

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
ESCOLA POLITÉCNICA / ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO
Trabalho Final de Curso

MAÍLA AGUIAR SOUZA

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM SISTEMA IOT DE CONTROLE
ADAPTATIVO PARA AR-CONDICIONADO BASEADO EM CONFORTO TÉRMICO**

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

BANCA EXAMINADORA:

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

Goiânia, 16 de junho de 2026.

Avaliação da Eficiência Energética de um Sistema IoT de Controle Adaptativo para Ar-Condicionado Baseado em Conforto Térmico

Maíla Aguiar Souza, Antônio Marcos Melo Medeiro, Carlos A. Vasconcelos Bezerra, Fabio Manoel Sá Simões

Abstract—This work presents the evolution and experimental validation of an IoT-based adaptive air-conditioning control system grounded in Fanger's thermal comfort model (ISO 7730). The prototype integrates BME280 sensors (air temperature and relative humidity) and an AMG8833 sensor (infrared thermal) to estimate the mean radiant temperature, in accordance with ISO 7726, aiming to overcome methodological limitations observed in previous studies, such as the lack of physical thermal radiation measurements and the limited accuracy of thermo-hygrometric sensors. A total of 20 field experiments were conducted (10 without the prototype, manual operation with variable setpoints, and 10 using the adaptive control system) in a standard office room. The achieved energy efficiency was $\Delta E = 54.33\%$ ($E_A = 46.29 \text{ kWh}$; $E_B = 21.14 \text{ kWh}$), with a statistically significant difference ($p < 0.002$). The results validate the hypothesis that predictive control based on a thermo-physiological model can simultaneously provide energy savings and thermal comfort, while remaining consistent in order of magnitude with comparable studies reported in the Brazilian literature.

Index Terms—Thermal comfort, ISO 7730, PMV, PPD, energy efficiency, ESP32, adaptive control, Internet of Things (IoT), air conditioning.

Resumo—Este trabalho apresenta a evolução e validação experimental de um sistema IoT para controle adaptativo de ar-condicionado, fundamentado no modelo de conforto térmico de Fanger (ISO 7730). O protótipo integra sensores BME280 (temperatura do ar e umidade relativa), AMG8833 (matriz infravermelha) para estimar a temperatura radiante média, conforme a ISO 7726, buscando superar limitações metodológicas observadas em trabalhos anteriores, como a ausência de medição física da radiação térmica e a baixa precisão de sensores higrômetros. Foram conduzidos 20 ensaios em campo (10 sem o protótipo, operação manual a setpoint variável e 10 com o protótipo adaptativo) em uma sala de escritório padrão. A eficiência energética obtida foi $\Delta E = 54,33\%$ ($E_A = 46,29 \text{ kWh}$; $E_B = 21,14 \text{ kWh}$), com diferença estatisticamente significativa ($p < 0,002$). Os resultados validam a hipótese de que controle preditivo baseado em modelo termofisiológico oferece simultaneamente economia energética e conforto, sendo coerentes em ordem de grandeza com a literatura nacional comparável.

Palavras-chave—conforto térmico, ISO 7730, PMV, PPD, eficiência energética, ESP32, controle adaptativo, IoT, ar-condicionado.

I. INTRODUÇÃO

O condicionamento de ar representa uma parcela significativa do consumo de energia elétrica em edificações comerciais brasileiras, podendo atingir até 70% da demanda total em determinados tipos de edifícios [1]. Em regiões de clima tropical, como Goiânia, as elevadas temperaturas ao

longo do ano intensificam a utilização desses sistemas e ampliam seu impacto energético [2], [3]. Além disso, a prática comum de operar equipamentos com *setpoints* fixos e frequentemente inferiores às necessidades reais de conforto térmico pode resultar em desperdício de energia e desconforto para os ocupantes.

A norma ISO 7730 estabelece um método analítico para avaliação do conforto térmico humano por meio dos índices Voto Médio Estimado, do inglês *Predicted Mean Vote* (PMV) e Percentual de Pessoas Insatisfeitas, do inglês *Predicted Percentage of Dissatisfied* (PPD), amplamente utilizados em aplicações de climatização inteligente [4]. No contexto brasileiro, Leite e Vinhal reportaram economia energética próxima de 73% em ambiente climatizado, mantendo condições aceitáveis de conforto térmico segundo a ISO 7730 [5].

Apesar dos resultados promissores reportados na literatura, a implementação prática de sistemas de controle térmico que se baseia nos índices PMV ainda apresenta desafios relacionados à qualidade das medições ambientais utilizadas pelo modelo. Em particular, a medição da temperatura radiante média (T_{rm}), variável fundamental para a determinação do balanço térmico humano, é frequentemente aproximada pela temperatura do ar em sistemas embarcados de baixo custo, o que pode reduzir a precisão da estimativa de conforto [4], [6]. Adicionalmente, incertezas associadas aos sensores ambientais podem afetar o cálculo dos índices PMV e PPD e influenciar o desempenho da estratégia de controle [7], [8].

Nesse contexto, este trabalho propõe uma evolução da arquitetura apresentada por Leite e Vinhal, tendo como objetivo geral implementar e validar experimentalmente um sistema de Internet das Coisas, do inglês *Internet of Things* (IoT), de controle adaptativo para ar-condicionado baseado nos índices PMV e PPD da norma ISO 7730. A principal contribuição reside na integração de sensores ambientais de maior precisão e na medição direta da temperatura radiante média por meio de um sensor infravermelho, avaliando-se quantitativamente os impactos sobre o conforto térmico e a eficiência energética do ambiente.

Este artigo está estruturado em cinco seções. A Seção II aborda a fundamentação teórica e os trabalhos correlatos, compreendendo os modelos de conforto térmico, as normas técnicas aplicáveis e as tecnologias correlatas. A Seção III detalha os materiais e métodos empregados, descrevendo a arquitetura embarcada proposta e as estratégias de controle adaptativo implementadas. Em seguida, a Seção IV apresenta e discute os resultados experimentais sob a ótica do conforto térmico e da eficiência energética. Por fim, a Seção V condensa as conclusões deste estudo.

