v7.n10.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA, EM AMBIENTE DE SIMULAÇÃO, PARA SUBSTITUIÇÃO DE CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMÁVEIS NA AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO, VENTILAÇÃO E AR CONDICIONADO INDUSTRIAIS

TECHNICAL AND ECONOMIC FEASIBILITY STUDY, IN A SIMULATION ENVIRONMENT, FOR THE REPLACEMENT OF PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLERS IN THE AUTOMATION OF INDUSTRIAL HEATING, VENTILATION, AND AIR CONDITIONING SYSTEMS

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA, EN ENTORNO DE SIMULACIÓN, PARA LA SUSTITUCIÓN DE CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMABLES EN LA AUTOMATIZACIÓN DE SISTEMAS DE CALEFACCIÓN, VENTILACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO INDUSTRIALES

Matheus Cerqueira da Paixão[1], Augusto Perez de Andrade[2]

e7109172
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i10.9172

PUBLICADO: 10/2026

RESUMO

Este trabalho avalia, em ambiente de simulação, a viabilidade técnica e econômica da substituição de Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) por microcontroladores de arquitetura de 32 bits, especificamente o ESP32, na automação de sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC) industriais de pequeno e médio porte. Investigou-se a hipótese de que essa substituição pode ser viável, desde que aplicados circuitos de isolamento e de proteção contra transientes e ruídos eletromagnéticos. Trata-se de pesquisa aplicada, exploratória e de abordagem quantitativa, conduzida por simulação computacional, com *custom chips* desenvolvidos para reproduzir, no ambiente de simulação, o comportamento funcional do sensor SHT31 e do *driver* ULN2003, e com o uso dos dois núcleos do ESP32 para separar a malha de controle das tarefas de rede. Foram executados oito cenários de teste funcional do *firmware*: regime permanente com banda de histerese, intertravamento contra partidas sucessivas, rejeição a ciclos curtos, falha segura do sensor, partida sequencial de atuadores, resiliência de rede, redundância de equipamentos e paradas incondicionais (falta de fase e emergência). Todos apresentaram comportamento compatível com os critérios definidos para a simulação. Na dimensão econômica, o levantamento comparativo indicou redução estimada de 35% a 46% no custo de aquisição dos componentes considerados, em relação a um CLP de referência. Os resultados, limitados ao ambiente de simulação e sem validação em protótipo físico, fornecem evidências preliminares de viabilidade funcional e de potencial vantagem econômica, o que justifica a continuidade da pesquisa rumo à validação em bancada.

PALAVRAS-CHAVE: Automação industrial. Controlador Lógico Programável. Microcontrolador ESP32. Sistemas AVAC. Viabilidade econômica.

[1] Graduando em Engenharia Elétrica pela Universidade de Araraquara - UNIARA.
[2] Doutorando em Engenharia Elétrica pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

ABSTRACT
This study evaluates, in a simulation environment, the technical and economic feasibility of replacing Programmable Logic Controllers (PLCs) with 32-bit microcontrollers, specifically the ESP32, in the automation of small and medium-sized industrial Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) systems. The hypothesis investigated was that this replacement may be feasible, provided that isolation and protection circuits against transients and electromagnetic noise are applied. This is an applied, exploratory, quantitative study conducted through computer simulation, using custom chips developed to reproduce, in the simulation environment, the functional behavior of the SHT31 sensor and the ULN2003 driver, and using the two cores of the ESP32 to separate the control loop from network tasks. Eight functional firmware test scenarios were executed: steady-state operation with a hysteresis band, interlock against successive starts, short-cycle rejection, sensor fail-safe behavior, sequential actuator startup, network resilience, equipment redundancy, and unconditional shutdowns (phase loss and emergency stop). All of them showed behavior compatible with the criteria defined for the simulation. On the economic side, the comparative survey indicated an estimated reduction of 35% to 46% in the acquisition cost of the components considered, relative to a reference PLC. The results, limited to the simulation environment and without validation in a physical prototype, provide preliminary evidence of functional feasibility and potential economic advantage, which justifies continuing the research toward bench validation.

