Este diagrama enfatiza a modularidade da aplicação web e sua dependência dos serviços do Mongodb para autenticação e gestão de dados.

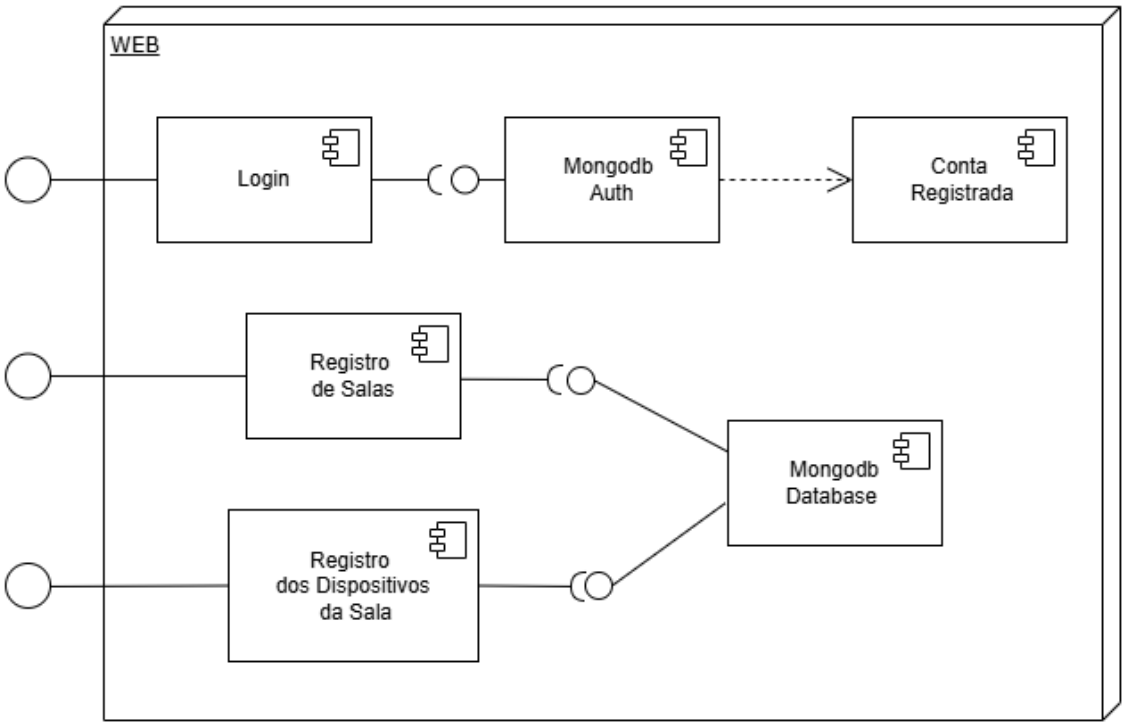


Figura 6. Diagrama de Componentes de Software

2.5.1. Interface de Usuário

A interface de usuário (Front-end Web) foi desenvolvida para proporcionar uma experiência intuitiva e funcional, permitindo o acesso às informações dos dispositivos de monitoramento dentro das salas de aula. Construída com tecnologias web padrão (HTML, CSS e JavaScript) para a compatibilidade direta com o próprio banco de dados,

assim como a maioria dos navegadores utilizados atualmente, ela permite a visualização e interação com o sistema a partir de qualquer dispositivo com acesso à internet.

A aplicação se conecta ao servidor WebSocket para exibir dados em tempo real e históricos de uso. A seguir, são apresentadas as telas da aplicação e suas funcionalidades.

O ponto de entrada para a interface Web é a tela de Login, garantindo que apenas usuários autorizados possam acessar as informações e funcionalidades, por meio de uma senha e do identificador de matrículas, como mostrado na Figura 7.

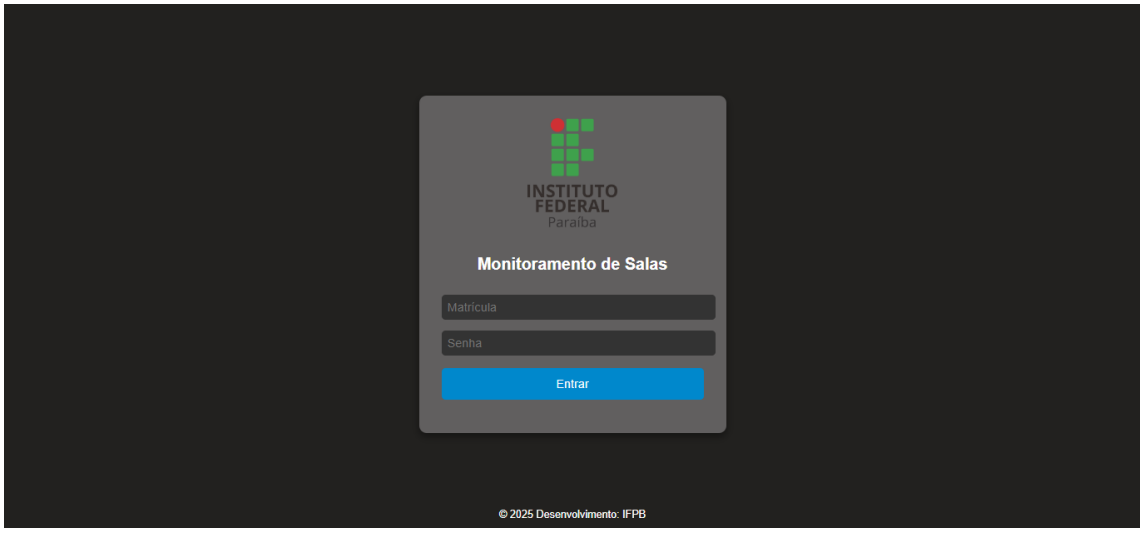


Figura 7. Tela de Login

Após o login bem-sucedido, o usuário é direcionado para a Tela de Controle de Salas, que serve como o dashboard principal do sistema. Essa tela pode ser acessada por dois tipos de usuários: o administrador e o monitor. O monitor tem um menu conforme demonstrado na Figura 8, que oferece uma visão consolidada e em tempo real do status dos ambientes monitorados.

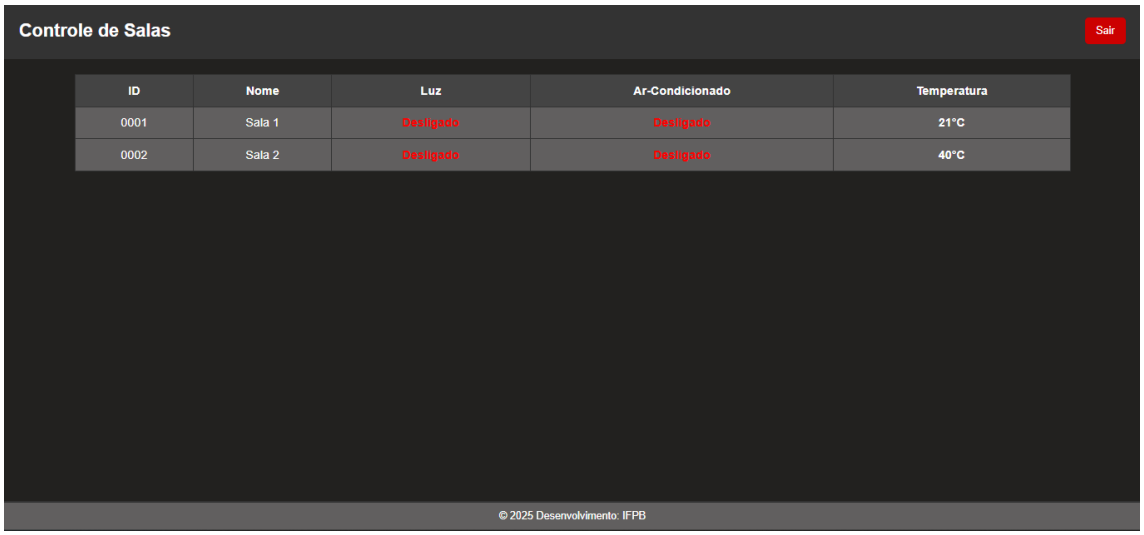


Figura 8. Menu de Salas

Já a tela de administrador apresenta mais dois botões na parte superior da tela, para adicionar salas através do id e adicionar novos usuários, além da opção de deletar uma sala na lista, como mostrado na Figura 9. O diagrama de caso de uso dessas telas é apresentado na Figura 10.