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A. Fundamentos do Conforto Térmico

A norma ISO 7730 define conforto térmico como a condição mental que expressa satisfação com o ambiente térmico [4]. Por se tratar de uma percepção subjetiva, sua avaliação depende tanto das condições ambientais quanto de características individuais dos ocupantes, incluindo taxa metabólica, vestimenta e capacidade de adaptação ao ambiente.

A formulação moderna para avaliação quantitativa do conforto térmico foi proposta por Fanger [6], a partir da análise do balanço térmico do corpo humano sob diferentes condições ambientais. Esse modelo originou os índices PMV e PPD, posteriormente incorporados à ISO 7730 [4], [6]. O índice PMV representa o voto térmico médio esperado de um grupo de indivíduos em uma escala que varia de -3 (sensação térmica de extremo frio) a +3 (sensação térmica de extremo calor), enquanto o PPD estima a porcentagem de ocupantes insatisfeitos para determinada condição térmica.

O cálculo desses índices considera seis variáveis: temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade do ar, umidade relativa, taxa metabólica e isolamento térmico das vestimentas. A partir dessas grandezas, o modelo estabelece o balanço entre a produção metabólica de calor e as trocas térmicas entre o corpo humano e o ambiente por convecção, radiação e evaporação. De acordo com a ISO 7730, mesmo na condição de neutralidade térmica (PMV = 0), o percentual mínimo de insatisfação previsto é de aproximadamente 5%, refletindo a variabilidade fisiológica e perceptiva existente entre os indivíduos.

Estudos posteriores demonstraram que a percepção térmica observada em ambientes reais nem sempre coincide integralmente com as previsões fornecidas pelo modelo PMV. Nesse contexto, De Dear e Brager [9] demonstraram que fatores adaptativos, tais como experiência térmica prévia, hábitos dos ocupantes e condições climáticas locais, influenciam a avaliação subjetiva do ambiente. Pesquisas realizadas em edifícios de escritórios indicam que diferenças na temperatura das superfícies, incidência de radiação solar, distribuição do fluxo de ar e características construtivas podem alterar a sensação térmica relatada pelos ocupantes, mesmo quando a temperatura do ar permanece dentro dos limites estabelecidos para conforto [1], [9].

Em razão de sua fundamentação fisiológica e de sua incorporação às principais normas internacionais de conforto térmico, incluindo a ISO 7730 e a ASHRAE Standard 55 [4], [19], os índices PMV e PPD são frequentemente utilizados como variáveis de referência em sistemas de climatização orientados ao conforto térmico. Nesses sistemas, as ações de controle são definidas a partir da condição térmica estimada dos ocupantes.

B. Modelo de Fanger e a Equação do Conforto

O modelo de Fanger parte do balanço de calor entre o corpo humano e o ambiente em regime permanente. A equação do conforto, em sua forma reorganizada pela ISO 7730:2005, expressa o voto médio previsto na Equação (1).

$$PMV = (0,303 e^{-0,036M} + 0,028) \cdot L \quad (1)$$

em que M é a taxa metabólica (W/m²) e L é a carga térmica do corpo, definida pelo conjunto de termos de produção e dissipação de calor da Equação (2).

$$L = (M - W) - E_{sk} - E_{sw} - E_{re} - C_{re} - R - C \quad (2)$$

Em que (M - W) é a energia líquida produzida pelo corpo; E_{sk} representa a perda evaporativa de calor por difusão através da pele; E_{sw} representa a perda de calor por sudorese, considerando apenas $M > 58,15 \text{ W/m}^2$; E_{re} e C_{re} representam as perdas respiratórias latente e sensível, respectivamente; R representa a troca radiativa entre a superfície da vestimenta e as superfícies envolventes; C representa a troca convectiva entre a superfície da vestimenta e o ar; e W representa o trabalho mecânico externo realizado pelo indivíduo (W/m²), normalmente assumido como nulo em atividades sedentárias de escritório [4].

Para o cálculo das trocas radiativas foram adotados os valores recomendados pela ISO 7730 para emissividade da superfície vestida ($\varepsilon = 0,95$). A constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times \frac{10^{-8} \text{ W}}{\text{m}^2 \text{ K}^4}$) foi utilizada na determinação da parcela radiativa da carga térmica.

A partir do PMV, o percentual previsto de insatisfeitos é obtido pela relação empírica de Fanger, apresentada na Equação (3).

$$PPD = 100 - 95 e^{(0,03353 PMV^4 + 0,2179 PMV^2)} \quad (3)$$

A ISO 7730 classifica os ambientes térmicos em três categorias de conforto. A Categoria A corresponde a ambientes com elevado nível de conforto térmico ($|PMV| \leq 0,2$ e $PPD < 6\%$); a Categoria B admite condições de conforto aceitáveis para a maioria das aplicações ($|PMV| \leq 0,5$ e $PPD < 10\%$); e a Categoria C representa o limite mínimo recomendado para ambientes moderados ($|PMV| \leq 0,7$ e $PPD < 15\%$) [4].

Nos últimos anos, a evolução dos sistemas embarcados e das tecnologias associadas à Internet das Coisas tem ampliado a aplicação dos modelos de conforto térmico em sistemas de climatização inteligentes. A integração entre sensores ambientais, microcontroladores e comunicação em rede possibilita a aquisição contínua de dados e a implementação de estratégias de controle em tempo real, permitindo que decisões operacionais sejam fundamentadas em índices de conforto térmico, como PMV e PPD, em substituição ao uso exclusivo de *setpoints* fixos de temperatura [10], [11]. Nesse contexto, sistemas baseados em IoT têm sido empregados para monitoramento ambiental, otimização do consumo energético e adaptação dinâmica das condições de climatização em função das necessidades dos ocupantes.

C. Temperatura Radiante Média (T_{rm}) — ISO 7726

A ISO 7726 [8] define a temperatura radiante média (T_{rm}) como a temperatura uniforme de um recinto imaginário no qual a troca de calor por radiação entre o ocupante e o ambiente seria equivalente à observada no ambiente real. Em ambientes com superfícies de temperaturas heterogêneas, como paredes expostas à radiação solar, vidros e luminárias, a hipótese simplificadora de igualdade entre a temperatura radiante média e a temperatura do ar ($t_r = t_a$) pode introduzir erros significativos na estimativa do índice PMV.