KEYWORDS: *Industrial automation. Programmable Logic Controller. ESP32 microcontroller. HVAC systems. Economic feasibility.*

RESUMEN
Este trabajo evalúa, en entorno de simulación, la viabilidad técnica y económica de sustituir Controladores Lógicos Programables (PLC) por microcontroladores de 32 bits, específicamente el ESP32, en la automatización de sistemas de Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado (HVAC) industriales de pequeño y mediano porte. Se investigó la hipótesis de que dicha sustitución puede ser viable, siempre que se apliquen circuitos de aislamiento y de protección contra transitorios y ruido electromagnético. La investigación, aplicada, exploratoria y cuantitativa, se realizó mediante simulación computacional, con custom chips desarrollados para reproducir el comportamiento funcional del sensor SHT31 y del driver ULN2003, y con el uso de los dos núcleos del ESP32 para separar el lazo de control de las tareas de red. Se ejecutaron ocho escenarios de prueba funcional del firmware: régimen permanente con banda de histéresis, enclavamiento contra arranques sucesivos, rechazo de ciclos cortos, falla segura del sensor, arranque secuencial de actuadores, resiliencia de red, redundancia de equipos y paradas incondicionales (falta de fase y emergencia). Todos presentaron comportamiento compatible con los criterios definidos para la simulación. En la dimensión económica, el relevamiento comparativo indicó una reducción estimada del 35% al 46% en el costo de adquisición de los componentes considerados, respecto a un PLC de referencia. Los resultados, limitados al entorno de simulación y sin validación en prototipo físico, aportan evidencia preliminar de viabilidad funcional y de potencial ventaja económica, lo que justifica continuar la investigación hacia la validación en banco de pruebas.

PALABRAS CLAVE*: Automatización industrial. Controlador Lógico Programable. Microcontrolador ESP32. Sistemas HVAC. Viabilidad económica.*

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

INTRODUÇÃO

As perdas de eficiência energética decorrentes da dissipação de calor constituem um problema relevante tanto em sistemas complexos quanto em sistemas simples. Nesse contexto, os sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC), do inglês *Heating, Ventilation and Air Conditioning* (HVAC), têm importância que ultrapassa o conforto térmico: ao controlarem a temperatura, a umidade e a qualidade do ar, contribuem para o ganho de eficiência energética e para a redução das manutenções.

Nesse sentido, o papel dos Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) em sistemas AVAC é interpretar e processar os dados enviados pelos sensores de temperatura, umidade e qualidade do ar e, a partir dessas informações, comandar o acionamento de motores, bombas e válvulas.

Este artigo tem o objetivo de analisar, sob os aspectos técnico e econômico, a substituição do CLP por um microcontrolador ESP32 na automação de sistemas AVAC industriais de pequeno e médio porte. Embora o CLP seja um equipamento de elevada confiabilidade, seu custo de aquisição, suas limitações de conectividade e a necessidade de serviço especializado têm aumentado a busca por alternativas em empresas de diferentes portes.

De acordo com Lugli e Santos (2014, p. 12-14), os sistemas de automação tradicionais, estruturados de forma ponto a ponto com CLPs, exigem que cada dispositivo de entrada e saída (E/S) seja conectado fisicamente ao controlador, o que resulta em elevado custo de implementação, decorrente do excesso de cabeamento, e em maior complexidade na identificação de falhas. A adoção de redes industriais e, mais recentemente, de tecnologias sem fio no chão de fábrica demonstrou a viabilidade de reduzir essa infraestrutura física de cabos.

A partir da análise de demandas em uma empresa do setor de climatização industrial, com foco em salas elétricas e plantas químicas, identificou-se um custo elevado no desenvolvimento de painéis de automação AVAC. Esse cenário impulsionou a busca por otimizações de projeto que reduzam os gastos com componentes e com mão de obra especializada. Diante disso, este trabalho propõe a substituição do principal ativo de controle, o CLP, responsável por cerca de 8,24% do valor total do projeto, por uma arquitetura embarcada de baixo custo. O estudo avalia o impacto dessa transição sobre o custo de aquisição dos componentes e discute suas implicações para a implementação, preservando-se as funções operacionais de segurança e estabilidade do sistema.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A hipótese investigada é a de que a substituição de CLPs por microcontroladores de arquitetura de 32 bits pode apresentar viabilidade técnica e econômica em determinadas aplicações AVAC de pequeno e médio porte. Supõe-se que, mediante a aplicação de circuitos de isolamento e de proteção contra transientes e ruídos eletromagnéticos, o microcontrolador possa executar as funções de controle normalmente atribuídas ao CLP e que a arquitetura, integrada a sensores digitais e à conectividade sem fio, possa reduzir o custo de aquisição dos componentes e o cabeamento de comunicação. A equivalência de confiabilidade e de robustez industrial entre as duas plataformas não é objeto de demonstração neste estudo, pois depende de ensaios em protótipo físico.