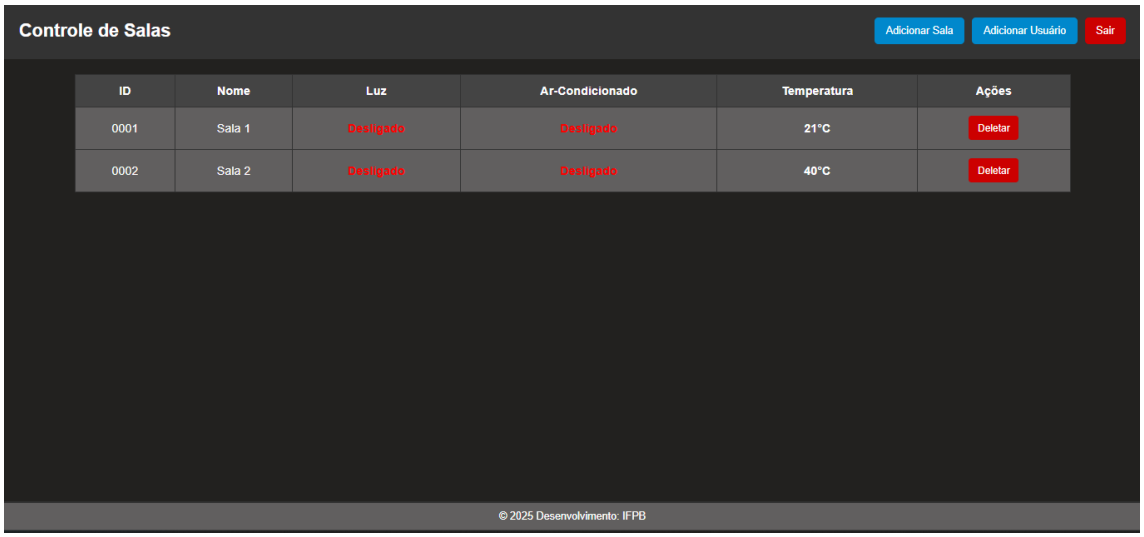


Figura 9. Menu de Salas do Administrador

O diagrama de caso de uso apresentado descreve, de forma sistematizada, as funcionalidades disponibilizadas pela Interface Web do sistema, bem como os atores que interagem diretamente com essas funcionalidades. Essa representação tem como objetivo explicitar os requisitos funcionais relacionados às operações realizadas no ambiente web, destacando a interação entre usuários e o sistema.

O diagrama contempla dois atores principais, cada um com níveis distintos de permissão e responsabilidades dentro do sistema. O ator “Monitor” representa o usuário responsável pelo acompanhamento operacional das salas. Esse usuário possui acesso às funcionalidades de consulta e controle básico dos dispositivos, sendo limitado às operações que não envolvem modificações estruturais ou administrativas no sistema.

O ator “Administrador” possui privilégios ampliados em comparação ao monitor. Além de ter acesso às funcionalidades de consulta e controle operacional, o administrador é responsável pelas atividades de gerenciamento da plataforma, tais como o cadastro de usuários e a criação ou remoção de salas. Trata-se, portanto, de um ator com permissões administrativas e acesso a recursos de configuração do sistema.

A Interface Web, representada como o sistema delimitado no diagrama, disponibiliza um conjunto de funções essenciais para o gerenciamento e operação das salas monitoradas. Os casos de uso são descritos a seguir.

- O caso de uso “Fazer Login” contempla o processo de autenticação do usuário, etapa obrigatória para acesso às demais funcionalidades. A relação "include"no diagrama indica que o acesso ao menu principal de salas depende exclusivamente da autenticação prévia do usuário, reforçando o mecanismo de controle de acesso do sistema;