No sistema desenvolvido a T_{rm} foi estimada a partir das 64 leituras do sensor infravermelha AMG8833, utilizando a média aritmética dos pixels. Para reduzir a influência do ruído de medição característico do sensor, foi aplicada uma filtragem por média móvel de cinco amostras. Segundo o fabricante, o AMG8833 apresenta ruído típico de

aproximadamente $\pm 2,5$ °C [7]. Essa abordagem permite representar de forma mais fiel as condições radiativas do ambiente, quando comparada à utilização exclusiva da temperatura do ar, contribuindo para uma estimativa mais precisa dos índices de conforto térmico.

D. Parâmetros de Entrada Adotados (ISO 7730 Anexos B e C)

Os parâmetros pessoais adotados neste estudo foram definidos considerando 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 calça, camisa social e sapato fechado).

Os valores empregados no cálculo dos índices PMV e PPD são apresentados na Tabela I.

TABELA I
Parâmetros adotados no modelo PMV/PPD

Parâmetro	Valor	Unidade
Taxa metabólica (M)	1,2	met
Isolamento da vestimenta (I_{cl})	0,7	clo
Velocidade do ar (v_a)	0,1	m/s

Nota: 1 met = 58,15 W/m²; clo = 0,155 m².K/W. Valores adotados conforme a ISSO 7730.

III. MATERIAIS E MÉTODOS

A. Arquitetura Geral do Sistema

Esta seção apresenta os materiais empregados, a arquitetura proposta, os procedimentos de implementação e o protocolo experimental utilizado para avaliar o desempenho do controle adaptativo. São descritos os componentes de hardware e software, o método de cálculo dos índices PMV e PPD, a estratégia de controle implementada no ESP32 e os procedimentos utilizados para comparação do consumo energético e das condições de conforto térmico entre os cenários analisados.

A solução desenvolvida consiste em um controlador adaptativo baseado em IoT capaz de monitorar variáveis ambientais em tempo real e ajustar automaticamente o *setpoint* de operação de um ar-condicionado do tipo *split*. Sua arquitetura integra sensores ambientais, processamento embarcado, comunicação sem fio e atuação por infravermelho.

O protótipo utiliza um microcontrolador ESP32 [10] como unidade central de processamento, responsável pela aquisição dos dados dos sensores, cálculo dos índices PMV e PPD e execução da estratégia de controle. A medição da temperatura do ar e da umidade relativa é realizada por meio do sensor BME280 [11], enquanto a temperatura radiante média é estimada a partir das leituras da matriz termográfica do sensor infravermelho AMG8833 *Grid-EYE* [7]. A presença de ocupantes é detectada por um sensor PIR HC-SR501 [12], permitindo condicionar a operação do sistema à ocupação do ambiente.

A atuação sobre o ar-condicionado é realizada por meio da emissão de comandos infravermelhos compatíveis com o protocolo Samsung, utilizando um LED IR controlado pelo ESP32 e a biblioteca IRSamsungAc. Adicionalmente, o

sistema dispõe de comunicação Wi-Fi integrada para transmissão das variáveis monitoradas e dos parâmetros operacionais para a plataforma *Blynk* [14], possibilitando supervisão remota e registro dos dados experimentais.

O sistema foi organizado em três nós de processamento independentes (Nó 1, Nó 2 e Nó 3), conforme a figura 1, 2 e 3 respectivamente apresentam, cada um baseado em um microcontrolador ESP32-WROOM-32 [10] e conectado à plataforma *Blynk* IoT [14] por meio da rede Wi-Fi local. Essa arquitetura distribuída permitiu a separação das funções de controle térmico, monitoramento ambiental e instrumentação elétrica, aumentando a modularidade e a confiabilidade do sistema.

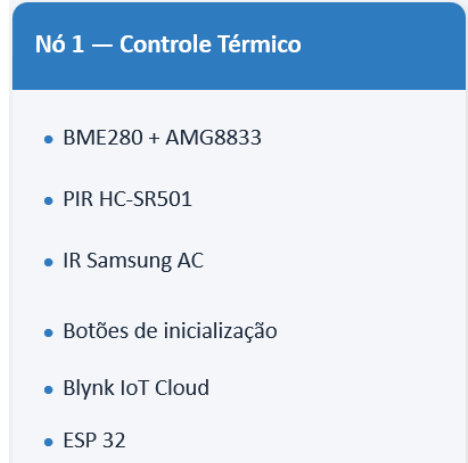


Figura 1 – Componentes de comando Nó 1.

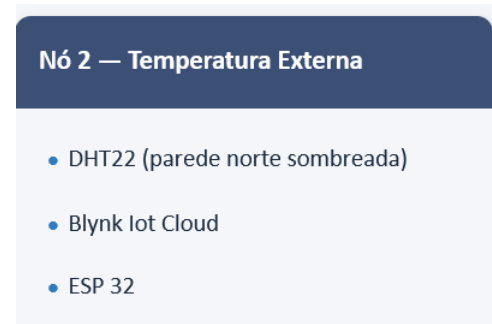


Figura 2 – Componentes de comando Nó 2.

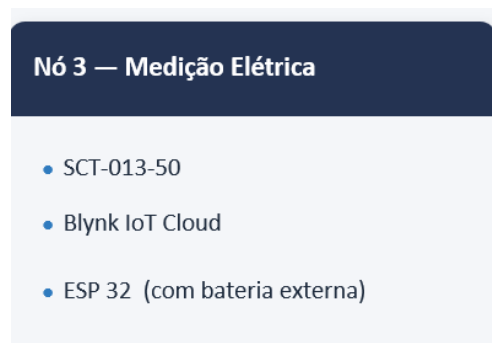


Figura 3 – Componentes de comando Nó 3.

O Nó 1, denominado firmware principal, é responsável pela aquisição das variáveis ambientais internas, cálculo dos índices PMV e PPD, determinação do *setpoint* e envio dos comandos infravermelhos ao ar-condicionado.