O objeto de estudo delimita-se ao microcontrolador ESP32, associado ao sensor SHT31, ao *driver* ULN2003 e a relés de estado sólido. Outras plataformas, como microcontroladores de 8 bits, computadores de placa única e redes industriais, são abordadas apenas no referencial teórico, como contexto das alternativas descritas na literatura. A avaliação técnica é realizada por meio de testes funcionais do *firmware* em ambiente de simulação, e a avaliação econômica, por levantamento comparativo do custo de aquisição dos componentes.

1. REFERENCIAL TEÓRICO

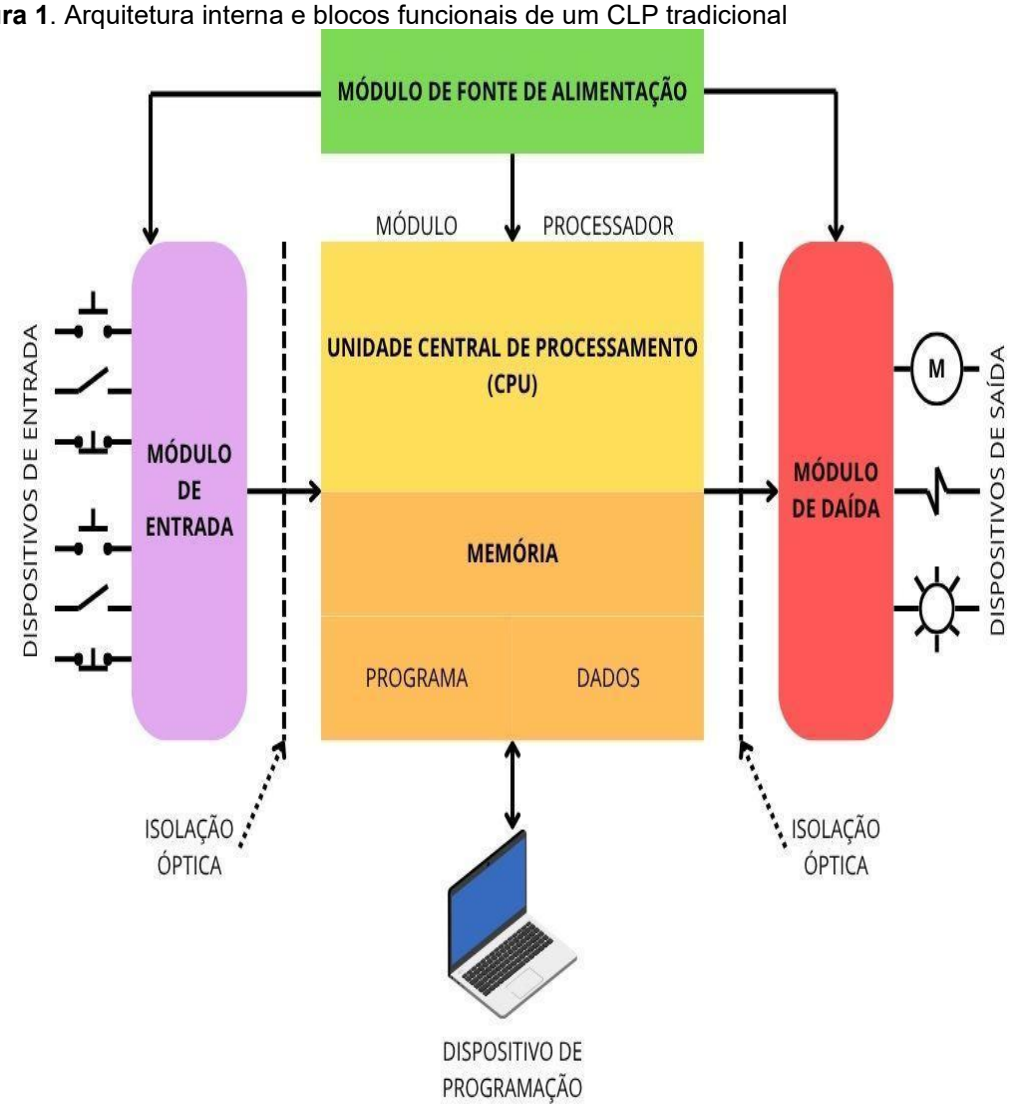
1.1. Automação industrial e CLPs

O Controlador Lógico Programável (CLP), do inglês *Programmable Logic Controller* (PLC), é um dispositivo eletrônico digital constituído basicamente por entradas, unidade central de processamento e saídas (Petruzella, 2014). O primeiro modelo, o Modicon 084, foi desenvolvido por Richard E. Morley, da Bedford Associates, em resposta a uma demanda apresentada pela General Motors em 1968.