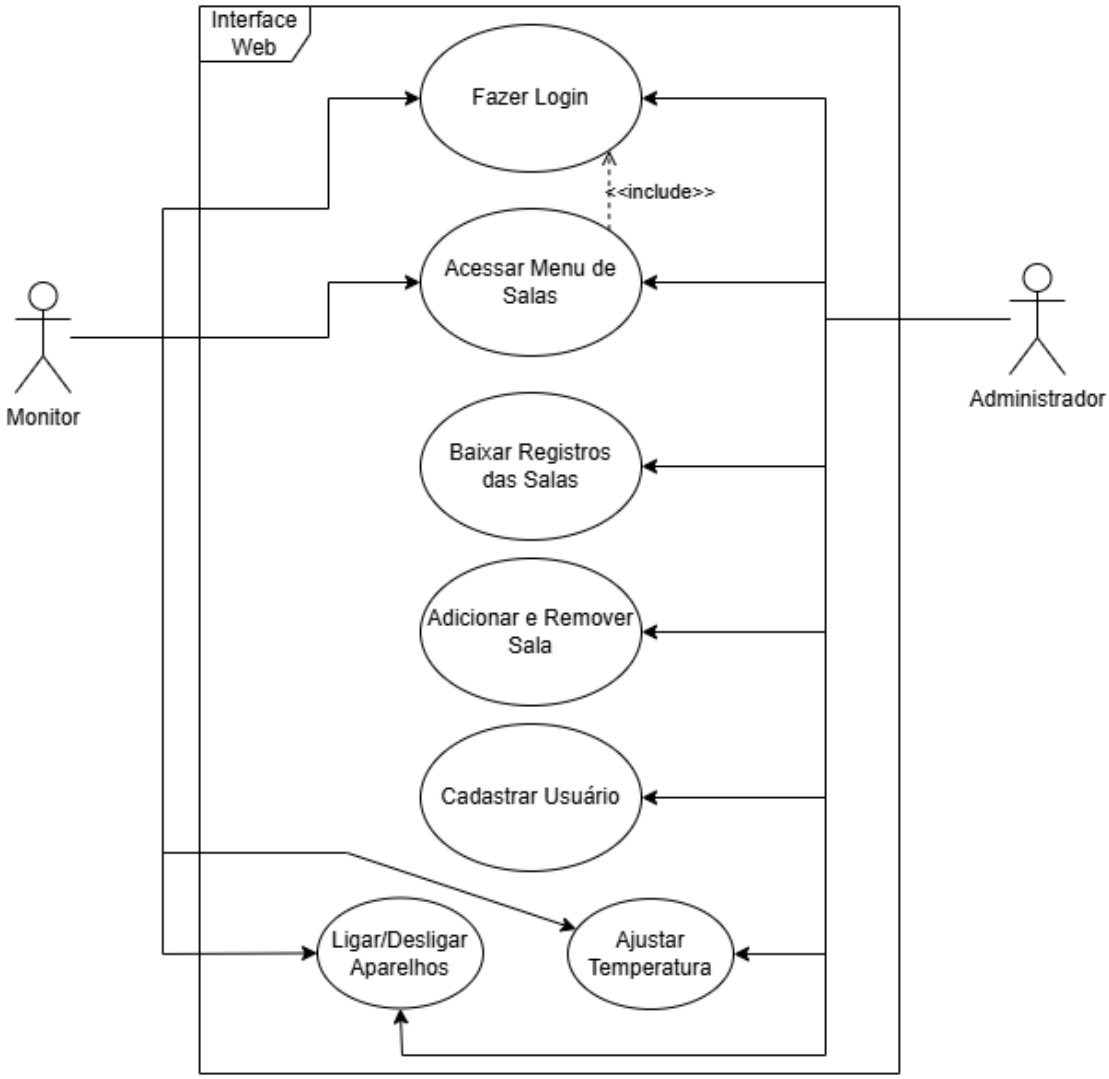


Figura 10. Diagrama de Caso de Uso da Interface Web

- Após a autenticação, o usuário pode acessar o menu de salas, que funciona como a interface central para visualização das informações operacionais. Neste menu são exibidos: o estado dos sensores, temperatura, registros associados e opções de controle. Tanto monitores quanto administradores têm permissão para executar esse caso de uso;
- O caso de uso “Baixar Registros das Salas” permite ao monitor realizar o download dos registros históricos referentes às salas monitoradas, tais como medições de temperatura, eventos de movimento e acionamentos de dispositivos. Essa funcionalidade contribui para auditorias, análise de uso e verificação do comportamento do sistema ao longo do tempo;
- Por meio da funcionalidade Ligar/Desligar Aparelhos, o monitor pode acionar ou desativar dispositivos conectados ao sistema, como relés, LEDs ou outros atuadores. Trata-se de uma função de controle direto sobre os equipamentos instalados nas salas, permitindo intervenções manuais quando necessário;
- O caso Ajustar Temperatura possibilita que o monitor defina ou altere o valor de referência de temperatura de uma determinada sala. A partir dessa configuração, o sistema embarcado ajusta seus parâmetros de operação, acionando automaticamente os dispositivos responsáveis pelo controle térmico. Dentro do banco de dados, cada aparelho tem um dado booleano chamado flag que, quando o ajuste de temperatura é solicitado, fica em estado "true"por um delay de 30 segundos até sincronizar e acionar o esp , para que o dispositivo não fique setando a temperatura em loop , e sim apenas quando solicitado;
- O caso de uso “Adicionar e Remover Sala” é exclusivo do administrador e permite a criação de novas salas no sistema ou a exclusão das já existentes. Essa funcionalidade é essencial para manutenção estrutural da plataforma e para o gerenciamento das unidades monitoradas;
- O administrador também é responsável por “Cadastrar Usuário”, funcionalidade que permite criar novos perfis de acesso, definir credenciais e atribuir permissões. Tal recurso reforça a governança do sistema, garantindo que apenas indivíduos autorizados tenham acesso às funcionalidades apropriadas ao seu nível de atuação.

A relação "include"entre os casos “Acessar Menu de Salas” e “Fazer Login” evidencia que a autenticação do usuário constitui um pré-requisito essencial para o acesso às demais funcionalidades do sistema. Não são representadas relações "extend"ou generalizações, indicando que os casos de uso são independentes entre si, exceto pelo requisito de autenticação.

2.5.2. Banco de Dados

As telas mostradas nas Figuras 8 e 9 foram projetadas para atualizar automaticamente o status dos dispositivos à medida que as mudanças ocorrem no ambiente físico, proporcionando um monitoramento dinâmico. O banco de dados foi modelado com a estrutura descrita na Figura 11.

A Figura 11 representa o modelo conceitual utilizado para a organização dos dados do sistema, estruturado em quatro entidades principais: *User*, *DeviceStatus*, *PresenceLogs* e *TemperatureLogs*. Esse modelo descreve como as informações são armazenadas,

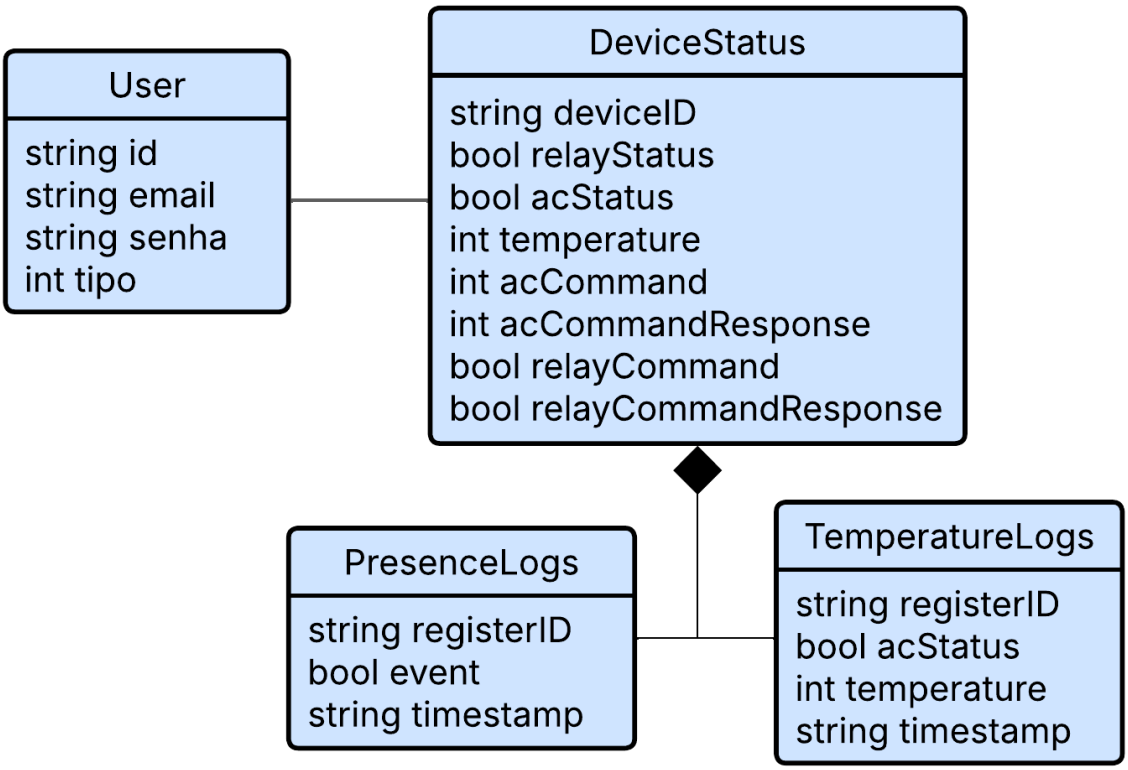


Figura 11. Estrutura de Banco de Dados

bem como os relacionamentos entre elas, servindo como base para a implementação da camada de persistência.

A entidade User representa os usuários cadastrados no sistema e contém os atributos necessários para autenticação e controle de permissões. Seus campos são:

- id (string): identificador único do usuário no sistema;
- email (string): endereço de e-mail utilizado para login;
- senha (string): senha do usuário, armazenada de forma segura;
- tipo (int): tipo de usuário, indicando seu nível de acesso (monitor ou administrador).

O relacionamento entre User e DeviceStatus indica que cada usuário está vinculado a um ou mais dispositivos que ele pode visualizar ou controlar.

A entidade DeviceStatus representa cada equipamento monitorado e controlado pelo sistema. Ela contém tanto informações de identificação quanto o estado atual dos dispositivos:

- deviceID (string): identificador único do dispositivo;
- relayStatus (bool): estado atual da iluminação (ligado/desligado);
- acStatus (bool): estado atual do sistema de climatização;
- temperature (int): temperatura configurada para o ar condicionado;
- acCommand (int): temperatura recebida através do comando enviado pela interface web;
- acCommandResponse (int): temperatura enviada como resposta pelo ESP para fins de validação;

- relayCommand (bool): comando de iluminação recebido da interface web;
- relayCommandResponse: resposta enviada pelo ESP em relação ao comando de iluminação recebido para fins de validação.

Essa entidade está ligada, por meio de um relacionamento de composição, às entidades de registro, indicando que cada dispositivo possui seu próprio conjunto de registros históricos.