O Nó 2 realiza exclusivamente o monitoramento da temperatura externa por meio de um sensor DHT22 instalado

em parede sombreada, sem incidência direta de radiação solar.

O Nó 3 executa a instrumentação elétrica do sistema. Para isso, utiliza um transformador de corrente não invasivo SCT-013 [13], responsável pela medição da corrente RMS do ar-condicionado e pelo cálculo da potência instantânea e da energia elétrica acumulada durante os ensaios.

A utilização de três unidades de processamento independentes permitiu que cada subsistema operasse de forma autônoma, minimizando a ocorrência de falhas em cascata e simplificando as etapas de depuração, calibração e validação experimental. As Tabelas II, III e IV apresentam os componentes eletrônicos empregados em cada nó do sistema.

TABELA II
Lista de Componentes Nó 1 — Sistema Adaptativo

Código	Componente	Part Number
IC	Microcontrolador	ESP32-WROOM-32
S1	Sensor Temp. e umidade	Bosch BME280
S2	Sensor termográfico	AMG8833 Grid-EYE
S3	Sensor de Presença (PIR)	HC-SR501
L1	LED Infravermelho	LED 5mm 940nm
R1	Resistor 100 Ω	Resistor 1/4W 5% 100 Ω
R2	Resistor 100 Ω	Resistor 1/4W 5% 100 Ω
R3	Resistor 22 Ω	Resistor 1/4W 5% 22 Ω
R4	Resistor 470 Ω	Resistor 1/4W 5% 470 Ω
Q1	Transistor NPN	2N2222
SW1	Push Button	Push Button 12x12mm
SW2	Push Button	Push Button 12x12mm

Nota: W= Watts; Ω = Ohms;

TABELA III
Lista de Componentes Nó 2 — Temperatura Externa

Código	Componente	Part Number
IC	Microcontrolador	ESP32-WROOM-32
S1	Sensor Temp. e umidade	DHT22
R1	Resistor	Resistor 1/4W 5% 220k Ω

Nota: W= Watts; Ω = Ohms;

TABELA IV
Lista de Componentes Nó 3 — Instrumentação Elétrica

Código	Componente	Part Number
IC	Microcontrolador	ESP32-WROOM-32
S1	Sensor de Corrente	SCT-013
R1	Resistor de Carga (<i>Burden</i>)	Resistor 1/4W 5% 100 Ω
R2	Resistor de divisão de Tensão	Resistor 1/4W 5% 10k Ω
R3	Resistor de divisão de Tensão	Resistor 1/4W 5% 10k Ω
C1	Capacitor	Capacitor Eletrolítico 10 μ F

Nota: W= Watts; Ω = Ohms;

B. Implementação Física e Diagrama Executivo

O projeto eletrônico do Nó 1, incluindo o diagrama esquemático e o layout da placa de circuito impresso (PCI), foi desenvolvido utilizando a plataforma EasyEDA. A Figura 4 apresenta a representação tridimensional da PCI projetada, evidenciando a disposição dos componentes, trilhas de interconexão e conectores utilizados na implementação do sistema embarcado.

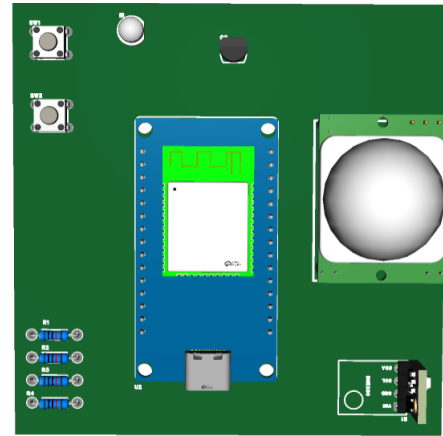


Figura 4 – Modelo tridimensional da placa de circuito impresso

A Figura 5 apresenta o protótipo finalizado do sistema adaptativo, acondicionado em uma caixa projetada e fabricada por impressão 3D. No interior da estrutura encontra-se a placa de circuito impresso (PCB), responsável pela integração dos sensores, módulos de comunicação e circuitos de controle utilizados no sistema.

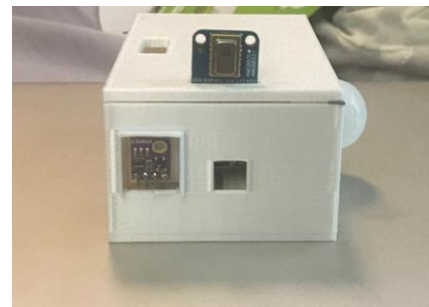


Figura 5 – Protótipo final do sistema adaptativo

C. Lógica Embarcada

A lógica embarcada foi implementada no ESP32 e executada em ciclos de 20 s, compreendendo a aquisição das variáveis ambientais, o cálculo dos índices PMV e PPD, a determinação do *setpoint* ótimo e o envio de comandos ao ar-condicionado.

A temperatura do ar e a umidade relativa são obtidas pelo sensor BME280, enquanto T_{rm} é estimada a partir da leitura da matriz infravermelha do sensor AMG8833. Os 64 pixels do sensor são processados para obtenção de uma estimativa de T_{rm} , sendo aplicada uma média móvel de cinco amostras para redução de ruídos de medição.

Com as variáveis ambientais disponíveis, o ESP32 executa localmente o modelo PMV/PPD da ISO 7730. Diferentemente de abordagens que assumem a temperatura radiante igual à temperatura do ar, o sistema incorpora a medição física de T_{rm} , permitindo representar de forma mais precisa as trocas radiativas entre o ocupante e o ambiente e, consequentemente, melhorar a estimativa de conforto térmico.

A partir dos índices calculados, o algoritmo determina automaticamente o *setpoint* que minimiza o valor absoluto do PMV dentro das restrições operacionais do equipamento. Dessa forma, o controle deixa de utilizar temperaturas fixas previamente definidas e passa a adaptar continuamente a operação do ar-condicionado às condições térmicas observadas. Por fim, o *setpoint* calculado é transmitido ao equipamento por meio de um LED emissor infravermelho

compatível com seu protocolo de comunicação a figura 6 apresenta o fluxograma da lógica implementada.