De acordo com Zancan (2011), o CLP surgiu em função das necessidades da indústria automobilística, cujos painéis eletromecânicos de controle lógico dificultavam alterações na lógica de funcionamento a cada modificação na linha de produção, e evoluiu ao longo de cinco gerações, da programação em *Assembly*, dependente de conhecimento pleno do *hardware*, aos padrões de protocolos de comunicação que facilitam a interface com outros equipamentos e com sistemas supervisórios. A arquitetura que reúne os componentes internos do CLP pode ser visualizada no diagrama de blocos funcionais da Figura 1.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 1. Arquitetura interna e blocos funcionais de um CLP tradicional



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A estrutura apresentada na Figura 1 evidencia por que esses controladores são considerados robustos para o ambiente industrial: dispõem de circuitos de isolação óptica nas interfaces de entrada e de saída, o que reduz sua suscetibilidade a perturbações elétricas e a ruídos eletromagnéticos provenientes do campo, e de estágios de potência integrados aos módulos de saída para o acionamento de cargas (Petruzella, 2014). Além disso, os requisitos de equipamento e os ensaios aplicáveis aos CLPs, inclusive os de compatibilidade eletromagnética, são estabelecidos na norma IEC 61131-2 (International Electrotechnical Commission, 2017), o que não ocorre, de forma nativa, com plataformas microcontroladas de propósito geral.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

1.2. Sistemas AVAC industriais

Conforme McQuiston, Parker e Spitler (2005), o conceito moderno de condicionamento de ar, cuja origem remonta aos experimentos de Willis Carrier em 1902, consolida o controle simultâneo de temperatura, umidade, filtragem e circulação do ar. Os sistemas AVAC atuais realizam esse controle por meio de componentes como sensores, resistências, ventiladores, resfriadores (*chillers*), filtros e controladores lógicos.

A evolução dos padrões de controle na climatização aponta para a descentralização e a conectividade. Segundo McQuiston, Parker e Spitler (2005), a computação tornou-se essencial no controle operacional de edifícios e plantas industriais, com destaque para as ferramentas baseadas na *web*, que permitem a supervisão sem a dependência de equipamentos ou programas proprietários de alto custo. Os autores observam ainda que "a modificação e substituição do sistema AVAC está crescendo em um ritmo rápido, pois os sistemas envelhecem ou não conseguem atender aos novos requisitos [...] e à competição econômica" (McQuiston; Parker; Spitler, 2005, p. 2, tradução nossa), cenário que justifica a pesquisa de plataformas alternativas e financeiramente viáveis para a modernização (*retrofitting*) de painéis.

Nos painéis de automação de sistemas AVAC, os CLPs são responsáveis principalmente pelo acionamento de motores e compressores, a partir dos sinais dos sensores. Em aplicações de pequeno e médio porte, contudo, esses controladores podem apresentar complexidade operacional, de manutenção e de programação, além de custo, superiores aos exigidos pela aplicação.

1.3. Tecnologias alternativas

Entre as alternativas ao uso de CLPs em arquitetura ponto a ponto, Lugli e Santos (2014) descrevem as redes industriais, que empregam dispositivos sem fio, microprocessadores e microcontroladores. Os autores apresentam quatro redes, AS-Interface (AS-i), DeviceNet, PROFIBUS e Foundation Fieldbus, e detêm-se na primeira, que consideram a de menor custo e de mais fácil operação e programação, com redução de custos de 26,2% em relação aos sistemas convencionais. Essa redução está associada à economia de cabeamento, uma vez que a alimentação e a comunicação trafegam pelo mesmo cabo. As desvantagens associadas a essa solução são a passagem de toda a transferência de informações pelo dispositivo mestre, o que aumenta o tempo de ciclo, e o comprimento da rede, limitado a 100 metros sem o uso de repetidores.

Islam *et al.* (2020) indicaram que funções atribuídas a CLPs podem ser executadas por um computador de placa única (*Single-Board Computer* – SBC), integrável a diferentes recursos,

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

desde interfaces de visualização até conectividade Bluetooth e Wi-Fi. Para a coleta de dados, os autores empregaram o sensor de baixo custo DHT11 e o sensor de corrente ACS712, que mantém os dispositivos isolados entre si; o processamento foi realizado com a linguagem R e com o programa MATLAB. Concluíram que o uso de dispositivos de Internet das Coisas (IoT) tem grande potencial, principalmente no monitoramento do consumo de energia em sistemas AVAC.

Montebeller (2006) estudou a automação de ar-condicionado e de outros sistemas prediais com módulos eletrônicos sem fio de baixo custo e baixo consumo, comparou quatro tecnologias (Bluetooth, IEEE 802.11b, ZigBee e Z-Wave) e indicou o ZigBee como a mais adequada, por seu alcance, baixo consumo e longa autonomia.