A entidade PresenceLogs armazena o histórico de alterações no estado da iluminação associada a um dispositivo específico. Possui os seguintes atributos:

- registerID (string): identificador único do registro;
- event (bool): ação que o relé tomou no momento do registro (ligar/desligar);
- timestamp (string): data e hora em que a operação ocorreu.

Esses registros permitem o acompanhamento detalhado das operações realizadas ao longo do tempo. A entidade TemperatureLogs registra todas as alterações relacionadas ao sistema de climatização. Seus atributos são:

- registerID (string): identificador único do registro;
- acStatus (bool): estado do sistema de climatização naquele momento;
- temperature (int): valor de temperatura configurado naquele momento;
- timestamp (string): data e horário do evento.

Essa entidade permite o monitoramento e a auditoria das ações relacionadas ao controle térmico, além, claro, da variável booleana já mencionada, que permite a sincronização no ajuste de temperatura.

O modelo representa um relacionamento direto entre as entidades User — DeviceStatus, indicando que os usuários têm acesso a determinados dispositivos. A cardinalidade não está explicitada no diagrama, mas normalmente representa um relacionamento um-para-muitos, no qual cada usuário pode estar associado a diversos dispositivos.

2.5.3. Registros de Dados

A ligação entre DeviceStatus e as entidades de registros caracteriza um relacionamento de composição. Isso significa que cada registro pertence exclusivamente a um dispositivo, que registros não existem sem o dispositivo associado e que a remoção de um dispositivo implica a remoção de todos os seus registros de luz e ar. Esse tipo de relacionamento reforça o princípio de dependência estrutural entre os dispositivos e seus registros.

O uso de entidades distintas para usuários, dispositivos e seus respectivos registros viabiliza um armazenamento estruturado, escalável e adequado ao monitoramento contínuo das salas. O relacionamento de composição garante a integridade dos dados históricos, ao mesmo tempo em que a associação entre usuários e dispositivos permite um controle refinado de acesso e operações.

Ao clicar em uma linha da tabela mostrada no exemplo da Figura 8, o usuário é direcionado para a tela de registros de uma sala específica, cujos registros mais recentes podem ser vistos(foi definido na tabela como os 15 mais recentes), e o registro geral pode

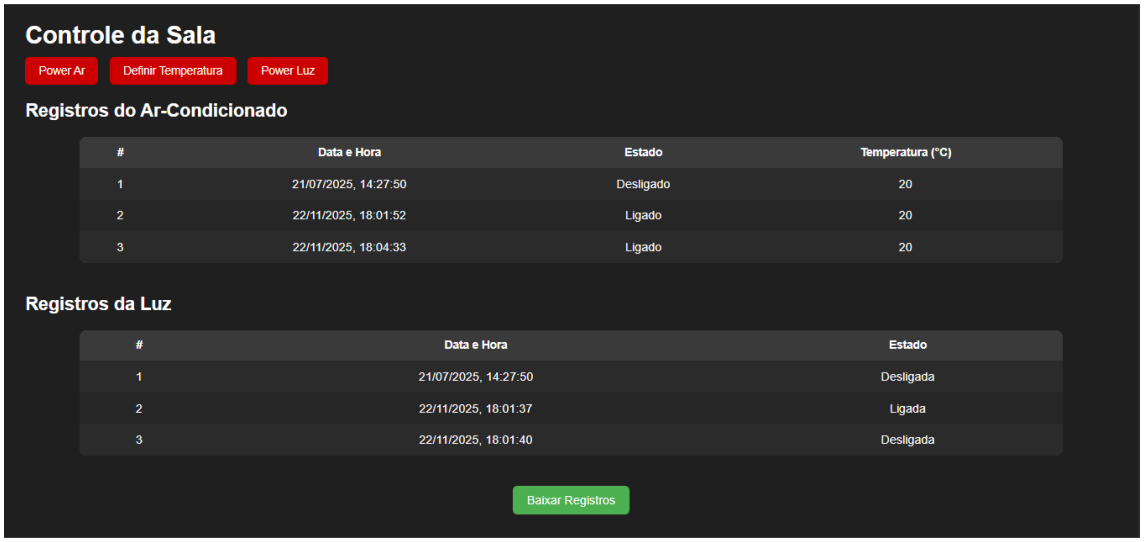


Figura 12. Tela de Registros de uma Sala do Usuário Administrador

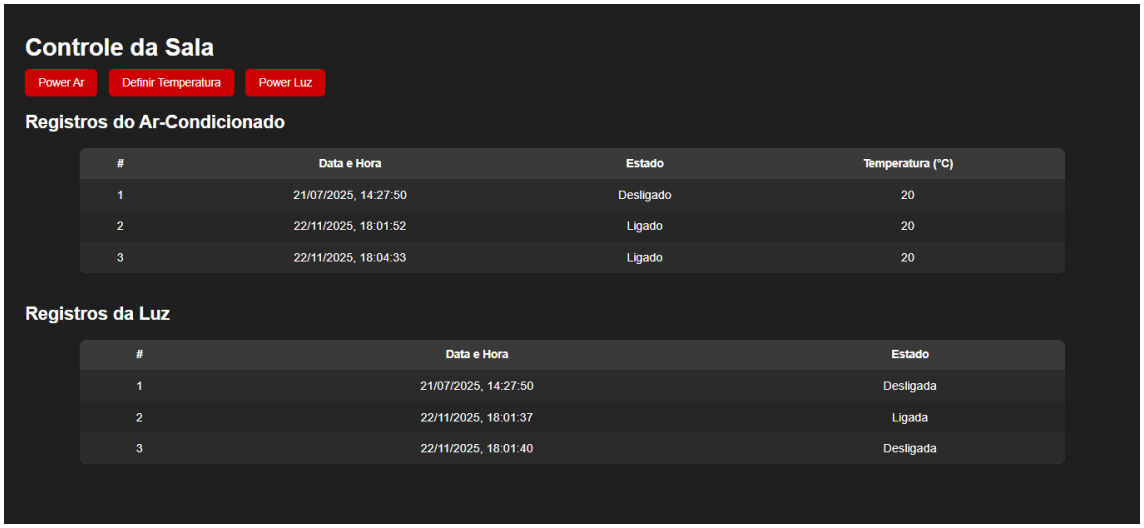


Figura 13. Tela de Registros de uma Sala do Usuário Monitor

ser baixado em formato csv(apenas o usuário do tipo Administrador), conforme mostrado na Figura 12.

Os registros são categorizados por tipo de dispositivo ("Registros do Ar-Condicionado"e "Registros da Luz"), cada um com sua própria tabela de histórico. Cada tabela apresenta as colunas com um id de série do registro, um timestamp exato do evento e também o estado do dispositivo naquele momento ("Ligado", "Desligado").

Além disso, o usuário administrador apresenta outros três botões mostrados anteriormente na Figura 9: O “deletar” permite que os dados de um determinado dispositivo localizado por um id sejam excluídos do banco de dados. Os outros dois botões da interface encaminham para uma tela de adição de uma sala, por meio de uma chave de identificação, como mostra na Figura 14, que pode ser feito também diretamente pelo microcontrolador, e o outro para uma tela onde se adicionam usuários com matrícula, senha, e-mail e um nome, como mostrado na Figura 15.

