

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
ESCOLA POLITÉCNICA / ENGENHARIA ELÉTRICA
Trabalho Final de Curso

Derek Paixão Silva Leite
Lucas Vinhal Andrade

**SISTEMA DE CONTROLE ADAPTATIVO DE AR-CONDICIONADO BASEADO EM
CONDIÇÕES AMBIENTAIS**

Trabalho Final de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção dos títulos de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação e de Bacharel em Engenharia Elétrica apresentado à Pontifícia Universidade Católica de Goiás.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Fabio Manoel Sá Simões – Orientador. POLI-PUC Goiás.
Prof. Dr. Marcos Antônio de Sousa – Avaliador. POLI-PUC Goiás.
Prof. Dr. Carlos A. Vasconcelos Bezerra – Avaliador. POLI-PUC Goiás.

Goiânia, 28 de novembro de 2025.

SISTEMA DE CONTROLE ADAPTATIVO DE AR-CONDICIONADO BASEADO EM CONDIÇÕES AMBIENTAIS

DEREK PAIXÃO SILVA LEITE, LUCAS VINHAL ANDRADE, FABIO MANOEL SÁ SIMÕES

Abstract — This work presents the development of a monitoring and climate control management system based on Internet of Things (IoT), with the objective of automatically controlling temperature, aiming at the thermal comfort of the environment and optimization of electrical energy consumption. For this purpose, an embedded system composed of two distinct subsystems was developed. The first monitors temperature, relative air humidity and presence in the environment through sensors, while the second is responsible, through infrared, for the automatic manipulation of the actuator which is the air conditioning unit. Furthermore, integration between the sensors and cloud was carried out, through the sending of data via wi-fi integrated in the microcontroller, for remote monitoring of environmental variables and calculated indicators. The system was tested in a real environment. Data collection and tabulation of results were performed, allowing observation of the system's functioning and its capacity to promote thermal comfort combined with energy savings.

Keywords: *air conditioning; automation; embedded systems; energy efficiency; internet of things (IoT); temperature control.*

Resumo – Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de monitoramento e gerenciamento de climatização baseado em Internet das Coisas (IoT), com o objetivo de controlar automaticamente a temperatura, visando o conforto térmico do ambiente e otimização do consumo de energia elétrica. Para tanto, foi desenvolvido sistema embarcado composto por dois subsistemas. O primeiro monitora a temperatura, umidade relativa do ar e presença no ambiente através de sensores, ao passo que o segundo é o responsável, através de infravermelho, pela manipulação automática do atuador, que é o aparelho de ar-condicionado. Ademais, realizou-se integração entre os sensores e nuvem, por meio do envio de dados via *wi-fi* integrado no microcontrolador, para monitoramentos das variáveis ambientais e indicadores calculados de maneira remota. O sistema foi testado em ambiente real. Foi efetuada a coleta e tabulação dos resultados, permitindo observar o funcionamento do sistema e sua capacidade de promover conforto térmico aliado à economia de energia.

Palavras-chave: ar-condicionado; automação; controle de temperatura; eficiência energética; internet das coisas (IoT); sistemas embarcados.

I. INTRODUÇÃO

O rápido progresso da digitalização e a disseminação de soluções conectadas têm impulsionado a criação de sistemas inteligentes capazes de monitorar, interpretar e intervir em variáveis ambientais em tempo real. No âmbito da climatização de ambientes, essa tendência é confirmada por meio da revisão da literatura [01]. O uso da Internet das Coisas (IoT) para automação, monitoramento e gerenciamento energético tem crescido devido à oferta de microcontroladores de baixo custo com conectividade nativa, como o ESP32, e à disponibilidade de redes sem fio estáveis [02].

Embora a tecnologia tenha avançado, muitos sistemas de climatização ainda funcionam de maneira manual, utilizando apenas controles remotos convencionais. Isso significa ignorar aspectos como a ocupação real do espaço ou o conforto térmico que pode resultar, entre outras coisas, em desperdício de energia e diminuição da vida útil dos aparelhos. Esse é, portanto, o problema que leva a esta pesquisa.

Nesse contexto, a questão de pesquisa que se apresenta é: Como desenvolver um sistema acessível, modular e inteligente que possa ajustar automaticamente a climatização de um ambiente, garantindo ao mesmo tempo o conforto térmico e a eficiência energética?

Para isso, a IoT surge como uma opção a ser considerada, especialmente quando vinculada a modelos de conforto térmico, como o Voto Médio Estimado, do inglês *Predicted Mean Vote* (PMV) e o Percentual de Pessoas Insatisfeitas, do inglês *Predicted Percentage of Dissatisfied* (PPD) [03], que são regulamentados por normas internacionais como ISO 7730 [04] e ASHRAE 55 [05]. Com base em temperatura, umidade e parâmetros fisiológicos, esses modelos possibilitam a estimativa da percepção térmica média dos ocupantes.

Diante do apresentado, o objetivo principal deste estudo é desenvolver um protótipo de controle adaptativo de climatização baseado em IoT, capaz de monitorar as condições ambientais e operar automaticamente um aparelho de ar-condicionado, assegurando o conforto térmico ideal e reduzindo o consumo de energia. Frente a isso, surgem os objetivos específicos: i) projetar um sistema embarcado para coletar dados de temperatura, umidade e presença; ii) criar um algoritmo para calcular o PMV/PPD e a lógica de tomada de decisão; iii) adicionar um módulo de comunicação infravermelha para enviar comandos ao ar-condicionado; e iv) avaliar a eficácia do protótipo por meio de testes experimentais em um ambiente controlado.

A hipótese principal deste estudo é que um sistema de climatização inteligente, fundamentado na Internet das

Coisas (IoT) e combinado com indicadores de conforto térmico e sensores de ocupação, pode diminuir o consumo de energia elétrica sem afetar o conforto dos usuários. Dessa forma, este estudo se integra ao esforço atual de criar soluções sustentáveis, acessíveis e tecnologicamente viáveis para ambientes inteligentes, contribuindo para a otimização do desempenho térmico e energético dos edifícios.

Do ponto de vista metodológico, o estudo foi organizado em quatro etapas. Primeiro, foi realizada uma revisão da literatura a respeito do conforto térmico, dos modelos PMV/PPD, das normas técnicas [04] [05] [06] e da aplicação da IoT em sistemas de climatização, visando embasar as decisões do projeto. Em seguida, foram realizados o dimensionamento e a implementação do protótipo, que incluíram a seleção dos sensores, a montagem do circuito, a programação do ESP32 e a integração do módulo infravermelho. Posteriormente, foram conduzidos testes experimentais para validar o desempenho do sistema em condições reais de variação de temperatura e ocupação. Por fim, foram realizados ajustes e calibrações para aprimorar o desempenho, a estabilidade e a exatidão das medições, consolidando o protótipo para a avaliação dos resultados.

II. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

A. Fundamentos do Conforto Térmico

O conforto térmico é um elemento importante da qualidade ambiental interna e tem sido estudado por sua influência direta no bem-estar e no desempenho das pessoas. As bases utilizadas hoje foram propostas por Fanger (1970) [03], que desenvolveu o modelo PMV/PPD, posteriormente incorporado às normas ASHRAE 55, ISO 7730 e NBR 16401-2. Trabalhos posteriores ampliaram essa visão ao mostrar que, além das variáveis ambientais, fatores pessoais como vestimenta, metabolismo e adaptação ao clima também influenciam a percepção térmica [07] [08].

O modelo atual apresenta uma análise baseada no cálculo de dois indicadores: i) Voto Predito Médio (PMV), valor representado em uma escala de -3 (sensação térmica de extremo frio) a +3 (sensação térmica de extremo calor). Calculado com base em 4 variáveis ambientais (temperatura do ar, umidade relativa, temperatura radiante média e velocidade do ar) e 2 variáveis pessoais (metabolismo e isolamento térmico da vestimenta) e ii) Percentual de Pessoas Insatisfeitas (PPD), calculado com base no PMV. Apresentado entre os valores de 5% (cenário ideal, quando o PMV assume o valor 0) e 100% (quando compreendido em uma das extremidades da escala). Evidenciando o percentual estimado de pessoas que não estão na condição de conforto térmico.

Pesquisas recentes mostram que edificações brasileiras ainda não atendem às condições térmicas recomendadas. Da Costa e De Lima (2025) [09], ao revisarem estudos do ENCAC/ENLACAC, apontam que diversas escolas operam fora das faixas adequadas, o que pode prejudicar o conforto e o desempenho cognitivo. De forma semelhante, Marçal et al. (2018) [10] ressaltam que o desconforto térmico afeta o processo de aprendizagem, reforçando a importância de ambientes mais equilibrados.