1.4. Microcontroladores

Os microcontroladores evoluíram dos primeiros dispositivos de 4 bits, da década de 1970, para as arquiteturas de 8 bits amplamente adotadas na indústria e, mais recentemente, para os Sistemas em um Chip (*System on a Chip* – SoC) de 32 bits, impulsionados pela demanda por conectividade sem fio e por maior capacidade de processamento.

Nesse cenário, a Espressif Systems lançou o ESP32, voltado a aplicações de IoT. Segundo o fabricante, o dispositivo dispõe de microprocessador Xtensa® de até dois núcleos, com frequência de *clock* de até 240 MHz, conversores analógico-digitais de 12 bits, 34 pinos programáveis de entrada e saída de propósito geral (GPIO), interfaces de comunicação serial SPI, I²C e UART e conectividade Wi-Fi e Bluetooth integradas (Espressif Systems, [2025?]).

O ambiente de desenvolvimento oficial do ESP32 (ESP-IDF) incorpora uma versão do sistema operacional de tempo real FreeRTOS adaptada para multiprocessamento simétrico em dois núcleos, que permite fixar cada tarefa a um núcleo específico (Espressif Systems, 2026). Essa característica viabiliza a separação de processos explorada neste trabalho: um núcleo executa a lógica de controle local, com a leitura de sensores e o acionamento das saídas, enquanto o outro processa os protocolos de rede. Soma-se a isso a possibilidade de atualização remota do *firmware* pela rede sem fio, que dispensa a intervenção física com cabos de programação.

No contexto da automação de sistemas AVAC, a adoção do ESP32 pode reduzir a necessidade de infraestrutura cabeada de comunicação, apontada como uma das desvantagens dos sistemas baseados em CLPs. A conectividade sem fio nativa facilita a integração com sistemas supervisórios e o envio de dados operacionais a painéis de monitoramento em nuvem por meio de protocolos de IoT, como o MQTT, protocolo de mensagens do tipo

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

publicação/assinatura padronizado pela OASIS (Banks; Gupta, 2014). Essas características, associadas ao custo inferior ao de um CLP, motivam a investigação do ESP32 como alternativa em aplicações de pequeno e médio porte.

1.5. Desafios técnicos

A substituição de um CLP por um microcontrolador como o ESP32 em sistemas AVAC industriais introduz desafios decorrentes das diferenças estruturais e de robustez entre as duas plataformas. Enquanto o CLP é projetado e ensaiado para suportar as condições do ambiente fabril, o uso de um SoC comercial exige o desenvolvimento de circuitos de interface e de condicionamento de sinal para preservar sua integridade física e sua funcionalidade.

O primeiro desafio é o acionamento de cargas indutivas, frequentes em sistemas AVAC. A corrente que cada pino de propósito geral do ESP32 pode fornecer é limitada a algumas dezenas de miliampères (Espressif Systems, [2025?]), valor insuficiente para excitar diretamente as bobinas de contatores industriais. Para contornar essa limitação, emprega-se um estágio de *driver* de potência baseado em circuito integrado, como o ULN2003, composto por sete pares de transistores Darlington, com corrente de coletor de até 500 mA por saída e diodos de supressão integrados para cargas indutivas (Texas Instruments, 2025). O componente atua como sorvedouro de corrente, o que permite que os sinais lógicos de baixa potência do microcontrolador comandem linhas de alimentação externas dedicadas aos relés.

O segundo desafio é a imunidade eletromagnética, somada à disparidade entre os níveis de tensão. O ESP32 opera com lógica de 3,3 V, ao passo que os circuitos de comando e de potência industriais empregam tensões de 24 Vcc, 220 Vca, 380 Vca ou 440 Vca; sem barreiras de proteção, o semicondutor estaria sujeito a danos por sobretensão. Além disso, a comutação de cargas indutivas gera transientes de tensão e interferências eletromagnéticas: em relés eletromecânicos, o centelhamento dos contatos e o colapso do campo das bobinas provocam ruídos nas linhas de dados e de alimentação, que podem levar ao travamento do programa ou a reinicializações involuntárias do processador.