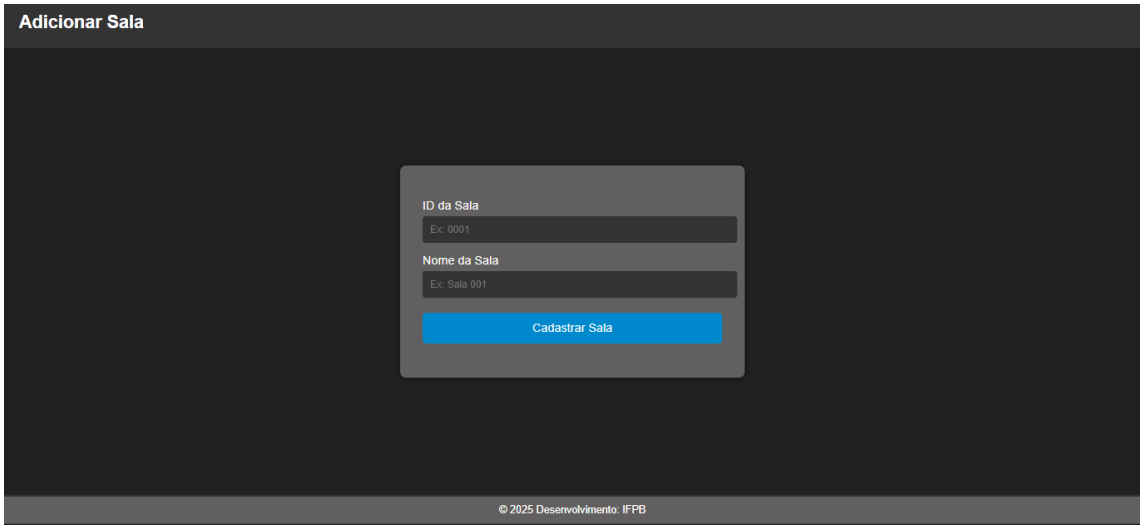


Figura 14. Tela de Adição de Sala

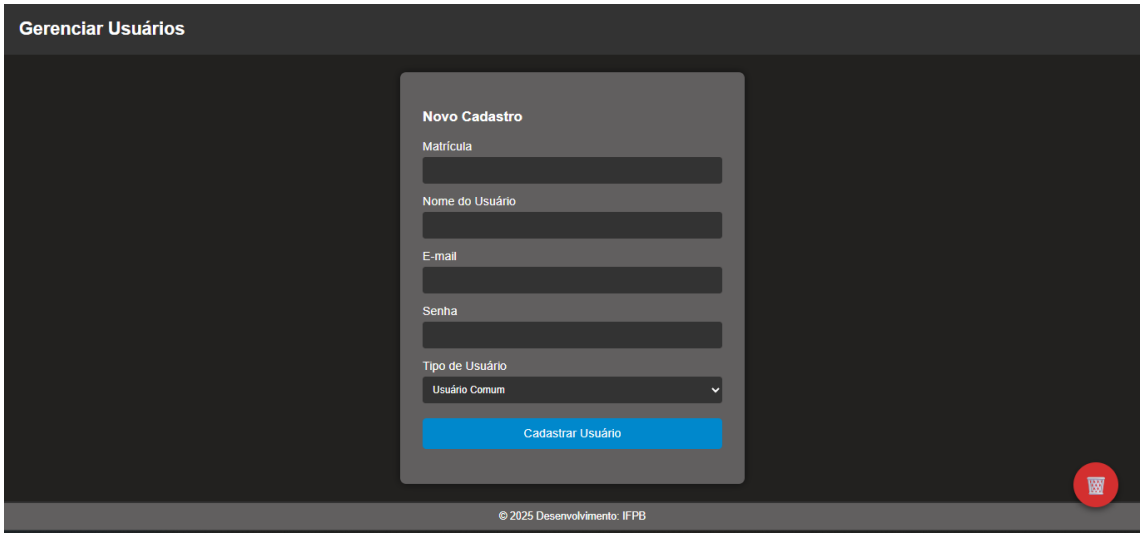


Figura 15. Tela de Adição de Usuários

Através do ícone vermelho na tela, pode-se deletar o usuário pela matrícula, como mostrado na sequência de imagens 15 e 16.

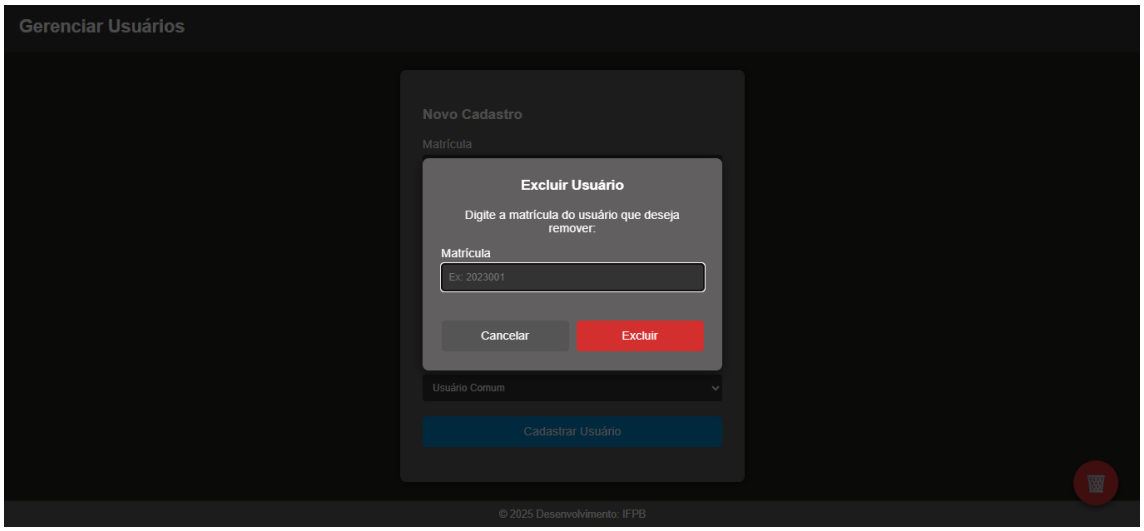


Figura 16. Pop-up de Remoção de Usuário

3. Resultados

3.1. Avaliação da Detecção de Presença

Os sensores PIR apresentaram um desempenho satisfatório em cenários com múltiplas pessoas no ambiente. Contudo, observou-se a ocorrência de falsos negativos em situações de ocupação unitária estática, evidenciando limitações no campo de visão e na sensibilidade de um único componente. Constatou-se, assim, que a escalabilidade do sistema para salas de aula reais demanda uma topologia de sensores distribuídos para garantir a cobertura total da área.

3.2. Emulação de Sinal Infravermelho

No tocante ao ar-condicionado, os testes experimentais permitiram compreender como o aparelho utilizado (Ar-condicionado TCL) funciona. Os comandos enviados pelo controle são estruturas completas que carregam os estados de cada variável pertinente ao aparelho. Diferente dos protocolos de aparelhos domésticos simples, como televisores, em que cada acionamento do botão é um comando simples isolado (incremento de volume ou mudança de canais), os protocolos de ar-condicionado transmitem o estado completo de operação (temperatura, modo de operação, velocidade de ventilação) em cada emissão.

A Tabela 2 destaca as funcionalidades padronizadas para o uso comum do laboratório em estudo.

Tabela 2. Configurações padrão fixadas para o ar-condicionado durante os testes.

Funcionalidade	Estado/Valor
Temperatura	23 °C
Modo	Refrigerar
Ventilação	2
Aleta vertical	Não
Aleta horizontal	Não
Siga-me	Não
Turbo	Não
Potência	Off
Timer	Não
Dormir	Não
Eco	Não
Display	Sim
Auto-limpeza	Não

A padronização destas funcionalidades permitiu isolar a variável de temperatura, garantindo o foco exclusivo nesta grandeza durante a captura e análise dos sinais. Essas mesmas configurações foram mantidas para as demonstrações subsequentes.

O dispositivo opera por meio da emulação dos sinais do controle original do aparelho, utilizando a biblioteca IRremote e um receptor infravermelho universal VS1838B. Entretanto, não houve êxito nas primeiras tentativas de reprodução do sinal. A investigação da causa do problema, fundamentada na teoria de temporização de sinais de Bergmans

[9] e assistida por análises em um osciloscópio, revelou que os tempos de marcação e espaço do sinal sintetizado pelo microcontrolador apresentavam severas discrepâncias em relação ao sinal original.