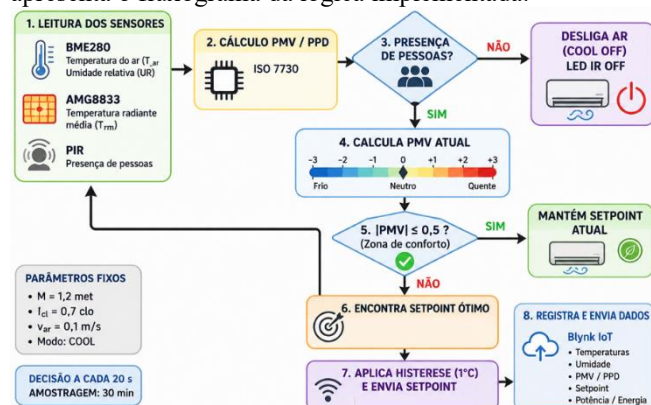


Figura 6 – Fluxograma da lógica embarcada

D. Local dos Ensaios

Os ensaios foram conduzidos em uma sala de escritório de advocacia, em Goiânia/GO, conforme a figura 7. A sala possui aproximadamente 20 m² e janela única voltada para oeste (1,2 × 1,0 m, vidro simples, persiana horizontal). A porta interna comunica-se com corredor refrigerado e a iluminação artificial é fornecida por luminárias de LED. A ocupação típica é de dois a três usuários em atividade sedentária, com vestimenta compatível com o uso administrativo (calça, camisa social e sapato fechado), condição que justifica a adoção de $M = 1,2$ met e $I_{cl} = 0,7$ clo.

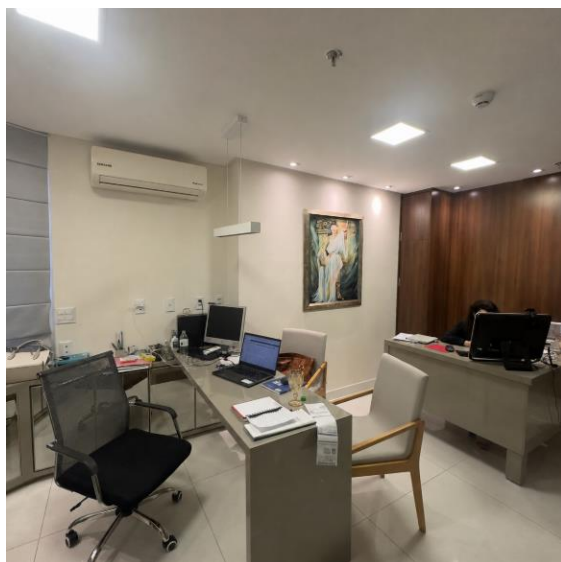


Figura 7 – Escritório utilizado para os ensaios

O ar-condicionado utilizado é um split Samsung Digital Inverter de 12 000 BTU/h, alimentado em 220 V, controlado por protocolo infravermelho Samsung. O período de ensaios estendeu-se de 09 a 28 de maio de 2026, no horário de 11h00 às 18h00, totalizando 7 horas de operação contínua por jornada.

E. Protocolo Experimental

Foram conduzidas vinte jornadas de ensaio, organizadas em dois cenários experimentais pareados. No Cenário A, o

ar-condicionado foi operado manualmente, utilizando os ajustes normalmente empregados pelos usuários do ambiente, totalizando dez jornadas válidas identificadas como Dias 01 a 10. No Cenário B, o sistema embarcado assumiu integralmente o controle do equipamento, realizando a determinação automática do *setpoint* com base nos índices PMV e PPD calculados em tempo real.

Após o início de cada ensaio do Cenário B, não foram realizadas intervenções manuais no ar-condicionado, de modo que todas as decisões de controle foram executadas exclusivamente pelo algoritmo proposto. Os ensaios dos dois cenários foram realizados em sequência cronológica direta, buscando minimizar diferenças decorrentes da sazonalidade climática e garantir maior equivalência das condições externas.

Os experimentos foram realizados entre o mês de maio de 2026, período caracterizado por temperaturas elevadas e predominância de condições favoráveis à utilização de sistemas de climatização na cidade de Goiânia/GO. Dias com ocorrência de precipitação significativa ou condições climáticas consideradas atípicas foram desconsiderados da amostra experimental, visando reduzir a influência de variações meteorológicas abruptas sobre os resultados de consumo energético e conforto térmico.

O sensor BME280 foi instalado em posição representativa da zona ocupada, afastado da incidência direta do fluxo de ar insuflado pelo ar-condicionado e de fontes localizadas de calor, buscando minimizar interferências nas medições ambientais.

O sensor AMG8833 foi instalado na zona ocupada do ambiente, aproximadamente à altura de um ocupante sentado, com campo de visão direcionado para a região central da sala. O posicionamento buscou evitar a incidência direta do fluxo de ar insuflado pelo condicionador e a predominância de superfícies isoladas no campo de visão, permitindo que a estimativa da temperatura radiante média representasse de forma mais adequada as condições térmicas experimentadas pelos ocupantes, em conformidade com os princípios de medição estabelecidos pela ISO 7726.

Cada jornada produziu quinze registros experimentais, incluindo a medição inicial realizada às 11h00, totalizando trezentos pontos de medição ao longo dos vinte dias de ensaio. Os dados obtidos foram posteriormente utilizados para a análise comparativa do consumo energético, da evolução dos índices PMV e PPD e do comportamento dos *setpoints* determinados pelo sistema adaptativo.

F. Validação da Equivalência Climática

Para reduzir a influência das condições meteorológicas na comparação entre os cenários experimentais, foi monitorada a temperatura externa ao longo de todos os ensaios. A diferença absoluta entre as temperaturas externas médias dos pares de ensaio apresentou valor médio de 0,84°C e máximo de 1,99°C, indicando elevada similaridade das condições térmicas externas durante os experimentos. Esses resultados sugerem que as diferenças observadas no consumo energético e nos índices de conforto térmico estão predominantemente associadas à estratégia de controle empregada, e não a variações climáticas significativas entre os períodos avaliados.