Como solução, propõe-se a substituição dos relés eletromecânicos por Relés de Estado Sólido (*Solid State Relays* – SSR) com optoisolação, nos quais o sinal de comando é transmitido por luz infravermelha, o que estabelece isolamento galvânico entre o circuito de comando e o de potência e contribui para que surtos no setor de potência não retornem à unidade de processamento. A eficácia dessas medidas em condições reais depende, contudo, de ensaios de compatibilidade eletromagnética em protótipo físico, não realizados neste estudo.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

1.6. Sensores

Durante décadas, o padrão da indústria de climatização foi o uso de sensores analógicos separados para temperatura e umidade, cujos sinais, frequentemente tensões de 0 a 10 V ou correntes de 4 a 20 mA, exigiam cabos blindados e cartões de entrada analógica nos CLPs. Com o avanço da microeletrônica, a integração dos transdutores de temperatura e de umidade no mesmo substrato de silício, com circuitos de calibração e de conversão analógico-digital internos, deu origem aos sensores digitais integrados, que se comunicam diretamente com o processador por barramentos digitais. É o caso do SHT31, sensor calibrado em fábrica, com interface I²C e exatidão típica de ±2% de umidade relativa e de ±0,2 °C (Sensirion, 2022), selecionado para este projeto.

2. METODOLOGIA

Quanto à natureza, esta pesquisa classifica-se como aplicada, por buscar a solução de um problema concreto de projeto de painéis de automação AVAC. Quanto aos objetivos, é exploratória, pois investiga, em caráter preliminar, a viabilidade de uma arquitetura ainda não validada em campo. Quanto à abordagem, é quantitativa, uma vez que os resultados são expressos em valores de temperatura, tempo e custo. Quanto aos procedimentos, combina a pesquisa bibliográfica, a pesquisa experimental conduzida por simulação computacional, na qual as variáveis de entrada são manipuladas de forma controlada e os efeitos sobre as saídas são observados, e o levantamento de preços de componentes no mercado nacional.

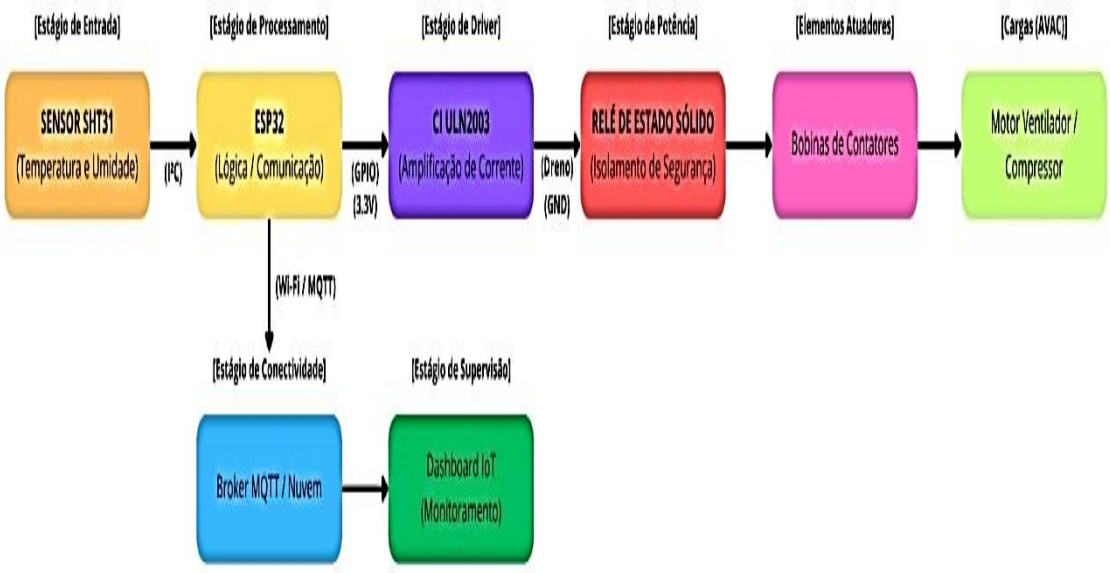
Cabe distinguir o alcance do método: os ensaios realizados constituem testes funcionais do *firmware* em ambiente de simulação, e não a validação técnica de um equipamento industrial. Aspectos como isolamento galvânico, compatibilidade eletromagnética, comportamento térmico e confiabilidade de longo prazo não são reproduzidos pelo simulador e, portanto, não são avaliados neste estudo. O desenvolvimento foi estruturado em três etapas: especificação do *hardware*, modelagem da lógica de controle e estruturação do ambiente de simulação com o protocolo de testes.