A influência do clima local e das estratégias de projeto também aparece de forma consistente na literatura. Benevides, Machado e Carlo (2025) [11] destacam que o zoneamento climático é essencial para a escolha de soluções

passivas e medidas de controle nas edificações. Em Belo Horizonte, Ferreira, Loura e Assis (2024) [12] observaram que mudanças no clima urbano e no uso dos materiais alteraram o desempenho térmico de edificações ao longo dos anos, mesmo quando inicialmente apresentavam boas condições.

O interesse por soluções de eficiência térmica também tem crescido. Soares, Oliveira e Santos (2016) [13] compararam diferentes tipos de coberturas e verificaram que o telhado verde proporciona maior estabilidade térmica. Chepp e Gasparin (2019) [14] chegaram a conclusões semelhantes ao mostrar reduções de temperatura e de consumo energético após melhorias no isolamento térmico da envoltória.

Por fim, estudos em ambientes climatizados mostram que a percepção térmica nem sempre corresponde ao previsto pelos modelos teóricos. Rupp et al. (2017) [15] identificaram diferenças entre o conforto medido em campo e o estimado por métodos analíticos, especialmente quando o comportamento dos usuários não é considerado. Em complemento, Melo (2018) [16] demonstrou que simulações computacionais como as feitas no *EnergyPlus* são úteis, mas dependem de calibração e de dados confiáveis para representar adequadamente a realidade observada.

B. Modelos Preditivos e Adaptativos de Conforto

Embora o modelo preditivo de Fanger seja utilizado em ambientes controlados, ele nem sempre representa adequadamente as respostas térmicas de ocupantes em edificações com ventilação natural ou em regiões com grande variabilidade climática, conforme apontado por De Dear e Brager (1998) [07]. Estes, por sua vez, apresentaram modelos adaptativos de conforto térmico que consideram a influência do comportamento, das expectativas e da aclimação ao clima local. J. F. Nicol (2004) [08] complementou essa abordagem ao destacar o papel das ações comportamentais, como abrir janelas, ajustar roupas ou utilizar ventiladores, como parte integrante da percepção de conforto.

Pesquisa realizada por Auliciems e de Dear (1987) [17] mostrou que, em regiões tropicais, os ocupantes tendem a tolerar faixas térmicas mais amplas do que as previstas pelos modelos clássicos. Essa flexibilidade reforça a importância de estratégias adaptativas e de controle dinâmico para reduzir o consumo de energia sem comprometer o conforto.

Humphreys e Nicol (2004) [18] demonstram que a sensação térmica observada em edifícios de clima quente varia de forma consistente com a temperatura externa, indicando que os usuários ajustam seu conforto a partir das condições climáticas do entorno, um fator não contemplado no modelo de Fanger. De forma semelhante, Wong e Khoo (2003) [19], ao analisarem edifícios de Singapura, verificaram que o PMV superestimava o desconforto térmico em condições de ventilação natural, reforçando a necessidade de modelos que incorporem mecanismos adaptativos.

Outro ponto destacado na literatura é que a própria ocupação e o grau de controle dos usuários sobre o ambiente influenciam diretamente a percepção térmica. Brager e de Dear (2001) [20] evidenciaram que ambientes onde os ocupantes podem interagir com janelas, cortinas ou ventilação apresentam maior aceitação térmica, mesmo em condições fora dos limites previstos pelo PMV. Pesquisas mais recentes, como a de Rupp, Vásquez e Ghisi (2015) [21], confirmam essa tendência, apontando que a satisfação térmica aumenta quando o modelo adaptativo é aplicado em

regiões de clima quente e úmido, cenário comum no contexto brasileiro.

C. Aplicações e Ferramentas Computacionais para Conforto Térmico

O uso de ferramentas computacionais para análise de conforto térmico tem crescido, impulsionado pela necessidade de compreender o comportamento térmico de ambientes complexos e propor soluções mais eficientes. Entre as abordagens mais recentes, destaca-se o emprego de técnicas de inteligência artificial. Olinger et al. (2019) [22] demonstraram que redes neurais artificiais podem prever de forma eficaz o conforto térmico em escritórios naturalmente ventilados, permitindo estimativas mais flexíveis que os modelos tradicionais. Essa abordagem evidencia o potencial dos métodos computacionais para capturar padrões que dependem do comportamento real dos ocupantes.

Além das aplicações humanas, ferramentas computacionais também têm sido utilizadas em estudos experimentais de conforto térmico em outros contextos. Pacheco (2019) [23], por exemplo, desenvolveu um classificador para conforto térmico em bovinos utilizando modelagem numérica e termografia infravermelha, mostrando que algoritmos bem calibrados conseguem interpretar informações complexas derivadas do ambiente e dos organismos. Apesar de se tratar de outro domínio, a pesquisa reforça a versatilidade das metodologias computacionais aplicadas a sistemas térmicos.

No campo das edificações, observa-se um avanço importante em soluções que auxiliam a avaliação normativa e o processo de projeto. Braga et al. (2025) [24] desenvolveram uma ferramenta automatizada para análise do desempenho térmico conforme a NBR 15575, facilitando a verificação de parâmetros exigidos pela norma sem necessidade de modelagens manuais extensas. Neves (2022) [25] destaca o uso do software Revit como recurso para simulação do comportamento térmico em edificações multifamiliares, ampliando a precisão das análises ainda na fase de concepção do projeto.

O panorama contemporâneo inclui ainda métodos computacionais voltados à simulação termoenergética avançada. Leitzke et al. (2021) [26], em uma revisão sistemática, demonstraram que técnicas de otimização multiobjetivo são cada vez mais empregadas em simulações com materiais de mudança de fase (PCM), permitindo avaliar cenários complexos e propor soluções mais eficientes para o desempenho térmico. Borges et al. (2025) [27] também evidenciam essa tendência ao aplicar fluidodinâmica computacional (CFD) para otimizar sistemas HVAC em ambientes acadêmicos, gerando informações detalhadas sobre padrões de fluxo de ar e variações térmicas internas.

Ferramentas computacionais têm ganhado protagonismo também em ambientes de alta complexidade. Rodrigues (2017) [28] aplicou modelagem numérica e avaliação experimental para investigar o conforto térmico em salas de operação, evidenciando a necessidade de simulações precisas para ambientes sensíveis. Já Rodrigues et al. (2017) [29] demonstraram a utilidade do Matlab para modelar sistemas de controle de ar-condicionado, mostrando que plataformas computacionais podem auxiliar tanto na análise térmica quanto no desenvolvimento de estratégias de automação.

D. Integração entre IoT e Sistemas de Climatização e Trabalhos Relacionados

A integração de dispositivos IoT aos sistemas de climatização tem ganhado relevância pela capacidade de monitorar variáveis ambientais em tempo real e ajustar automaticamente o funcionamento dos equipamentos. Valiante e Silva (2025) [30] destacam que arquiteturas centralizadas baseadas em IoT permitem tanto a automação quanto a otimização energética, possibilitando reduzir o consumo por meio de tomadas de decisão mais precisas. De maneira semelhante, Moraes Prates e Vargas (2024) [31] demonstram que infraestruturas IoT bem projetadas ampliam a supervisão e o controle de sistemas de climatização, criando ambientes mais responsivos às necessidades dos usuários.

O gerenciamento remoto tem sido outro foco importante de estudos recentes. Soares e Faria (2021) [32] aplicaram tecnologia IoT ao controle térmico de data centers, evidenciando ganhos em confiabilidade e eficiência operacional, especialmente em ambientes críticos. Domingues (2024) [33] reforça esse potencial ao explorar soluções de automação residencial baseadas em IoT e inteligência artificial, mostrando que mesmo aplicações domésticas podem se beneficiar de sistemas que analisam dados ambientais antes de decidir sobre o acionamento de climatizadores.

Além das aplicações práticas, novos sistemas buscam integrar inteligência local e tomada de decisão autônoma. Rocha (2019) [34] propôs um sistema de controle inteligente em ambientes IoT que ajusta recursos automaticamente, demonstrando a importância de algoritmos adaptativos em arquiteturas distribuídas. Santos (2021) [35] também analisou soluções e desafios para o controle de aparelhos de ar-condicionado via IoT, destacando limitações como alcance de sensores, padrões de comunicação e compatibilidade entre dispositivos, aspectos que ainda exigem aprimoramento para aplicações em larga escala.