G. Tratamento Estatístico

A redução percentual do consumo de energia proporcionada pelo sistema proposto foi calculada pela Equação (4), utilizando como referência o consumo energético acumulado do Cenário A.

$$\Delta E = \frac{(E_A - E_B)}{E_A} \times 100 \% \quad (4)$$

em que (E_A) representa a energia consumida no cenário de operação manual e (E_B) a energia consumida no cenário com controle adaptativo.

A energia diária foi obtida por integração numérica da potência ativa medida pelo sensor SCT-013-100, considerando intervalo de amostragem de 30 min ($\Delta t = 0,5h$).

Para verificar a significância estatística da diferença de consumo entre os cenários, foi aplicado o teste *t* de Student pareado, adotando-se nível de significância de 5% ($\alpha=0,05$). Como medida complementar de robustez, também foi empregado o teste não paramétrico de Wilcoxon, adequado para amostras reduzidas e sem pressuposto de normalidade. Os resultados de ambos os testes foram utilizados para avaliar a hipótese de que o sistema proposto promove redução significativa do consumo energético em relação à operação convencional.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A. Consumo de Energia Elétrica

A Figura 8 apresenta o consumo energético registrado em cada um dos dez dias pareados, com as médias por cenário indicadas por linhas horizontais. O Cenário A apresentou energia total acumulada de 46,29 kWh ao longo das dez jornadas, correspondente a uma média diária de 4,63 kWh. O Cenário B, sob operação adaptativa, consumiu 21,14 kWh no mesmo período (média de 2,114 kWh/dia). A eficiência energética obtida foi, portanto pela equação 5:

$$\Delta E = \frac{(46,29 - 21,14)}{46,29} \times 100 \% = 54,33 \% \quad (5)$$

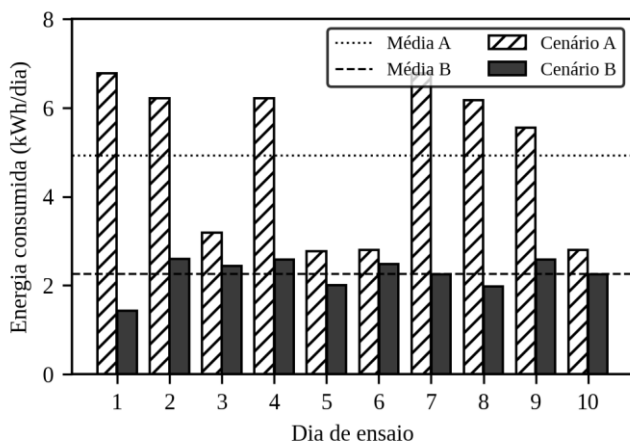


Figura 8 – Consumo energético diário nos dez pares de ensaios.

A diferença observada é estatisticamente significativa em ambos os testes aplicados: teste *t* pareado $t(9) = 4,46$ com $p = 1,57 \times 10^{-3}$, e teste de *Wilcoxon* pareado $W = 0$ com $p = 1,95 \times 10^{-3}$. A potência média do compressor reduziu-se de 656,9 W (Cenário A) para 301,3 W (Cenário B), uma queda de 54,13%, coerente em magnitude com a redução da energia

acumulada. A magnitude da economia observada é compatível com a literatura nacional. Leite e Vinhal [5] reportaram redução de consumo da ordem de 73% em ambiente climatizado utilizando estratégia de controle baseada em conforto térmico. Embora o valor obtido neste trabalho tenha sido inferior, as diferenças podem ser atribuídas às condições específicas de ocupação, características construtivas do ambiente e critérios de operação adotados em cada estudo. O pico médio de potência diminuiu 21,2%, resultado compatível com uma redução dos eventos de acionamento e das variações bruscas de carga observadas durante a operação do equipamento.

B. Conforto Térmico (PMV e PPD)

No Cenário A, a temperatura interna média de 19,53 °C resultou em PMV médio de -1,225, indicando predominância de sensação térmica fria entre os ocupantes. De acordo com a relação estabelecida pela ISO 7730, esse valor corresponde a um PPD aproximado de 37,03%, evidenciando que uma parcela significativa dos usuários estaria insatisfeita com as condições térmicas do ambiente. Dessa forma, o Cenário A encontra-se fora das categorias de conforto da ISO 7730, uma vez que o valor absoluto do PMV excede o limite da Categoria C ($|\text{PMV}| \leq 0,7$) e o PPD supera o limite máximo admissível de 15%.

Em contraste, o Cenário B apresentou PMV médio de -0,039 e PPD médio de 5,77%, valores compatíveis com a Categoria A da ISO 7730, caracterizada por condições próximas à neutralidade térmica e elevado nível de conforto térmico. A redução simultânea dos índices PMV e PPD demonstra que o sistema de controle adaptativo foi capaz de manter o ambiente em condições significativamente mais confortáveis, reduzindo a probabilidade de desconforto térmico dos ocupantes e aproximando a operação do sistema da condição ideal de neutralidade térmica. A Tabela V consolida os indicadores de conforto térmico obtidos nos dois cenários.

TABELA V
Indicadores de Conforto Térmico (ISO 7730)

Indicador	Cenário A	Cenário B
PMV médio	-1,225	-0,039
PPD médio (%)	37,03	5,77
Cat. ISO predominante	Fora	A

A redução do desvio-padrão diário do PMV indica maior estabilidade do conforto térmico ao longo de cada jornada. Esse comportamento é esperado, pois o controle adaptativo evita os ajustes reativos descritos por Leite e Vinhal [5] no cenário de operação manual: na ausência do protótipo, o usuário tende a alternar bruscamente entre *setpoints* extremos em resposta à percepção subjetiva momentânea, o que produz episódios alternados de frio e calor mesmo dentro de uma única jornada.

C. Comportamento do Setpoint Adaptativo

A Figura 9 evidencia a propriedade adaptativa do controlador. Enquanto o Cenário A mantém-se com *setpoint* variável por imposição do protocolo, no Cenário B o *setpoint* médio diário distribui-se entre 23 °C e 24 °C, com correlação positiva entre o *setpoint* médio e a temperatura externa; observa-se tendência de aumento do *setpoint* médio em função da temperatura externa média.