Durante os testes iniciais de emissão, a taxa de sucesso na execução dos comandos pelo aparelho foi inferior a 50%. Para diagnosticar a falha, procedeu-se ao isolamento das variáveis de hardware, testando-se individualmente os componentes periféricos, com exceção do microcontrolador. A substituição do LED emissor infravermelho, do transistor de acionamento e das conexões elétricas não resultou em melhorias, indicando que a causa não residia no circuito físico. Em seguida, investigou-se a distância de transmissão como possível variável participante, porém o aparelho não apresentou variação de responsividade em função da aproximação ou do afastamento do emissor.

Diante da ineficácia das alterações físicas, retomou-se a análise instrumental via osciloscópio para uma investigação aprofundada da modulação. A seguir estão apresentadas as leituras obtidas dos sinais trabalhados, mantendo as configurações mencionadas anteriormente. Os sinais foram extraídos em formato *Comma-Separated Values* (CSV) do osciloscópio, convertendo-se o eixo de tempo de segundos para microssegundos a fim de facilitar a visualização. Os tempos ociosos foram recortados com uma margem de segurança de 10 ms para focar estritamente nos pacotes de dados. Para lidar com o ruído, os sinais foram digitalizados através de um limiar de tensão de 2,0 V para o receptor (lógica Ativo-Baixo) e 1,5 V para o emissor (lógica Ativo-Alto). Por fim, para facilitar a comparação visual, os sinais foram sobrepostos em eixos temporais sincronizados.

Na parte superior da Figura 17 está ilustrado o sinal enviado pelo controle original do aparelho TCL, capturado pelo receptor. Na parte inferior, está o sinal correspondente, após a síntese e envio pelo ESP32.

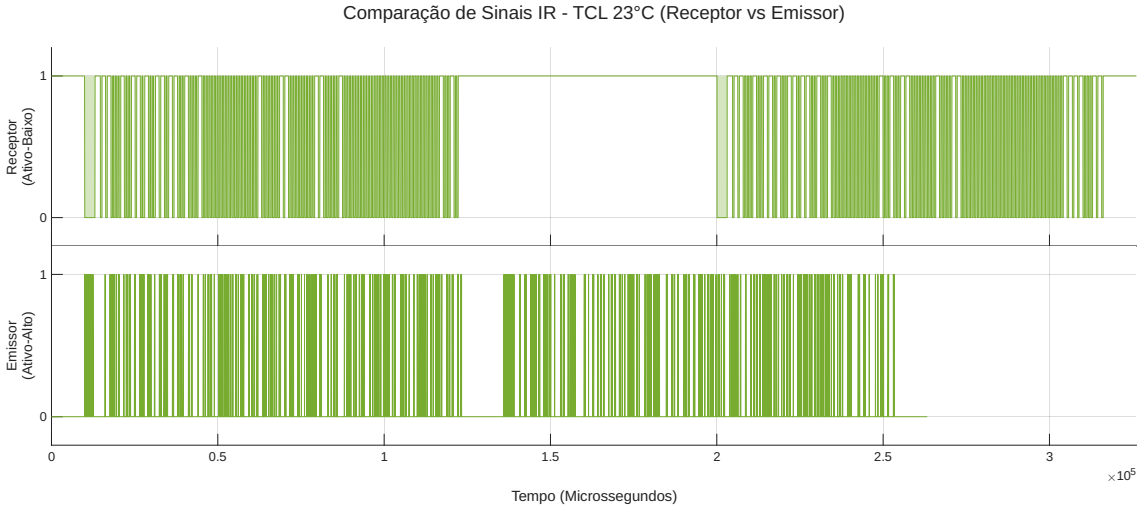


Figura 17. Comparação entre o sinal recebido do controle original e o emitido.

A comparação visual dos oscilogramas revela discrepâncias severas na estrutura dos sinais, justificando a falha de decodificação pelo receptor do climatizador. Como alternativa para contornar essa limitação, constatou-se que um controle remoto de outro modelo (Philco) apresentava compatibilidade com o aparelho alvo do projeto. Conduziu-

se, portanto, o mesmo procedimento de captura e decodificação de sinal para este segundo dispositivo, e o resultado está ilustrado na Figura 18.

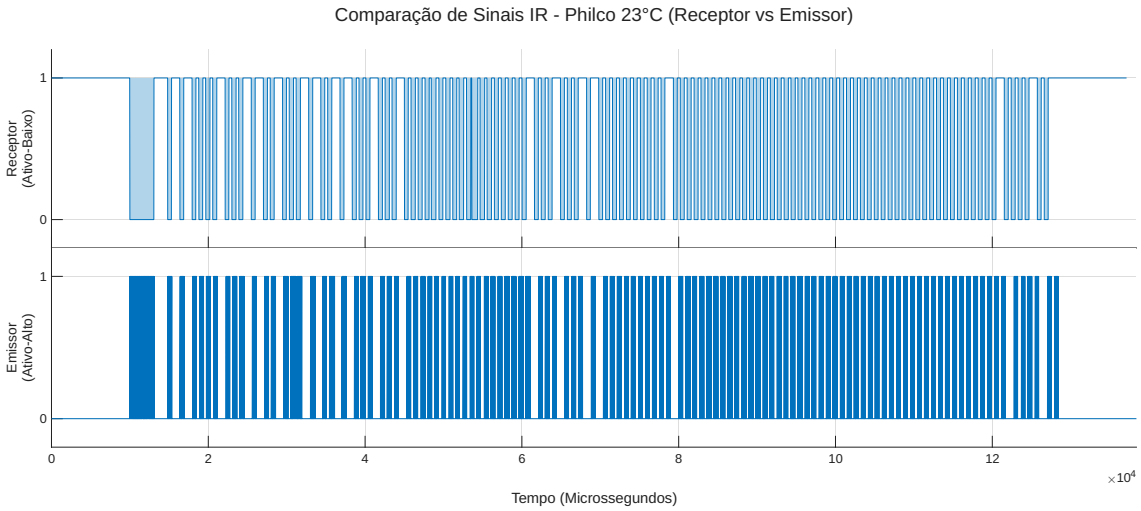


Figura 18. Comparação entre o sinal recebido do controle alternativo e o emitido.

Embora o protocolo de transmissão deste segundo controle opere sob características de modulação distintas, a estrutura lógica dos dados manteve-se compatível, permitindo o aprimoramento substancial da reprodução dos comandos. Após os ajustes, a taxa de sucesso de execução saltou para mais de 95%, conferindo alta confiabilidade à automação. Ainda assim, para mitigar as perdas de pacotes ópticos inerentes à comunicação infravermelha em ambientes abertos, implementou-se uma rotina de redundância no software, programando o microcontrolador para transmitir o mesmo conteúdo três vezes consecutivas a cada acionamento.

Como os comandos deste protocolo encapsulam o estado completo da máquina (configurando-se como atualizações absolutas de sistema e não como incrementos isolados), essa redundância intencional não gerou efeitos colaterais ou instabilidades no funcionamento do climatizador.

No que tange às métricas físicas de alcance, a validação final atestou a robustez da solução. Devido às restrições espaciais do laboratório, a distância máxima testada entre o LED emissor e o receptor do ar-condicionado foi de 6 metros, cenário no qual obteve-se uma taxa de sucesso superior a 80% na recepção do sinal. Essa eficácia na transmissão física garantiu que o receptor decodificasse as instruções corretamente, viabilizando o controle remoto e autônomo do dispositivo de forma consistente.

A Tabela 3 resume as métricas de alcance e confiabilidade obtidas durante os testes de emissão.

Tabela 3. Resultados dos testes de eficácia da emissão infravermelha pelo ESP32.