A literatura aponta ainda iniciativas voltadas à eficiência energética em edifícios inteligentes. Nicolau et al. (2020) [36] desenvolveram um sistema IoT para climatização eficiente que associa sensores ambientais a estratégias inteligentes de controle, reduzindo o consumo sem comprometer o conforto dos ocupantes. Em outra vertente, Almeida (2025) investigou o uso de IoT para monitoramento remoto e prevenção de falhas em ambientes termicamente controlados, mostrando que sensores distribuídos podem aumentar a segurança operacional e antecipar problemas em sistemas HVAC.

Em conjunto, esses trabalhos indicam que a adoção de IoT na climatização avança tanto na automação básica quanto em soluções mais sofisticadas de análise de dados, otimização energética e manutenção preditiva. Contudo, observa-se uma lacuna na literatura relacionada à implementação de protótipos de baixo custo que integrem indicadores normativos de conforto térmico (como PMV/PPD) com acionamento automatizado de aparelhos convencionais por infravermelho, espaço no qual o presente trabalho se insere.

E. Considerações

A revisão da literatura evidencia avanço nas pesquisas voltadas ao conforto térmico, ao uso de ferramentas computacionais e à integração entre IoT e sistemas de climatização. Os estudos analisados mostram que há acúmulo de conhecimento sobre modelos preditivos, simulações termoenergéticas, inteligência computacional, monitoramento remoto e soluções de automação residencial

e predial. As contribuições demonstram que o uso combinado de sensores, plataformas digitais, redes neurais, algoritmos adaptativos e ferramentas normativas tem ampliado a precisão das análises e fortalecido a gestão energética em diferentes ambientes.

Apesar dos avanços, a revisão também revela lacunas importantes. A maior parte dos estudos concentra-se em simulações complexas, soluções de alto custo ou sistemas corporativos integrados, muitas vezes distantes da realidade de pequenos ambientes ou de aplicações que dependem de aparelhos convencionais de climatização. Observa-se escassez de protótipos acessíveis que combinem medições em tempo real, cálculo normativo de conforto (PMV/PPD) e atuação automática via infravermelho em equipamentos domésticos. Também são limitados os trabalhos que validam essas soluções em condições reais de uso, considerando ocupação intermitente, variabilidade térmica e consumo energético diário. Nesse contexto, o presente trabalho busca contribuir ao propor um sistema funcional de baixo custo, baseado em IoT.

III. MATERIAIS E MÉTODOS

A. Classificação Metodológica

Este estudo se caracteriza como uma pesquisa aplicada, pois busca solucionar um problema real relacionado ao gerenciamento térmico de ambientes climatizados. Quanto ao método, trata-se de uma pesquisa experimental, na medida em que envolve testes controlados com sensores, atuadores e algoritmos embarcados para verificar o desempenho do protótipo desenvolvido. Este trabalho também apresenta caráter exploratório e descritivo, uma vez que investiga o comportamento térmico do ambiente e descreve o funcionamento do sistema proposto por meio de medições sistemáticas. A Figura 01 apresenta o fluxograma do projeto, correspondendo às Etapas de Planejamento e Projeto, Implementação Física e Experimentação.

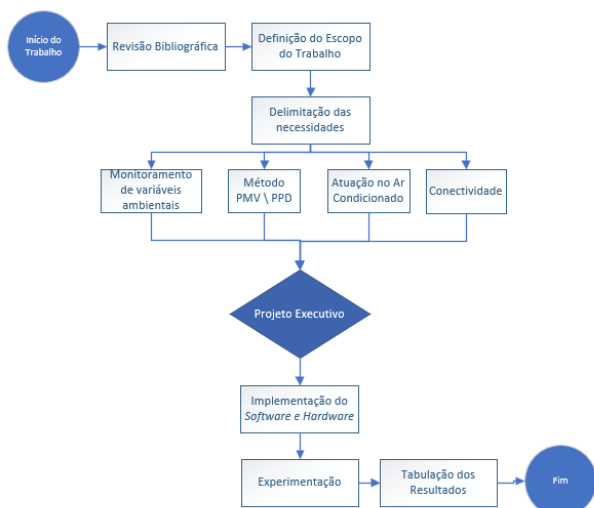


Figura 01 – Fluxograma de Planejamento do Projeto

Para garantir clareza no processo de desenvolvimento e permitir a reprodutibilidade do estudo, o projeto foi estruturado em quatro etapas principais: i) definição dos requisitos e planejamento do sistema, ii) dimensionamento e seleção dos componentes, iii) implementação do *hardware* e

do *software* e iv) experimentação, análise de desempenho e adaptações

B. Planejamento e Projeto Executivo

A primeira etapa correspondeu à delimitação das necessidades funcionais e à identificação dos parâmetros necessários para realização do protótipo. Sendo definido:

- as variáveis ambientais a serem monitoradas (temperatura, umidade e presença);
- o método de avaliação de conforto térmico a ser adotado (PMV/PPD, conforme Fanger, ISO 7730 e ASHRAE 55);
- a forma de atuação sobre o ar-condicionado (transmissão IR compatível com controles convencionais);
- a necessidade de conectividade para monitoramento remoto (via Wi-Fi);
- os critérios de eficiência energética a serem observados nos testes.

Além disso, foi elaborado o fluxo lógico do sistema, que inclui coleta de dados, processamento, cálculo dos índices de conforto, tomada de decisão e envio de comandos ao aparelho. A Figura 2 apresenta este fluxo.

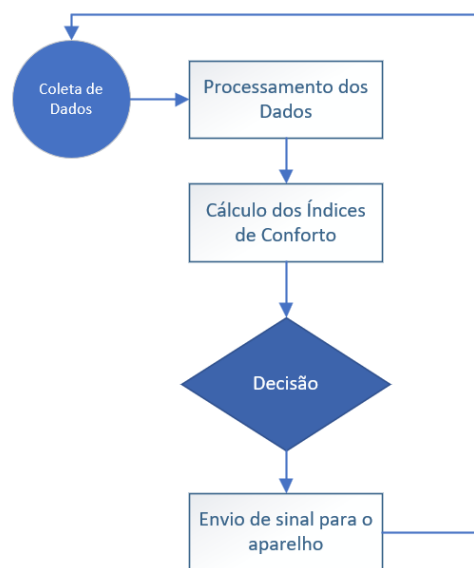


Figura 02 – Fluxo Lógico do Sistema

Com os requisitos definidos, foi realizado o dimensionamento e definição dos componentes do sistema. Nesta etapa, avaliou-se aspectos como precisão, compatibilidade com protocolos IoT, custo, consumo de energia e facilidade de integração. Os seguintes componentes foram definidos para o sistema:

- Sensores: DHT22 para temperatura e umidade e HC-SR501 para presença.
- Microcontrolador: ESP32, por sua conectividade nativa e capacidade de processamento.
- Elementos de atuação: LED IR 940 nm e transistor NPN para amplificação de sinal.
- componentes auxiliares: resistores, display LCD 16×2, *push buttons*, etc.

A Tabela I apresenta os componentes utilizados, detalhando os códigos apresentados no projeto executivo, bem como os *part numbers* que os referenciam.

Tabela I
Lista de Componentes Eletrônicos

Código	Componente	Part Number
D1	Led Emissor de Infravermelho 5mm	LED IR 5mm 940nm
C1	ESP 32 Wroom USB-C	ESP32-WROOM-32
LCD1	Display LCD 16x2 I2C	LCD1602
Q1	Transistor NPN	2N2222
R1	Resistor 100 kΩ	Resistor 1/4W 5% 100kΩ
R2	Resistor 100 kΩ	Resistor 1/4W 5% 100kΩ
R3	Resistor 22 Ω	Resistor 1/4W 5% 22Ω
R4	Resistor 470 Ω	Resistor 1/4W 5% 470Ω
S1	Sensor de Umidade e Temperatura	DHT22
S2	Sensor de Presença (PIR)	HC-SR501
SW1	Push Button	Push Button 12x12mm
SW2	Push Button	Push Button 12x12mm

LCD = Display de Cristal Líquido; W = Watts; Ω = Ohms;

Da mesma forma, a Figura 03 apresenta recorte do Projeto Executivo desenvolvido (detalhado no Apêndice A), mostrando a alocação dos componentes em cada parte do circuito. Os componentes foram exibidos na cor vermelha, ao passo que os pontos de conexão no microcontrolador estão em azul.