2.1. Arquitetura geral do sistema

Para a substituição do CLP em sistemas AVAC, projetou-se uma arquitetura baseada em um SoC, com foco na modularidade, no baixo custo e na preservação das funções de segurança do painel. O fluxo de informações e a interação entre os componentes são ilustrados no diagrama de blocos funcionais da Figura 2.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 2. Diagrama de blocos funcionais do sistema de automação baseado em ESP32



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Estágio de entrada: composto pelo sensor digital SHT31, responsável por medir a temperatura e a umidade relativa do ar. Diferentemente dos sensores analógicos, o SHT31 realiza a conversão analógico-digital internamente e transmite os dados ao processador pelo barramento serial I²C (*Inter-Integrated Circuit*), com apenas dois condutores (SDA e SCL).

Estágio de processamento: o ESP32 executa, em núcleos distintos, a máquina de estados do controle térmico e o gerenciamento da comunicação sem fio. O microcontrolador analisa os dados recebidos do sensor e determina quais atuadores devem ser acionados, com base nos parâmetros previamente definidos.

Estágio de *driver* e amplificação de corrente: como a corrente fornecida pelas portas digitais do ESP32 é insuficiente para acionar os relés diretamente, utiliza-se o circuito integrado ULN2003, que recebe o sinal de 3,3 V do microcontrolador e atua como sorvedouro de corrente, conectando o terminal negativo da entrada dos SSRs ao potencial de referência (GND).

Estágio de potência: para acionar os motores e as resistências do sistema AVAC, utilizam-se SSRs, nos quais o comando elétrico proveniente do ULN2003 é convertido internamente em sinal óptico, o que proporciona isolamento galvânico entre os circuitos de baixa e de alta tensão. Adicionalmente, a comutação na passagem da tensão por zero (*zero-cross*) reduz a geração de ruído eletromagnético e, por se tratar de dispositivo sem contatos móveis,

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

não há formação de arco elétrico na comutação, o que contribui para reduzir a ocorrência de falhas do microcontrolador por interferência. Ressalta-se que essas características não equivalem a certificação para uso em atmosferas potencialmente explosivas, a qual depende de ensaios e de normas específicas.

Estágio de conectividade e supervisão: por meio da interface de rádio integrada, o ESP32 conecta-se à rede Wi-Fi local da planta e publica o estado operacional e as medições ambientais em um servidor (*broker*) MQTT. Esses dados alimentam um painel de monitoramento remoto, sem a necessidade de cabeamento de rede estruturada.

2.2. Especificação dos materiais (*hardware*)

Os componentes foram especificados conforme as funções descritas na Seção 2.1. O ESP32 foi escolhido por sua capacidade de processamento e pela conectividade sem fio integrada; o SHT31, por sua exatidão, pela calibração de fábrica e pela interface I²C (Sensirion, 2022); e o ULN2003, pela necessidade de reduzir a solicitação elétrica das GPIOs, uma vez que comuta uma linha externa de 5 Vcc dedicada às entradas dos SSRs, com capacidade de até 500 mA por canal e diodos de supressão internos contra transientes indutivos (Texas Instruments, 2025). O Quadro 1 resume os componentes especificados.

Quadro 1. Especificação técnica dos componentes de *hardware*

Componente	Função no sistema	Características principais
Microcontrolador ESP32	Unidade central de processamento e conectividade	- Processador de 32 bits, com até dois núcleos e 240 MHz; - Conectividade Wi-Fi nativa (IoT); - Tensão de sinal lógico (GPIOs): 3,3 Vcc.
Sensor SHT31	Medição das variáveis ambientais (entrada)	- Leitura de temperatura e umidade; - Exatidão típica de ±2% UR e ±0,2 °C; - Protocolo de comunicação: I²C.
Circuito integrado ULN2003	Estágio de *driver* e compatibilização de corrente	- Matriz de 7 pares de transistores Darlington; - Operação como sorvedouro de corrente; - Corrente de acionamento (base): < 1 mA por GPIO; - Corrente máxima suportada: até 500 mA por canal; - Tensão de chaveamento: 5 Vcc; - Diodos de supressão internos.
Relé de estado sólido (SSR)	Interface de potência e atuação	- Acionamento das cargas do sistema AVAC; - Tensão de entrada (comando) fornecida via linha de 5 Vcc chaveada pelo ULN2003.

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

2.3. Arquitetura do *software* e lógica de controle

O *firmware* embarcado no ESP32 foi estruturado com base na separação de tarefas, isolando as rotinas de controle físico das rotinas de comunicação de rede, de modo que eventuais perdas de conexão Wi-Fi ou latências do servidor MQTT não interfiram no tempo de varredura nem na atuação dos relés. A lógica de controle foi dividida em três partes: aquisição de dados, regulação com histerese e intertravamento de segurança.