Configuração do Sinal	Distância Testada	Taxa de Sucesso
Protocolo Original (TCL)	2 m	$< 50\%$
Protocolo Philco (Curto alcance)	2 m	$> 95\%$
Protocolo Philco (Alcance máximo)	6 m	$> 80\%$

3.3. Integração de Sistemas e Backend

Após a validação do protótipo em ambiente local, a implementação inicial do armazenamento em nuvem utilizou a plataforma Google Firebase, escolha motivada pela agilidade de integração e familiaridade prévia com a ferramenta. Contudo, durante a fase de testes de estresse, observaram-se instabilidades recorrentes na conexão entre o microcontrolador e o serviço, resultando em falhas de registro ou comandos não realizados, mesmo sem alterações na lógica do firmware. Diante da necessidade de uma infraestrutura mais resiliente, optou-se pela migração para o MongoDB Atlas.

Essa transição exigiu uma reestruturação da arquitetura do sistema, com a introdução de uma camada de aplicação intermediária (backend) desenvolvida em Flask. A adoção deste framework em Python desacoplou o hardware e a base de dados, viabilizando a comunicação bidirecional via WebSockets. Esta nova configuração permitiu que o controle remoto e a atualização de registros históricos ocorressem de forma síncrona e eficaz, garantindo a integridade dos dados e a reatividade necessária para o gerenciamento energético.

Porém, ao alcançar a etapa de integração do sistema, observou-se uma falha crítica na comunicação. Os comandos oriundos da interface web atuavam em uma instância de banco de dados diferente daquela que a API Flask monitorava para se comunicar com o microcontrolador, resultando na não percepção de alterações no banco e no não reconhecimento dos comandos. Portanto, diante dessa situação em que havia duas frentes distintas, fez-se necessário mesclar as APIs e unificar a arquitetura na plataforma Node.js. Essa mudança permitiu eliminar o conflito de instâncias e restaurar a integridade da comunicação dentro do sistema.

Conduzidos os testes de caixa-preta na interface web, com foco na usabilidade e na precisão da comunicação em tempo real, verificou-se a integridade do fluxo de dados entre o painel de controle do usuário e os atuadores físicos. A Tabela 4 apresenta o tempo médio de resposta obtido entre o ESP32 e a interface após a integração final da arquitetura.

Tabela 4. Tempo médio de resposta entre a interface web e o ESP32.

Ação Realizada	Tempo Médio de Resposta
Atualizar estado da Luz	41,4 ms
Atualizar estado do Ar-condicionado	3415,8 ms
Registrar log PIR	25 ms
Registrar log DHT11	33,1 ms
Enviar comando Power Luz	33,7 ms
Enviar comando Power Ar	3416,2 ms
Enviar comando Definir Temperatura	3412,3 ms

4. Discussões

4.1. Limitações Sensoriais e Aplicação no Mundo Real

Os falsos negativos oriundos da ocupação estática constituem um dos principais desafios na transição do ambiente laboratorial para a implementação em salas de aula reais. Indivíduos em repouso durante atividades acadêmicas comportam-se como alvos estáticos, o que reduz a precisão de leitura do sensor infravermelho passivo, especialmente em zonas periféricas de seu campo de visão.

Considerando as topologias típicas de instalação ,como a fixação adjacente às portas ou centralizada no teto, a detecção contínua torna-se crítica em cenários de baixa densidade ocupacional com usuários esparsos. Nessas circunstâncias, o sistema isolado apresenta vulnerabilidades, podendo exigir que os ocupantes realizem movimentos intencionais para evitar o seccionamento incorreto da iluminação e da climatização.

Embora a parametrização dos temporizadores ofereça certa flexibilidade lógica para mitigar esse efeito, a viabilidade da aplicação no mundo real demanda um planejamento topológico rigoroso para o posicionamento estratégico dos sensores. Ademais, como proposta de robustez física, a literatura técnica endossa a integração de sensores ultrassônicos ou detectores de micro-ondas. Essa hibridização sensorial fortaleceria a confiabilidade do sistema de detecção, cobrindo as deficiências do espectro infravermelho e mantendo a viabilidade econômica de produção do protótipo.

No âmbito da infraestrutura, a implantação física do projeto suscita requisitos estritos de segurança elétrica. Como o dispositivo atua diretamente na rede de potência da instituição, o circuito definitivo exige o emprego de módulos de acionamento com isolamento galvânico adequado e dispositivos de proteção contra sobrecorrentes. Dessa forma, é imprescindível que a instalação e a revisão sejam conduzidas por profissionais habilitados, garantindo a integridade patrimonial e a eficácia operacional do sistema de eficiência energética, sem comprometer a rede elétrica pré-existente.

4.2. Desafios na Engenharia Reversa de Protocolos Proprietários

A dificuldade enfrentada na emulação do protocolo infravermelho, relatada nos Resultados, ilustra a complexidade inerente ao desenvolvimento de soluções IoT baseadas em engenharia reversa de sinais proprietários. Constatou-se que a dependência exclusiva de bibliotecas de alto nível de abstração mostrou-se insuficiente diante das tolerâncias rigorosas de hardware do receptor do aparelho TCL.

O diagnóstico dessa falha configura uma das principais contribuições técnicas deste trabalho. A utilização do osciloscópio transcendeu a simples observação, atuando como ferramenta diagnóstica primária para isolar a falha física de temporização (tempos de marcação e espaço). Esse processo evidenciou que erros de interoperabilidade em sistemas embarcados muitas vezes não residem na lógica de programação, mas na modulação do sinal elétrico.

Além disso, o sucesso obtido ao explorar um controle remoto alternativo demonstra um importante conceito de resiliência de hardware: o receptor do ar-condicionado mostrou-se tolerante a variações marginais na modulação física do pulso. Esse comportamento justifica-se pelo fato de que os receptores infravermelhos são nativamente projetados para possuir tolerância e filtrar ruídos térmicos ambientais, visto que fontes naturais e

artificiais de calor (como radiação solar, corpos humanos e aquecedores) também emitem radiação no mesmo espectro. Consequentemente, contanto que a raiz lógica da informação (o *payload* binário que carrega o estado da temperatura e ventilação) se mantenha íntegra, a decodificação dos comandos ocorre com êxito.

Essa constatação reforça a importância da análise de baixo nível e da validação cruzada no desenvolvimento de interfaces autônomas de controle climático.

4.3. Escalabilidade e Trabalhos Futuros na Emulação Infravermelha

Como referenciado por Bergmans[9], a emissão infravermelha representa a solução de menor custo computacional e financeiro para o controle remoto de dispositivos. Com a validação empírica da captura e síntese dos pulsos pelo microcontrolador, viabiliza-se um leque de expansões arquiteturais para o sistema em trabalhos futuros.

Embora o escopo atual tenha se delimitado à modulação do estado operacional e do setpoint de temperatura, o protocolo do climatizador abriga diversas outras funções exploráveis. Do ponto de vista de hardware, a capacidade de memória Flash nativa do ESP32 é abundante o suficiente para armazenar as matrizes de múltiplos novos comandos sem comprometer o processamento. Ressalta-se, contudo, a necessidade de submeter tais funcionalidades secundárias à mesma metodologia de validação instrumental detalhada anteriormente. Além disso, a flexibilidade de configuração da biblioteca *IRremote* confere ao sistema uma alta versatilidade, viabilizando a interoperabilidade de controle com praticamente qualquer ar-condicionado suportado pela biblioteca.

No que tange à topologia física, propõe-se a implementação de um arranjo emissor omnidirecional (360°). Essa configuração seria obtida pela disposição circular de múltiplos LEDs infravermelhos operando em paralelo. Tal arranjo mitigaria a dependência de visada direta estrita (*Line of Sight*), garantindo que a varredura espacial dos comandos abrangesse toda a extensão tridimensional da sala, ao invés de se limitar a um vetor unidirecional.