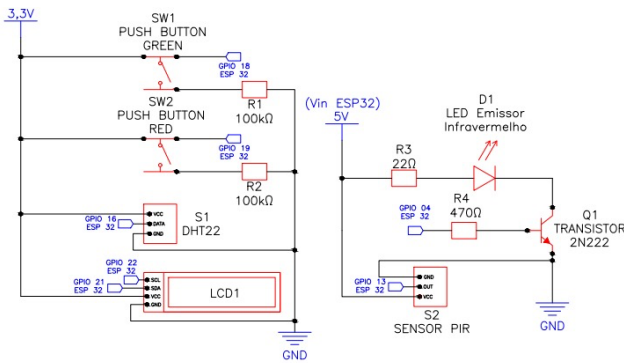


Figura 03 – Recorte do Projeto Executivo

C. Implementação física e lógica

A implementação do sistema integrou a arquitetura física do protótipo com a lógica computacional embarcada no microcontrolador ESP32. Os sensores, atuadores e módulos de comunicação foram organizados de modo a permitir a aquisição contínua das variáveis ambientais, o cálculo dos índices de conforto térmico e a atuação automática sobre o aparelho de ar-condicionado. No nível físico, o sensor DHT22 foi utilizado para medir temperatura e umidade relativa, realizando leituras periódicas por meio de sua biblioteca oficial, enquanto o sensor PIR HC-SR501 detectou ocupação no ambiente, alimentando a lógica de desligamento automático por ausência prolongada.

Para exibição local das medições, empregou-se um display LCD 16×2 conectado via protocolo I2C, reduzindo o número de fios e simplificando a comunicação com o ESP32. Já o

envio de comandos ao ar-condicionado foi realizado por meio de um LED infravermelho operando a 38 kHz. Contudo, como o componente não fornece potência suficiente para acionar o equipamento a uma distância adequada, foi utilizado um transistor NPN em conjunto com um resistor de 22 Ω, ampliando a corrente e garantindo a integridade do sinal de controle. Como já citado, todo o circuito pode ser visualizado na Figura 3.

A lógica foi estruturada para operar em ciclos de monitoramento, processamento e decisão. Inicialmente, o sistema coleta temperatura e umidade e calcula os índices de conforto térmico PMV e PPD seguindo os modelos definidos pela ISO 7730 e por Fanger. O código implementa a formulação original do PMV: calcula a pressão vapor (p_a) através da pressão de saturação (p_s), a partir da Equação 01, converte metabolismo (M) e isolamento térmico das vestimentas (I_{cl}) para as unidades padronizadas, define o fator de área de superfície equivalente (f_{cl}) e estima coeficientes de transferência de calor por convecção (h_c) e por radiação (h_r). Um procedimento iterativo ajusta a temperatura da superfície da roupa (t_{cl}) até que as trocas térmicas se estabilizem, garantindo maior precisão numérica.

A partir disso, são calculados os termos de perda de calor latente e sensível (E_{sk} , E_{sw} , E_{re} , C_{re} , R e C), que compõem o balanço térmico corporal. O PMV é então obtido por meio da Equação 02.

$$p_s = 610,7 \frac{17,27 \times T}{237,3 + T} \quad (1)$$

$$PMV = F_s \times L \quad (2)$$

onde T é a temperatura ambiente, F_s é o fator de sensibilidade e L representa o desvio entre produção e perda de calor. O código também implementa o cálculo normativo do PPD, que estima a porcentagem de usuários insatisfeitos segundo a Equação 03.

$$PPD = 100 - 95(-0,03353 \times PMV^4 - 0,2179 \times PMV^2) \quad (3)$$

Por conta da limitação do número de páginas do presente trabalho, optou-se por não detalhar o equacionamento, apresentando apenas as equações principais. O código completo está disponível no Apêndice B.

Para o desenvolvimento da modelagem matemática, foram escolhidos os valores de referência para um escritório, padronizando a análise matemática das variáveis pessoais (baseado nos valores de referência apresentados nos anexos da norma ISO 7730) [4], definindo os valores de metabolismo como 1,2 (padrão de atividades sedentárias) e isolamento da vestimenta como 0,7 (referência para vestimentas de trabalho).

Com os indicadores calculados, o algoritmo determina automaticamente a temperatura ideal de operação do ar-condicionado. Esse ajuste é realizado por meio da função `calcularTempConf()`, que avalia, para um intervalo entre 18 °C e 30 °C, qual temperatura resulta no PMV mais próximo de zero, representando a condição mais neutra para o ambiente.

A escolha final é arredondada e enviada ao aparelho por meio do protocolo IR Coolix, compatível com equipamentos da marca Midea®. Cada temperatura é associada a um código binário específico, previamente mapeado e organizado no firmware, sendo transmitida pela biblioteca

IRremoteESP8266. A lógica também monitora alterações significativas na temperatura recomendada, enviando comandos apenas quando necessário, a fim de reduzir ciclos de acionamento.

A gestão da presença no ambiente complementa a lógica de conforto térmico. O sistema registra continuamente a detecção do sensor PIR e mantém um controle temporal para identificar ausência prolongada. Caso não haja movimentação por 30 minutos, o algoritmo envia automaticamente o código de desligamento do ar-condicionado, ativando um estado interno que impede chamadas repetidas. Ao detectar novamente presença, o sistema restaura o funcionamento do equipamento, recalcula a temperatura ideal e reestabelece os parâmetros de operação.

Por fim, o ESP32 mantém conexão constante via Wi-Fi com a plataforma Blynk, enviando periodicamente temperatura, umidade, PMV, PPD, estado de presença e temperatura configurada. A biblioteca Blynk organiza os dados em pinos virtuais, permitindo a visualização em *dashboards web e mobile*. Essa camada de conectividade transforma o protótipo em um dispositivo IoT funcional, permitindo monitoramento remoto, auditoria das condições ambientais e validação dos indicadores calculados in loco.

D. Planejamento dos experimentos

O planejamento experimental foi estruturado para avaliar o desempenho do sistema de climatização automatizado em três dimensões principais: confiabilidade das medições, capacidade de controle térmico e impacto no consumo de energia. Para isso, os testes foram organizados em etapas progressivas, iniciando pela verificação individual dos componentes e evoluindo para a análise integrada do protótipo em operação contínua.

A primeira etapa consistiu na validação dos sensores, em que se verificou a estabilidade das leituras de temperatura, umidade e presença. Essa etapa permitiu confirmar o intervalo operacional do DHT22 e do PIR, além de identificar possíveis interferências na leitura decorrentes da posição física ou da ventilação do ambiente. Em seguida, testou-se o alcance e a precisão da transmissão infravermelha, garantindo que os códigos Coolix enviados pelo ESP32 fossem reconhecidos de maneira consistente pelo aparelho de ar-condicionado.

A segunda etapa focou na avaliação da lógica de controle, envolvendo testes em que variáveis ambientais foram manipuladas artificialmente, como aquecimento do ambiente e simulação de diferentes níveis de umidade. A resposta do sistema, cálculo do PMV, seleção da temperatura ideal e envio de comandos ao ar-condicionado, foi registrada para verificar coerência entre as medições e as ações de controle. Nessa fase, avaliou-se também o comportamento do sistema diante de detecção de ocupação e ausência prolongada, validando o mecanismo automático de desligamento após 30 minutos sem presença.

Por fim, realizou-se ensaio comparativo de operação real, conduzido em dois dias consecutivos com condições climáticas semelhantes. No primeiro, o aparelho funcionou de modo convencional, sem intervenção do protótipo. No segundo, o sistema automatizado foi ativado, permitindo registrar diferenças de consumo energético, temperatura interna e indicadores PMV/PPD. Um medidor de energia (DDS1108) foi instalado na alimentação do ar-condicionado para acompanhar o consumo horário, possibilitando a comparação direta entre os dois cenários.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No primeiro dia de experimento, no qual o aparelho foi operado manualmente (por intermédio humano), observou-se padrão típico de uso baseado em percepções momentâneas de desconforto térmico. Logo no início da manhã, entre 08:00 e 09:00, o ar-condicionado foi ajustado para 17 °C, indicando que o ambiente se encontrava excessivamente quente no momento da chegada dos ocupantes e o ajuste extremo representou uma tentativa de resfriamento rápido. Conforme o ambiente começou a estabilizar, entre 09:00 e 11:00, a temperatura foi elevada para 25 °C, pois o resfriamento intenso tornou-se desconfortável à medida que a sala esfriava. No entanto, a elevação da temperatura externa ao final da manhã levou novamente ao desconforto térmico, resultando em um novo ajuste brusco para 17 °C no intervalo 11:00–13:00, repetindo o ciclo de oscilação.