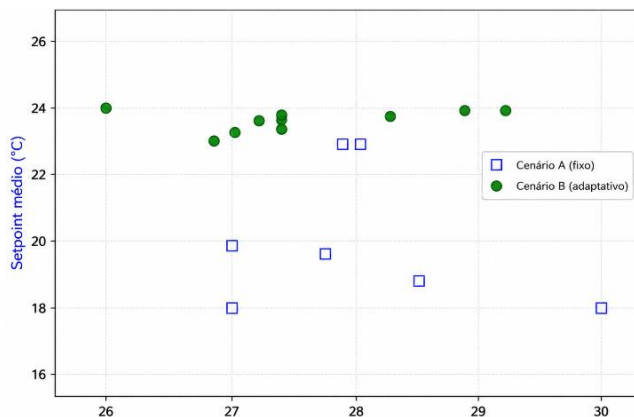


Figura 9 – Setpoint médio diário em função da temperatura externa média.

D. Evolução Diária das Variáveis Controladas

A Figura 10 apresenta a evolução das variáveis controladas ao longo dos dez dias do Cenário B. Observam-se três comportamentos relevantes. Primeiro, a temperatura do ar (T_{ar}) acompanha de perto o setpoint comandado, com diferença média inferior a 1 °C, indicando rastreamento estável do controlador. Segundo o setpoint varia entre 23 °C e 24 °C em resposta à temperatura externa, evidenciando a propriedade adaptativa do sistema. Terceiro, o PMV médio diário permanece confinado no intervalo $[-0,18; +0,13]$, faixa inteiramente contida na Categoria A da ISO 7730 ($|\text{PMV}| \leq 0,2$), confirmando o elevado nível de conforto mantido pelo sistema.

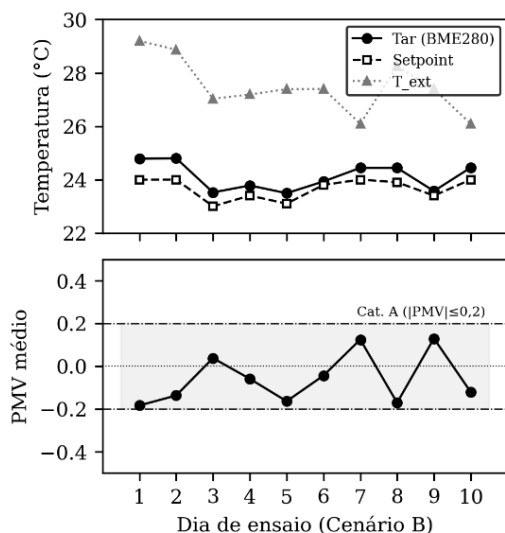


Figura 10 – Evolução diária das variáveis controladas no Cenário B.

E. Quadro Comparativo Consolidado

A Tabela VI consolida os principais indicadores energéticos, ambientais e de conforto obtidos nos dois cenários.

TABELA VI
Quadro Comparativo Consolidado A vs B

Indicador	Cenário A	Cenário B
Energia total — 10 dias (kWh)	46,29	21,14
Energia média diária (kWh/dia)	4,63	2,114
Potência média (W)	656,9	301,3
Pico de potência médio (W)	886	698

Indicador	Cenário A	Cenário B
Setpoint médio (°C)	19	24
T_{ar} interna média (°C)	21,63	24,12
UR interna média (%)	54,09	58,0
Text média (°C)	28,10	27,49
PMV médio	-1,225	-0,039
PPD médio (%)	37,03	5,77
Eficiência ΔE (%)	—	54,33

A Tabela VI consolida os principais indicadores energéticos, ambientais e de conforto térmico obtidos nos Cenários A e B. Observa-se que a implementação do sistema de controle adaptativo resultou em redução expressiva do consumo energético, com a energia total consumida diminuindo de 46,29 kWh para 21,14 kWh ao longo dos dez dias de ensaio, correspondendo a uma economia de 54,33%. De forma semelhante, a energia média diária foi reduzida de 4,63 kWh/dia para 2,114 kWh/dia, evidenciando que o sistema foi capaz de manter condições adequadas de climatização utilizando significativamente menos energia.

A potência média demandada pelo equipamento também apresentou redução substancial, passando de 656,9 W no Cenário A para 301,3 W no Cenário B. O pico médio de potência foi reduzido de 886 W para 698 W, indicando menor esforço operacional do compressor e menor ocorrência de ciclos de resfriamento intensos. Esse comportamento está associado ao aumento do setpoint médio de operação, que passou de 19 °C para 24 °C, reduzindo a necessidade de funcionamento contínuo do sistema de climatização.

Do ponto de vista ambiental, verificou-se que a temperatura externa média foi semelhante nos dois cenários (28,10 °C no Cenário A e 27,49 °C no Cenário B), indicando que as diferenças observadas no consumo energético não foram provocadas por alterações climáticas significativas durante os ensaios. A umidade relativa média também apresentou pequena variação, permanecendo em níveis comparáveis entre os cenários.

Em relação ao conforto térmico, o Cenário A apresentou PMV médio de -1,225 e PPD médio de 37,03%, caracterizando uma condição de desconforto térmico por frio e indicando que mais de um terço dos ocupantes tenderia a estar insatisfeito com o ambiente. Em contraste, o Cenário B apresentou PMV médio de -0,039 e PPD médio de 5,77%, valores compatíveis com a Categoria A da ISO 7730, representando condições próximas à neutralidade térmica e elevado nível de conforto. Esses resultados demonstram que o sistema adaptativo não apenas reduziu o consumo energético, mas também melhorou significativamente a qualidade térmica do ambiente, eliminando o super-resfriamento observado na operação manual do ar-condicionado.

F. Comparação com Leite e Vinhal

Os resultados obtidos confirmam a viabilidade de estratégias de controle baseadas em conforto térmico para redução do consumo energético. Comparando-se com o trabalho de Leite e Vinhal [5], que reportou economia próxima de 73%, o sistema proposto apresentou redução de 54,33%. Embora inferior em termos absolutos, a comparação deve considerar as diferenças metodológicas entre os estudos.