4.4. Análise de Viabilidade Econômica do Protótipo

Conforme destacado ao longo deste estudo, a viabilidade econômica é um critério crucial para a adoção do sistema, visto que a implementação dessa tecnologia em instituições de ensino demanda a reprodução do dispositivo em larga escala. Diante dessa premissa, a manutenção de um baixo custo de manufatura torna-se essencial. A Tabela 5 apresenta o levantamento financeiro detalhado referente à aquisição dos componentes de *hardware* empregados na montagem do protótipo inicial.

Tabela 5. Custos de aquisição dos componentes do protótipo desenvolvido.

Componente	**Custo de Aquisição (R$)**
Transistor NPN BC547	0,30
Par Receptor e LED Emissor IR	1,50
Pacote de Resistores de 220 Ω (10 unidades)	1,50
Pacote de Resistores de 10 KΩ (10 unidades)	1,50
Receptor Infravermelho Universal VS1838B	2,00
Módulo Relé 5V (1 Canal)	8,90
Sensor de Presença PIR HC-SR501	12,90
Módulo Sensor de Temperatura e Umidade DHT11 com *Jumpers*	14,90
Fonte de Alimentação 5V 3A Micro USB	29,90
Microcontrolador ESP32 DevKitC (Wi-Fi/Bluetooth, 30 pinos)	54,90
Custo Total de Hardware	**128,30**

O montante de R$ 128,30 demonstra o baixo custo produtivo do dispositivo. É pertinente ressaltar que a utilização de componentes de prateleira (*Commercial Off-The-Shelf* - COTS) e de um microcontrolador de arquitetura aberta, como o ESP32, confere ao projeto um alto potencial de escalabilidade.

Além disso, o custo unitário real do dispositivo é marginalmente inferior ao apresentado, visto que componentes comercializados em lotes (como os resistores) geram peças excedentes que podem ser reaproveitadas na fabricação de módulos adicionais, mesmo que haja variação constante nos preços dos componentes e outros custos no processo de fabricação, como transporte, despesas do local de montagem, impostos, etc. No entanto, continua se apresentando um produto de baixo custo em relação ao valor dos aparelhos ar-condicionados e ao volume de energia gastos em prédios e repartições públicas.

Dessa forma, a solução mostra-se financeiramente sustentável para reprodução em larga escala, viabilizando o monitoramento autônomo de múltiplas salas de aula com baixo investimento inicial.

5. Conclusão

A viabilidade da aplicação de tecnologias de IoT para a mitigação do desperdício energético em instituições de ensino foi devidamente comprovada por este projeto. A solução desenvolvida demonstrou sucesso ao integrar as camadas de *hardware* e *software*, permitindo o controle autônomo da rede de iluminação e dos aparelhos de climatização com base na ocupação em tempo real dos ambientes. Ademais, a reestruturação arquitetural para um ecossistema unificado em Node.js, aliada ao banco de dados NoSQL, revelou-se fundamental para contornar gargalos de integração e garantir a estabilidade do sistema.

No âmbito da atuação física, a engenharia reversa dos sinais infravermelhos evidenciou que a rigorosa validação instrumental é imperativa. Constatou-se, de forma contundente, que o receptor do climatizador apresenta alta resiliência, aceitando protocolos de marcas alternativas desde que a estrutura lógica do comando se mantenha íntegra. Essa descoberta atesta que, embora o microcontrolador exija a configuração prévia de matrizes de dados específicas, a plataforma desenvolvida é altamente flexível e interoperável com uma vasta gama de aparelhos comerciais.

Em contrapartida, as avaliações práticas explicitaram que a dependência de sensores PIR isolados apresenta limitações em cenários de ocupação estática e que a instalação física demanda estritos protocolos de segurança elétrica. Diante disso, estudos futuros deverão englobar testes de escalabilidade em larga escala, aliados à adoção de malhas sensoriais complementares, visando ao amadurecimento e a validação definitiva do protótipo para o ambiente de produção.

Ainda assim, o levantamento financeiro atestou o baixo custo de manufatura da solução, alinhando-se às premissas de projetos IoT de fácil implementação. Conclui-se que a arquitetura proposta possui elevado potencial para impactar positivamente a matriz de consumo das instituições de ensino. Essa integração resulta na redução direta de custos com energia elétrica, promovendo a sustentabilidade ambiental por meio da gestão inteligente, autônoma e eficiente de recursos.

Referências

1 PAIXãO, M. F. B. d. *Sistema de gestão de energia em universidades federais brasileiras: Um estudo de caso na Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia*. Dissertação (Dissertação de mestrado) — Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2021. Disponível em: <http://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/33303>. Acesso em: 10 mar. 2026.

2 OLIVEIRA, A. G. et al. *Sistema automatizado de monitoramento e controle de energia elétrica para ambientes educacionais*. [S.l.], 2020. Acesso em: 9 mai. 2025.

3 NOOR, T. H. et al. An iot-based energy conservation smart classroom system. *Intelligent Automation and Soft Computing*, 2022. Acesso em: 29 out. 2025.

4 SHAH, S. F. A. et al. The role of machine learning and the internet of things in smart buildings for energy efficiency. *Applied Sciences*, v. 12, n. 15, p. 7882, 2022. Acesso em: 22 mai. 2025.

5 PARISIO, A. et al. Energy management systems for intelligent buildings in smart grids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018. Acesso em: 2 set. 2025.

6 CHONG, P. L. et al. A triz approach for designing a smart lighting and control system for classrooms based on counter application with dual pir sensors. *Sensors*, v. 24, n. 4, p. 1177, 2024. Acesso em: 15 out. 2025.

7 WIBOWO, F.; SUHERI, S.; YUGIANUS, P. An iot-enabled smart energy management system to improve energy efficiency in university laboratory. *Sinkron: Jurnal dan Penelitian Teknik Informatika*, v. 8, n. 2, p. 1038–1046, 2024. Acesso em: 17 nov. 2025.

8 KATSOULIS, S.; KOULOURAS, G.; CHRISTAKIS, I. Energy-efficient data acquisition and control system using both lorawan and wi-fi communication for smart classrooms. In: *IEEE International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCAST)*. Sofia, Bulgária: [s.n.], 2024. p. 1–4. Acesso em: 5 jan. 2026.

9 BERGMANS, S. *Infrared (IR) Remote Control Theory*. 20–. SB-Projects. Disponível em: <https://www.sbprojects.net/knowledge/ir/index.php>. Acesso em: 8 dez. 2025.

10 AMBER, K. P. et al. Energy consumption forecasting for university sector buildings. *Energies*, v. 10, p. 1579, 2017. Acesso em: 2 set. 2025.

11 RESENDE, L.; SOARES, M.; FERREIRA, P. G. C. A demanda por energia elétrica no brasil: uma visão sobre os modelos de previsão de longo prazo. *Revista Brasileira de Economia*, v. 58, n. 1, p. 68–98, 2004. Acesso em: 10 jan. 2026.

12 SIMEON, M. et al. Efficient energy management system using pir sensor. In: *IEEE PES/IAS PowerAfrica*. Cape Town, África do Sul: [s.n.], 2018. p. 601–606. Acesso em: 18 set. 2025.

13 TWUMASI, C. et al. *Energy Saving System using a PIR Sensor for Classroom Monitoring*. Accra, Gana, 2017. 347–351 p. Acesso em: 27 out. 2025.

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
Campus Campina Grande - Código INEP: 25137409
R. Tranqüilino Coelho Lemos, 671, Dinamérica, CEP 58432-300, Campina Grande (PB)
CNPJ: 10.783.898/0003-37 - Telefone: (83) 2102.6200

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

Cópia de TCC

Assunto:	Cópia de TCC
Assinado por:	Fagner Araujo
Tipo do Documento:	Anexo
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Fagner de Araujo Pereira**, **PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 17/11/2026 20:32:21.

Este documento foi armazenado no SUAP em 17/11/2026. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/ e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 2051021
Código de Autenticação: e8186fe548