Durante o período vespertino, o padrão manual continuou variando de forma não linear. Entre 13:00 e 16:00, o aparelho foi ajustado para 21 °C, buscando equilíbrio após um resfriamento excessivo. Posteriormente, entre 16:00 e 18:00, a temperatura foi novamente elevada para 23 °C, conforme o ambiente se resfriava naturalmente ao final do expediente. Esse comportamento, composto por ajustes sucessivos para cima e para baixo, é consistente com o que literatura descreve como uso reativo, caracterizado pela ausência de monitoramento contínuo e pela dependência exclusiva da percepção subjetiva momentânea do ocupante.

Esse padrão de uso foi acompanhado de variações no consumo energético e no PMV. Nos períodos com temperatura ajustada para 17 °C, o consumo foi maior (0,9 kWh e 2,4 kWh) e o PMV indicou forte sensação de frio (-1,77), enquanto os intervalos com temperatura ajustada para 25 °C ou 23 °C apresentaram menor consumo e valores de PMV mais próximos da neutralidade. Esses dados evidenciam que a operação manual tende a gerar episódios de resfriamento excessivo seguidos de correções tardias, reduzindo a eficiência energética e aumentando a insatisfação térmica. A Tabela II apresenta os valores coletados no primeiro cenário, incluindo temperatura média do ambiente, tempo total de operação do aparelho e consumo energético medido pelo wattímetro. Esses dados servem como referência para avaliar a eficiência energética e o nível de estabilidade térmica obtidos sem o uso do protótipo.

Tabela II
Coleta sem protótipo

Horário	Temperatura Ar (°C)	PMV (Predicted Mean Vote)	Consumo (kWh)
08:00-09:00	17	-1,77	0,9
09:00-11:00	25	0,27	0,2
11:00-13:00	17	-1,77	2,4
13:00-16:00	21	-0,73	0,5
16:00-18:00	23	-0,23	0,8
Média Ponderada	21	-0,74	0,92

KWh = Kilo Watt Hora; C = Grau Celsius;

No segundo dia de testes o sistema automatizado foi ativado. A lógica de controle passou a ajustar automaticamente a temperatura de operação do ar-condicionado, tendo como base no valor do PMV mais próximo de zero. Além disso, o mecanismo de desligamento

por ausência, baseado na leitura do sensor PIR, contribuiu para evitar funcionamento desnecessário do equipamento durante períodos prolongados sem ocupação. A Tabela III sintetiza os resultados do segundo cenário, incluindo a temperatura configurada automaticamente, PMV médio, e consumo energético final. Observa-se que, neste cenário a temperatura desejada foi definida como *setpoint* no sistema proposto.

Tabela III
Coleta utilizando o protótipo

Horário	Temperatura do Ar Configurada (°C)	PMV Médio Calculado	Consumo (kWh)
08:00-09:00	25	0,27	0,2
09:00-10:00	25	0,27	0,1
10:00-11:00	25	0,27	0,1
11:00-12:00	25	0,27	0,1
12:00-13:00	25	0,27	0,1
13:00-14:00	25	0,27	0,1
14:00-15:00	25	0,27	0,3
15:00-16:00	25	0,27	0,1
16:00-17:00	25	0,27	0,1
17:00-18:00	25	0,27	0,1
Total			1,3

KWh = Kilo Watt Hora; C = Grau Celsius;

Ao comparar os dois experimentos, observa-se que o uso do protótipo provocou em maior estabilidade térmica, com variações menores de temperatura e níveis maiores de conforto segundo os índices PMV/PPD. Essa estabilidade se deve ao ajuste automático da temperatura conforme a umidade e as condições térmicas do ambiente, diferentemente do ajuste manual que depende exclusivamente da percepção individual, que tende a oscilar em função do desconforto momentâneo. Observou-se, também, redução no consumo energético (economia de aproximadamente 73%) ao utilizar o sistema automatizado, tanto pela remoção das oscilações manuais, evitando picos de gasto energético, quanto pelo desligamento em períodos de ausência. Os dados comparativos são apresentados na Tabela IV.

Tabela IV
Comparativo dos dados

Medição	Cenário sem o protótipo	Cenário com o protótipo
Consumo total de energia (kWh)	4,8	1,3
PMV Médio	-0,74	0,27
Temperatura Média Externa (°C)	34	33

KWh = Kilo Watt Hora; C = Grau Celsius;

A solução desenvolvida para proporcionar leitura dos dados enviados via *wi-fi*, foi a criação de *dashboards* na plataforma do Blynk IoT, tanto para *web*, quanto para *mobile*. Desta forma todos os valores de interesse são apresentados de maneira visual. Na interface *web* são exibidos, em tempo real, temperatura, umidade, *setpoint* configurado no aparelho, PMV, PPD e leitura do sensor de presença. Também são apresentados gráficos para observação do histórico de temperatura, bem como mapas de calor para os indicadores, a fim de destacar momentos de pico de qualquer um dos valores, conforme apresentado na Figura 04.

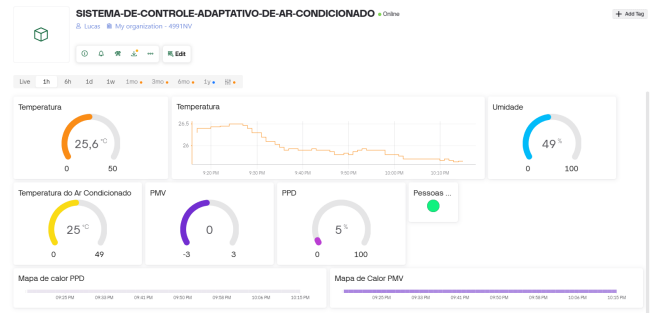


Figura 04 – Dashboard de Monitoramento Web

De maneira análoga, foi criada, dentro da mesma plataforma, interface de monitoramento *mobile* conforme exibido na Figura 05. A interface foi elaborada para ampliar o acesso aos dados, facilitando a leitura das variáveis remotamente. Apresentando informações similares à versão *web*, somente suprimindo a exibição do gráfico e mapas de calor, devido ao tamanho reduzido da tela em que são exibidos.

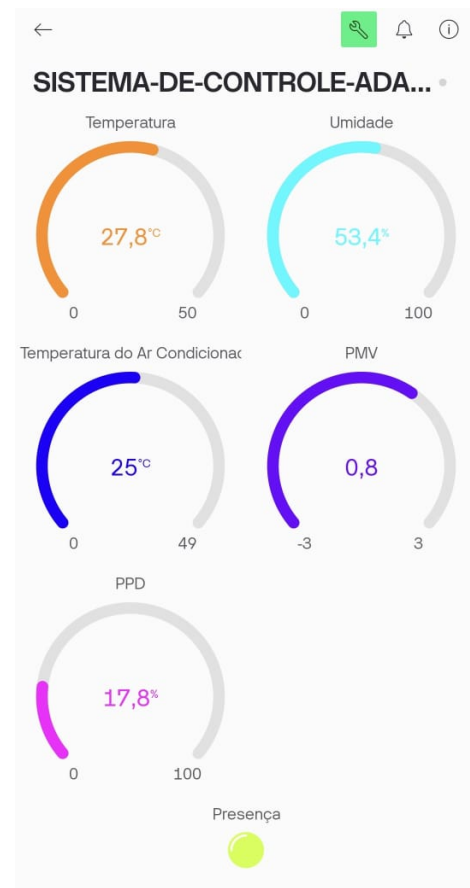


Figura 05 – Dashboard de Monitoramento Mobile

A plataforma também possibilita o armazenamento das variáveis por período de até 1 ano. Permitindo avaliações posteriores e alterações na programação, que podem gerar adaptações personalizadas para as características de cada ambiente.

V.CONCLUSÃO

O sistema de climatização automatizado desenvolvido neste estudo permite observar que soluções baseadas em IoT

podem ajudar a melhorar o conforto térmico e otimizar o consumo de energia elétrica. A combinação de sensores ambientais, cálculo de índices normativos (PMV e PPD) e atuação por infravermelho possibilitou que o protótipo funcionasse de forma autônoma, ajustando a temperatura de acordo com as condições reais do ambiente e desligando o aparelho durante longos períodos de ausência. Os experimentos comparativos apresentaram diferenças notórias entre o uso manual e o sistema proposto, destacando maior estabilidade térmica e redução no consumo energético durante a operação com a utilização do protótipo.