A principal contribuição deste trabalho consiste na incorporação da temperatura radiante média T_{rm} medida

fisicamente por meio do sensor AMG8833, permitindo representar de forma mais precisa as trocas radiativas consideradas no cálculo do PMV. Além disso, todo o processamento dos índices PMV/PPD e a determinação automática do setpoint foram executados localmente em um ESP32, possibilitando operação autônoma em tempo real.

Além da redução de consumo, o sistema melhorou as condições de conforto térmico, reduzindo o PPD médio de 21,36% para 9,5%, mantendo o ambiente dentro dos limites recomendados pela ISO 7730.

V. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento e a validação experimental de um sistema IoT de controle adaptativo para ar-condicionado, implementado em microcontrolador ESP32 e fundamentado nos índices PMV e PPD da ISO 7730:2005. Como principal contribuição, o sistema incorporou sensores de maior precisão para aquisição das variáveis ambientais, incluindo o BME280 para temperatura e umidade relativa do ar e o sensor infravermelho AMG8833 para estimativa da temperatura radiante média, reduzindo limitações observadas em abordagens baseadas exclusivamente na temperatura do ar ou em sensores de menor precisão.

Os resultados experimentais demonstraram que a utilização dessas variáveis ambientais no processo de tomada de decisão permitiu ao sistema adaptar automaticamente o *setpoint* do ar-condicionado às condições térmicas reais do ambiente. Como consequência, foi obtida uma redução de 54,33% no consumo de energia elétrica em comparação à operação convencional com ajuste manual de temperatura. Adicionalmente, observou-se redução da potência média demandada pelo equipamento e dos picos de potência, evidenciando uma operação mais eficiente do sistema de climatização, essa redução contribui potencialmente para o aumento da vida útil do equipamento e para a redução dos esforços eletromecânicos associados ao processo de partida.

Além dos ganhos energéticos, o sistema proporcionou melhoria dos indicadores de conforto térmico. O PPD médio foi reduzido de 37,03% para 5,77%, enquadrando o ambiente na Categoria A da ISO 7730 e demonstrando que a economia de energia foi alcançada sem comprometer o bem-estar dos ocupantes. Esse resultado reforça que estratégias de controle fundamentadas em conforto térmico podem superar a prática comum de utilização de *setpoints* excessivamente baixos, frequentemente responsáveis por desperdício energético e desconforto por resfriamento excessivo.

Os resultados obtidos confirmam a viabilidade técnica de sistemas embarcados de baixo custo para gerenciamento inteligente da climatização, demonstrando que a combinação de sensores de maior precisão, monitoramento contínuo das condições ambientais e controle adaptativo baseado em conforto térmico constitui uma alternativa eficaz para aumento da eficiência energética em edificações.

Como trabalhos futuros, recomenda-se a validação da solução em diferentes ambientes e perfis de ocupação, a comparação direta da estimativa de temperatura radiante média com instrumentos de referência previstos na ISO 7726 e a integração do sistema com plataformas de automação predial e algoritmos de aprendizado de máquina para personalização do conforto térmico e otimização adicional do consumo energético.

REFERÊNCIAS

- [1] C. A. B. Pereira and E. Ghisi, “Influência das características construtivas no consumo de energia de edifícios comerciais brasileiros,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 1, pp. 184–193, 2011.
- [2] Empresa de Pesquisa Energética (EPE), *Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2026*. Brasília, DF, Brasil: EPE, 2026. [Online]. Available: <https://dashboard.epe.gov.br>
- [3] Empresa de Pesquisa Energética (EPE), *Consumo de Energia Elétrica no Brasil*. Brasília, DF, Brasil: EPE. [Online]. Available: <https://www.epe.gov.br>
- [4] International Organization for Standardization, ISO 7730:2005 – 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, Switzerland: ISO, 2005.
- [5] D. P. S. Leite, L. V. Andrade, and F. M. S. Simões, “Sistema de controle adaptativo de ar-condicionado baseado em condições ambientais,” *Trabalho de Conclusão de Curso, Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC Goiás), Goiânia, GO, Brasil, 2025*. [Online]. Available: <https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/handle/123456789/9674>
- [6] P. O. Fanger, *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1970.
- [7] Panasonic Corporation, *Grid-EYE AMG8833 Infrared Array Sensor Datasheet*. Osaka, Japan: Panasonic Industry Co., Ltd., 2024.
- [8] International Organization for Standardization, ISO 7726: Ergonomics of the Thermal Environment — Instruments for Measuring Physical Quantities. Geneva, Switzerland: ISO, 1998.
- [9] R. de Dear and G. Brager, “Developing an adaptive model of thermal comfort and preference,” *ASHRAE Transactions*, vol. 104, no. 1a, pp. 145–167, 1998.
- [10] Espressif Systems, *ESP32-WROOM-32 Technical Reference Manual*. Shanghai, China: Espressif Systems, 2024.
- [11] Bosch Sensortec GmbH, *BME280 Combined Humidity and Pressure Sensor Datasheet*. Reutlingen, Germany: Bosch Sensortec GmbH, 2024.
- [12] Shenzhen Haiwang Sensor Co., Ltd., *HC-SR501 PIR Motion Sensor Datasheet*. Shenzhen, China: Shenzhen Haiwang Sensor Co., Ltd., 2024.
- [13] YHDC Electronics Co., Ltd., *SCT-013 Series Current Transformer Datasheet*. China: YHDC Electronics Co., Ltd., 2024.
- [14] Blynk Inc., *Blynk IoT Platform Documentation*. [Online]. Available: <https://blynk.io>
- [15] R. L. Burden and J. D. Faires, *Numerical Analysis*, 10th ed. Boston, MA, USA: Cengage Learning, 2015.
- [16] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 10th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2019.
- [17] Student, “The probable error of a mean,” *Biometrika*, vol. 6, no. 1, pp. 1–25, 1908.
- [18] F. Wilcoxon, “Individual comparisons by ranking methods,” *Biometrics Bulletin*, vol. 1, no. 6, pp. 80–83, 1945.
- [19] ASHRAE, *ASHRAE Handbook – HVAC Applications*. Atlanta, GA, USA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2023.