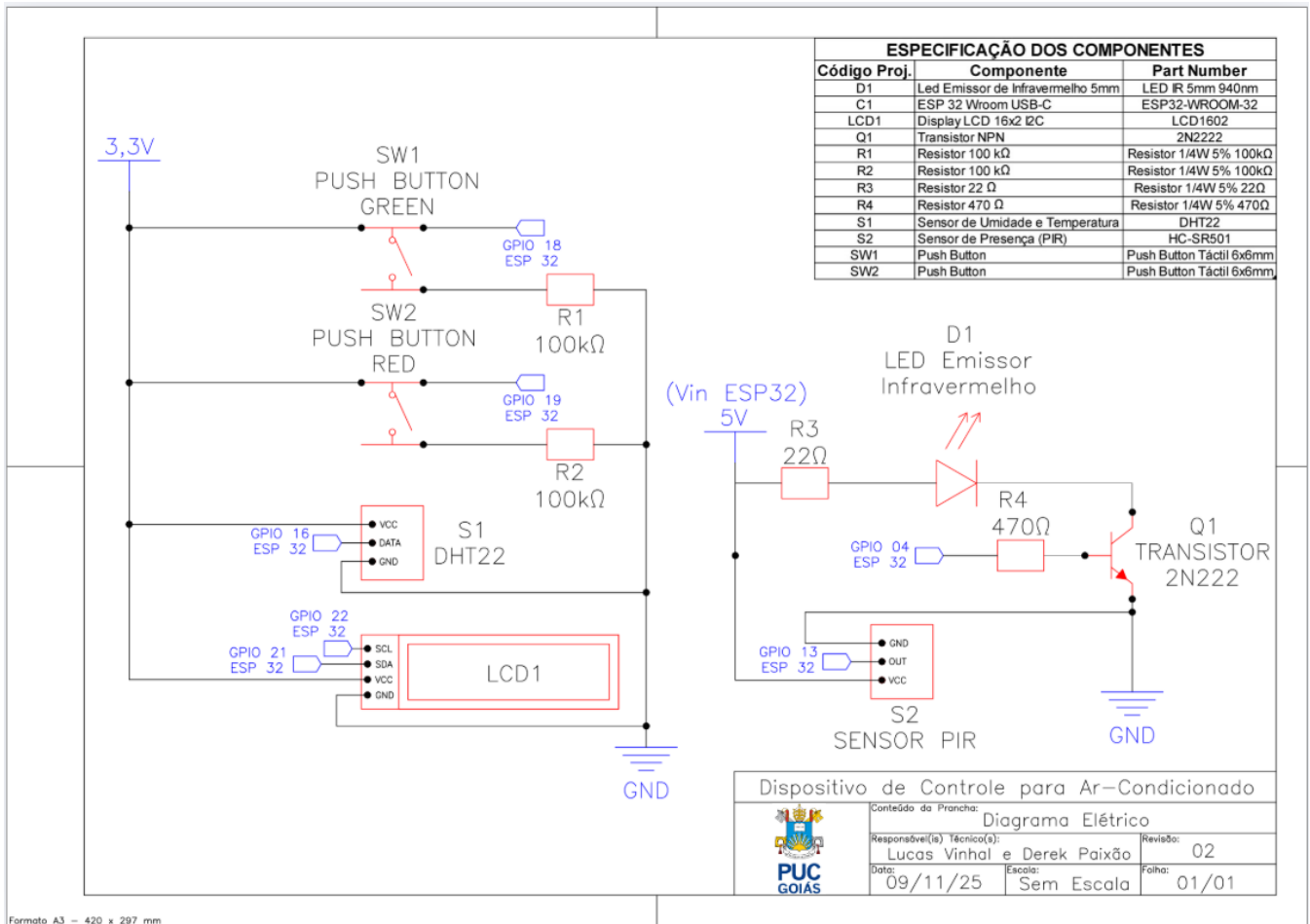
Destaca-se que a avaliação do sistema proposto enfrentou restrições relacionadas ao tipo de sensor empregado, à comunicação por infravermelho, além de breve período de avaliação. Ainda assim, o protótipo atende ao propósito de apresentar a viabilidade técnica de uma solução acessível e utilizável em ambientes de pequeno porte, destacando a relevância da automação no controle térmico. Pesquisas futuras podem investigar sensores de maior precisão, protocolos de comunicação distintos e modelos preditivos que consigam prever padrões de uso, ampliando o alcance e a eficácia da proposta.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] MEDINA, Bruno Eduardo. Internet das coisas em edifícios inteligentes: Desenvolvimento de uma rede de sensores e atuadores sem fio para o controle de sistemas de climatização. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.
- [2] IBM. What is the Internet of Things (IoT)? Disponível em: <https://www.ibm.com/topics/internet-of-things>. Acesso em: 6 nov. 2025.
- [3] FANGER, P. O. Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970.
- [4] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 7730: Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Geneva, 2005.
- [5] ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 55-2017: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2017.
- [6] ABNT. NBR 16401-2: Instalações de Ar-Condicionado — Sistemas Centrais e Unitários — Parte 2: Parâmetros de Conforto Térmico. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.
- [7] DE DEAR, R.; BRAGER, G. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. ASHRAE Transactions, v. 104, n. 1a, p. 145–167, 1998.
- [8] NICOL, J. F. Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics. Energy and Buildings, v. 36, n. 7, p. 628–637, 2004.
- [9] DA COSTA, Gleidson Martins; DE LIMA, Munique Silva. Conforto térmico em edificações educacionais: uma revisão sistemática de literatura a partir das publicações do ENCAC/ENLACAC. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2025. Anais [...]. 2025.
- [10] MARÇAL, Viviane Gomes et al. Relevância e percepção do conforto térmico no processo de aprendizagem em sala de aula. Boletim Técnico do Senac, v. 44, n. 2, 2018.
- [11] BENEVIDES, Mariana Navarro; MACHADO, Laura Figueiredo; CARLO, Joyce Correna. Zoneamento climático e conforto térmico para edificações habitacionais em Moçambique. Paranoá, v. 18, p. e54193, 2025.
- [12] FERREIRA, Camila Carvalho; LOURA, Rejane Magiag; DE ASSIS, Eleonora Sad. Alterações no conforto térmico de edificações residenciais ao longo de uma década em Belo Horizonte (MG). In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024. Anais [...]. p. 1-13, 2024.
- [13] SOARES, Raquel Gomes; DE OLIVEIRA, Patrícia Lima; SANTOS, Sílvio Xavier. Desempenho térmico das edificações: estudo comparativo entre o telhado verde e outros tipos de coberturas. Revista Petra, v. 2, n. 1, 2016.
- [14] CHEPP, Ellen David; GASPARIN, Fabiano Perin. Análise de medidas de eficiência térmica no consumo energético e conforto térmico de uma edificação. Revista Eletrônica Científica da UERGS, v. 5, n. 3, p. 236-249, 2019.
- [15] RUPP, Ricardo Forgiarini et al. Conforto térmico humano em escritórios com sistema central de condicionamento artificial em clima subtropical úmido: estudos de campo vs. abordagem analítica. Ambiente Construído, v. 17, p. 111-123, 2017.
- [16] MELO, Thiago da Costa. Eficiência energética e conforto térmico em edificações em Recife utilizando o Energyplus. 2018. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.
- [17] AULICIEMS, A.; DE DEAR, R. Air conditioning in a tropical climate: Impacts upon European residents in Darwin, Australia. International Journal of Biometeorology, v. 31, n. 1, p. 14–22, 1987.
- [18] HUMPHREYS, M. A.; NICOL, J. F. Outdoor temperature and indoor thermal comfort: raising the precision of the relationship for the 1998 ASHRAE database of field studies. ASHRAE Transactions, v. 110, p. 1–13, 2004.
- [19] WONG, N. H.; KHOO, S. S. Thermal comfort in naturally ventilated residential buildings in Singapore. Building and Environment, v. 38, p. 149–158, 2003.
- [20] BRAGER, G. S.; DE DEAR, R. A. Thermal adaptation in the built environment: a literature review. Energy and Buildings, v. 33, n. 2, p. 83–96, 2001.
- [21] RUPP, R. F.; VÁSQUEZ, N. G.; GHISI, E. Predicting thermal comfort in naturally ventilated buildings: a global approach. Energy and Buildings, v. 88, p. 99–112, 2015.
- [22] OLINGER, Marcelo Salles et al. Predição de conforto térmico em escritórios ventilados naturalmente por meio de redes neurais artificiais. 2019. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.
- [23] PACHECO, Verônica Madeira. Desenvolvimento de classificador de conforto térmico para bovinos de leite utilizando modelagem computacional e termografia de infravermelho. 2019. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.
- [24] BRAGA, Jhonata Lima et al. Desenvolvimento de Ferramenta Automatizada para Avaliação do Desempenho Térmico conforme a NBR 15575: 2021. In:

- ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2025. Anais [...]. 2025.
- [25]NEVES, Thierry Freire Pereira. Uso do software REVIT como ferramenta para análise do conforto térmico aplicado a edificação multifamiliar. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.
- [26]LEITZKE, Rodrigo Karini et al. Revisão sistemática de literatura sobre avaliações evolutivas multiobjetivo para aplicação de PCM em simulações computacionais termoenergéticas. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2021. Anais [...]. p. 2088-2093, 2021.
- [27]DOS SANTOS BORGES, Camila Oliveira et al. Otimização de sistemas HVAC para conforto térmico em ambientes acadêmicos usando fluidodinâmica computacional. Revista Principia, v. 62, 2025.
- [28]RODRIGUES, Nelson José Oliveira. Modelação computacional e avaliação experimental do conforto térmico ocupacional em salas de operação. 2017. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Porto, Porto, 2017.
- [29]RODRIGUES, Neila Karina et al. Utilização da Ferramenta Computacional Matlab para modelagem de Sistema de controle de ar condicionado. 2017.
- [30]VALIANTE, Leandro Ferrarezi; DA SILVA, Ricardo Bussons. Automação e otimização energética de sistemas de ar-condicionado via controle centralizado com dispositivos IoT. ARACÊ, v. 7, n. 10, p. e8921, 2025.
- [31]DE MORAIS PRATES, Aline; VARGAS, Leandro Campos. Um Desenvolvimento de infraestrutura e equipamento de IoT para controle e supervisão de climatização. In: CONGRESSO DE INOVAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO IFSP, 2024. Anais [...]. 2024.
- [32]SOARES, Wedes de Oliveira; FARIA, Nádia Camila dos Santos. Gerenciamento remoto da climatização de data center via IoT. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2021.
- [33]DOMINGUES, Thiago. Automação residencial com IoT e inteligência artificial. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2024.
- [34]ROCHA, Felipe Barbalho. Sistema para controle inteligente de recursos em ambiente de IoT. 2019. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.
- [35]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 - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2021.
- [36]NICOLAU, Murilo et al. Sistema IoT Para Climatização Eficiente De Ambientes Em Edificações Inteligentes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 2020. Anais [...]. 2020.
- [37]ALMEIDA, Rafael Dias Ribeiro de. Sistema IoT para prevenção de falhas e monitoramento remoto em ambientes termicamente controlados. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2025.

APÊNDICE A – DIAGRAMA EXECUTIVO



APÊNDICE B – CÓDIGO UTILIZADO

```
// Configurações do Blynk
#define BLYNK_TEMPLATE_ID "TMPL21RkzJMaP"
#define BLYNK_TEMPLATE_NAME "TCC Vinhal e Derek"
#define BLYNK_AUTH_TOKEN
"qpIMuyJwo49WDOrkPGWIX7zzhfmTxyiR"

// Bibliotecas
#include <WiFi.h>
#include <BlynkSimpleEsp32.h>
#include <DHT.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <math.h>
#include <IRremoteESP8266.h>
#include <IRsend.h>

// Pinos virtuais Blynk
#define VPIN_TEMPERATURE V0
#define VPIN_HUMIDITY V1
#define VPIN_AIRTEMP V2
#define VPIN_PMV V3
#define VPIN_PPD V4
#define VPIN_PRESENCE V5

// Parâmetros ISO 7730
const float CLOTHING_INSULATION = 0.7; // Isolamento (clo)
const float METABOLIC_RATE = 1.2; // Taxa metabólica (met)
const float AIR_VELOCITY = 0.1; // Velocidade do ar (m/s)

// Estrutura para índices PMV e PPD
struct PMVResult {
    float pmv;
    float ppd;
};

// Credenciais Wi-Fi
char ssid[] = "CLAROALLAN";
char pass[] = "Dedelu147.";

BlynkTimer timer;

// Sensor DHT22
#define DHTPIN 16
#define DHTTYPE DHT22
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

// Display LCD I2C
#define LCD_ADDR 0x27
#define LCD_COLS 16
#define LCD_ROWS 2
#define SDA_PIN 21
#define SCL_PIN 22
LiquidCrystal_I2C lcd(LCD_ADDR, LCD_COLS, LCD_ROWS);

// Botões e sensores
```

```
#define BUTTON_ON 18
#define BUTTON_OFF 19
#define PIR_PIN 13

// Emissor infravermelho
#define IR_PIN 4
#define LED_EM_PIN 2

// Códigos IR do ar-condicionado (Protocolo COOLIX)
const uint32_t AC_POWER_ON_CODE = 0xB2BF70;
const uint32_t AC_CODE_17 = 0xB2BF00;
const uint32_t AC_CODE_18 = 0xB2BF10;
const uint32_t AC_CODE_19 = 0xB2BF30;
const uint32_t AC_CODE_20 = 0xB2BF20;
const uint32_t AC_CODE_21 = 0xB2BF60;
const uint32_t AC_CODE_22 = 0xB2BF70;
const uint32_t AC_CODE_23 = 0xB2BF50;
const uint32_t AC_CODE_24 = 0xB2BF40;
const uint32_t AC_CODE_25 = 0xB2BFC0;
const uint32_t AC_CODE_26 = 0xB2BFD0;
const uint32_t AC_CODE_27 = 0xB2BF90;
const uint32_t AC_CODE_28 = 0xB2BF80;
const uint32_t AC_CODE_29 = 0xB2BFA0;
const uint32_t AC_CODE_30 = 0xB2BFB0;
const uint32_t AC_POWER_OFF_CODE = 0xB27BE0;

IRsend irsend(IR_PIN);

// Variáveis globais
int ligado = 0;
float umidade = 0;
float temperatura = 0;
int tempArAtual = 0;
int presenca = 0;

unsigned long ultimaPresenca = 0;
bool acDesligadoPorAusencia = false;

// Calcula pressão de saturação (Magnus-Tetens)
float calculateSaturationPressure(float tempC) {
    return 610.7 * exp((17.27 * tempC) / (237.3 + tempC));
}

// Calcula PMV e PPD conforme ISO 7730
PMVResult calcularIndicadores(float airTemp, float relativeHumidity){
    float tr = airTemp;
    float pa = (relativeHumidity / 100.0) * calculateSaturationPressure(airTemp);
    float M = METABOLIC_RATE * 58.15;
    float W = 0.0;
    float I_cl = CLOTHING_INSULATION * 0.155;
    float f_cl = (I_cl < 0.078) ? 1.0 + 1.29 * I_cl : 1.05 + 0.645 * I_cl;
    float M_n = M - W;
    float h_c;

    // Coeficiente de convecção
    if (AIR_VELOCITY < 0.1) {
        h_c = 2.38 * pow(fabs(airTemp - 34.0), 0.25);
```

```

    } else {
        h_c = 12.1 * sqrt(AIR_VELOCITY);
    }

    float t_cl = airTemp + (35.5 - airTemp) / (3.5 * (6.45 *
I_cl + 0.1));
    float h_r = 4.0 * 5.67e-8 * 0.95 * pow((t_cl + tr) / 2.0 +
273.0, 3);

    // Iteração para temp. da roupa
    for (int i = 0; i < 50; i++) {
        float t_cl_new = (35.7 - 0.028 * M_n - I_cl * f_cl *
(h_r * (t_cl - tr) + h_c * (t_cl - airTemp)));
        if (fabs(t_cl_new - t_cl) < 0.01) {
            t_cl = t_cl_new;
            break;
        }
        t_cl = t_cl_new;
    }

    // Perdas de calor
    float E_sk = 3.05 * 0.001 * (5733.0 - 6.99 * M_n - pa);
    float E_sw = (M_n > 58.15) ? 0.42 * (M_n - 58.15) :
0.0;
    float E_re = 1.7 * 0.00001 * M * (5867.0 - pa);
    float C_re = 0.0014 * M * (34.0 - airTemp);
    float R = f_cl * h_r * (t_cl - tr);
    float C = f_cl * h_c * (t_cl - airTemp);
    float L = M_n - E_sk - E_sw - E_re - C_re - R - C;
    float F_s = 0.303 * exp(-0.036 * M) + 0.028;
    float pmv = F_s * L;

    pmv = fmax(fmin(pmv, 3.0), -3.0);
    float ppd = 100.0 - 95.0 * exp(-0.03353 * pow(pmv, 4) -
0.2179 * pow(pmv, 2));

    return {pmv, ppd};
}

// Calcula temperatura ideal (PMV ≈ 0)
float calcularTempConf(float relativeHumidity){
    float bestTemp = 22.0;
    float bestPmv = 10.0;

    for (float temp = 18.0; temp <= 30.0; temp += 0.1) {
        PMVResult result = calcularIndicadores(temp,
relativeHumidity);
        if (fabs(result.pmv) < fabs(bestPmv)) {
            bestPmv = result.pmv;
            bestTemp = round(temp);
        }
        if (fabs(result.pmv) < 0.05) break;
    }

    return bestTemp;
}

// Envia comando IR de temperatura
void EnviarTempConf(int ConfTemp){
    switch (ConfTemp){
        case 17: irsend.sendCOOLIX(AC_CODE_17, 24);
        break;
        case 18: irsend.sendCOOLIX(AC_CODE_18, 24);
        break;

```

```

        case 19: irsend.sendCOOLIX(AC_CODE_19, 24);
        break;
        case 20: irsend.sendCOOLIX(AC_CODE_20, 24);
        break;
        case 21: irsend.sendCOOLIX(AC_CODE_21, 24);
        break;
        case 22: irsend.sendCOOLIX(AC_CODE_22, 24);
        break;
        case 23: irsend.sendCOOLIX(AC_CODE_23, 24);
        break;
        case 24: irsend.sendCOOLIX(AC_CODE_24, 24);
        break;
        case 25: irsend.sendCOOLIX(AC_CODE_25, 24);
        break;
        case 26: irsend.sendCOOLIX(AC_CODE_26, 24);
        break;
        case 27: irsend.sendCOOLIX(AC_CODE_27, 24);
        break;
        case 28: irsend.sendCOOLIX(AC_CODE_28, 24);
        break;
        case 29: irsend.sendCOOLIX(AC_CODE_29, 24);
        break;
        case 30: irsend.sendCOOLIX(AC_CODE_30, 24);
        break;
    }
}

```

// Lê sensores e envia dados

```

void sendSensorData() {
    umidade = dht.readHumidity();
    temperatura = dht.readTemperature();

    if (isnan(umidade) || isnan(temperatura)) {
        Serial.println("Erro ao ler dados do sensor DHT!");
        lcd.clear();
        delay(10);
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("Erro no Sensor");
        return;
    }
}

```

// Exibe no LCD

```

lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print(" Temp: ");
lcd.print(temperatura, 1);
lcd.print("C");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print(" Umid: ");
lcd.print(umidade, 1);
lcd.print("%");

```

// Envia para Blynk

```

Blynk.virtualWrite(VPIN_TEMPERATURE,
temperatura);
Blynk.virtualWrite(VPIN_HUMIDITY, umidade);
Serial.printf("Temperatura: %.1f °C | Umidade: %.1f
%%\n", temperatura, umidade);

```

```
digitalWrite(LED_EM_PIN, LOW);
```

// Calcula índices

```
PMVResult current = calcularIndicadores(temperatura,
umidade);
```

```

Serial.print("PMV: ");
Serial.println(current.pmv);
Serial.print("PPD: ");
Serial.println(current.ppd);

Blynk.virtualWrite(VPIN_PMV, current.pmv);
Blynk.virtualWrite(VPIN_PPD, current.ppd);

// Ajusta temperatura do AC
int tempArNova = calcularTempConf(umidade);
if (tempArAtual != tempArNova) {
  EnviarTempConf(tempArNova);
  tempArAtual = tempArNova;
}
}

// Inicialização
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Blynk.begin(BLYNK_AUTH_TOKEN, ssid, pass);
  dht.begin();
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  pinMode(BUTTON_ON, INPUT_PULLUP);
  pinMode(BUTTON_OFF, INPUT_PULLUP);
  pinMode(PIR_PIN, INPUT);
  irsend.begin();

  timer.setInterval(20000L, sendSensorData);
}

// Loop principal
void loop() {
  Blynk.run();

  // Botão ligar
  if (digitalRead(BUTTON_ON) == HIGH) {
    Serial.println("Botão ON pressionado");
    ligado = 1;
    acDesligadoPorAusencia = false;
    irsend.sendCOOLIX(AC_POWER_ON_CODE, 24);
    delay(1000);

    umidade = dht.readHumidity();
    temperatura = dht.readTemperature();
    int tempConf = calcularTempConf(umidade);
    EnviarTempConf(tempConf);
    tempArAtual = tempConf;
    Blynk.virtualWrite(VPIN_AIRTEMP, tempArAtual);
    delay(500);
  }

  // Botão desligar
  else if (digitalRead(BUTTON_OFF) == HIGH) {
    Serial.println("Botão OFF pressionado");
    ligado = 0;
    acDesligadoPorAusencia = false;
    irsend.sendCOOLIX(AC_POWER_OFF_CODE, 24);
    delay(500);
  }

  if (ligado == 1) {
    timer.run();

    int val = digitalRead(PIR_PIN);

    // Presença detectada
    if (val == HIGH) {
      Serial.println("Presença detectada");
      presenca = 1;
      ultimaPresenca = millis();

      // Religa se desligado por ausência
      if (acDesligadoPorAusencia) {
        Serial.println("Religando AC após ausência");
        irsend.sendCOOLIX(AC_POWER_ON_CODE, 24);
        delay(1500);
        umidade = dht.readHumidity();
        int tempConf = calcularTempConf(umidade);
        EnviarTempConf(tempConf);
        tempArAtual = tempConf;
        Blynk.virtualWrite(VPIN_AIRTEMP,
tempArAtual);
        acDesligadoPorAusencia = false;
      }

      Blynk.virtualWrite(VPIN_PRESENCE, presenca);
    }

    // Ausência prolongada (30 min)
    else {
      if (presenca == 1 && (millis() - ultimaPresenca >=
1800000)) {
        Serial.println("Ausência prolongada - desligando
AC");
        presenca = 0;
        Blynk.virtualWrite(VPIN_PRESENCE, presenca);
        irsend.sendCOOLIX(AC_POWER_OFF_CODE,
24);
        acDesligadoPorAusencia = true;
      }
    }

    delay(500);
  }
}

```

RESOLUÇÃO nº 038/2020 – CEPE

ANEXO I

APÊNDICE ao TCC

Termo de autorização de publicação de produção acadêmica

O estudante Derek Paixão Silva Leite do Curso de Engenharia de Controle e Automação matrícula 20221011800-210, telefone: (62) 98202-8356 e-mail: derekleite@hotmail.com, na qualidade de titular dos direitos autorais, em consonância com a Lei nº 9.610/98 (Lei dos Direitos do Autor), autoriza a Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC Goiás) a disponibilizar o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado SISTEMA DE CONTROLE ADAPTATIVO DE AR-CONDICIONADO BASEADO EM CONDIÇÕES AMBIENTAIS gratuitamente, sem ressarcimento dos direitos autorais, por 5 (cinco) anos, conforme permissões do documento, em meio eletrônico, na rede mundial de computadores, no formato especificado (Texto(PDF); Imagem (GIF ou JPEG); Som (WAVE, MPEG, AIFF, SND); Vídeo (MPEG, MWV, AVI, QT); outros, específicos da área; para fins de leitura e/ou impressão pela internet, a título de divulgação da produção científica gerada nos cursos de graduação da PUC Goiás.

Goiânia, 13 de Dezembro de 2025.

Assinatura do autor: _____

Nome completo do autor: Derek Paixão Silva Leite

Assinatura do professor-orientador: _____

Nome completo do professor-orientador:

RESOLUÇÃO nº 038/2020 – CEPE

ANEXO I

APÊNDICE ao TCC

Termo de autorização de publicação de produção acadêmica

O estudante Lucas Vinhal Andrade do Curso de Engenharia Elétrica matrícula 2021.1.0038.0007-2, telefone: (62) 99176-0421 e-mail lucas.vinhalandrade@gmail.com, na qualidade de titular dos direitos autorais, em consonância com a Lei nº 9.610/98 (Lei dos Direitos do Autor), autoriza a Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC Goiás) a disponibilizar o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado SISTEMA DE CONTROLE ADAPTATIVO DE AR-CONDICIONADO BASEADOR EM CONDIÇÕES AMBIENTAIS, gratuitamente, sem ressarcimento dos direitos autorais, por 5 (cinco) anos, conforme permissões do documento, em meio eletrônico, na rede mundial de computadores, no formato especificado (Texto(PDF); Imagem (GIF ou JPEG); Som (WAVE, MPEG, AIFF, SND); Vídeo (MPEG, MWV, AVI, QT); outros, específicos da área; para fins de leitura e/ou impressão pela internet, a título de divulgação da produção científica gerada nos cursos de graduação da PUC Goiás.

Goiânia, 13 de dezembro de 2025.

Assinatura do autor: _____

Nome completo do autor: Lucas Vinhal Andrade

Assinatura do professor-orientador: _____

Nome completo do professor-orientador: Fábio Manoel Sá Simões