Na **aquisição de dados**, a leitura das variáveis ambientais é realizada periodicamente pelo barramento I²C junto ao sensor SHT31. Para atenuar leituras espúrias causadas por ruído, o *firmware* implementa um filtro digital de média móvel. Além disso, foi programada uma rotina de falha segura: caso o microcontrolador perca a comunicação com o sensor por um tempo predeterminado, o sistema assume um estado seguro, desligando compressores e resistências, e emite um alerta.

Na regulação com histerese, a malha de controle não comuta os atuadores diretamente no valor de referência (*setpoint*), mas em dois limites definidos em torno dele, o que evita o acionamento intermitente, que reduz a vida útil dos dispositivos.

O acionamento do estágio de resfriamento obedece às condições a seguir, em que T_{atual} é a temperatura lida, $T_{setpoint}$ é a temperatura de referência e ΔT é a banda de histerese configurada:

Se $T_{atual} \geq (T_{setpoint} + \Delta T) \rightarrow$ ativa o resfriamento

Se $T_{atual} \leq (T_{setpoint} - \Delta T) \rightarrow$ desativa o resfriamento

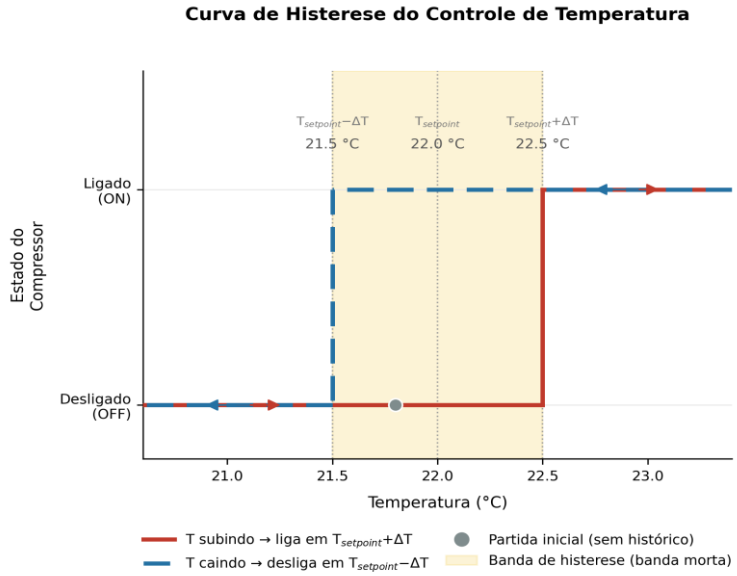
A mesma lógica é aplicada ao controle de umidade, atuando sobre os componentes de ventilação ou de desumidificação conforme os limites estabelecidos para o ambiente.

No intertravamento de segurança, consideram-se a inércia térmica e as restrições mecânicas dos equipamentos de AVAC. O *firmware* incorpora temporizadores de intertravamento, com lógica análoga à dos blocos de temporização dos CLPs: após o desligamento de um compressor, impõe-se um tempo mínimo de bloqueio (3 minutos, neste estudo) antes de nova partida, para a equalização das pressões do fluido refrigerante. Além disso, as saídas são acionadas de forma sequencial, com atraso de 500 ms entre elas, para evitar a sobreposição das correntes de partida.

A Figura 3 apresenta a curva de histerese adotada. Sem a banda de histerese, se a temperatura da sala elétrica oscilasse próximo à referência (por exemplo, entre 22,0 °C e 22,3 °C), o microcontrolador ligaria e desligaria os atuadores repetidas vezes em poucos segundos, comportamento conhecido como ciclo curto (*short-cycling*), prejudicial aos compressores.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 3. Curva de histerese do controle de temperatura



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Como mostra a Figura 3, o sistema de resfriamento permanece em repouso até que a temperatura atinja o limite superior ($T_{setpoint}$ + ΔT). Uma vez acionado, o compressor mantém-se energizado durante a descida da temperatura e é desligado apenas quando a variável atinge o limite inferior ($T_{setpoint}$ − ΔT).

O *firmware* foi codificado em linguagem C/C++, compilada para instruções nativas do processador, o que favorece tempos de varredura reduzidos e previsíveis. As tarefas foram distribuídas entre os dois núcleos do ESP32: o núcleo 0 gerencia as requisições de rede da pilha TCP/IP e do protocolo MQTT, e o núcleo 1 dedica-se à malha de controle de temperatura e umidade, buscando preservar a independência temporal da malha de controle em relação às tarefas de comunicação.

2.4. Ambiente de simulação e protocolo de testes

Para testar a hipótese sem os custos e os riscos de um protótipo físico, adotou-se a simulação do *firmware*, com a execução do código C/C++ real do ESP32 em ambiente virtual.

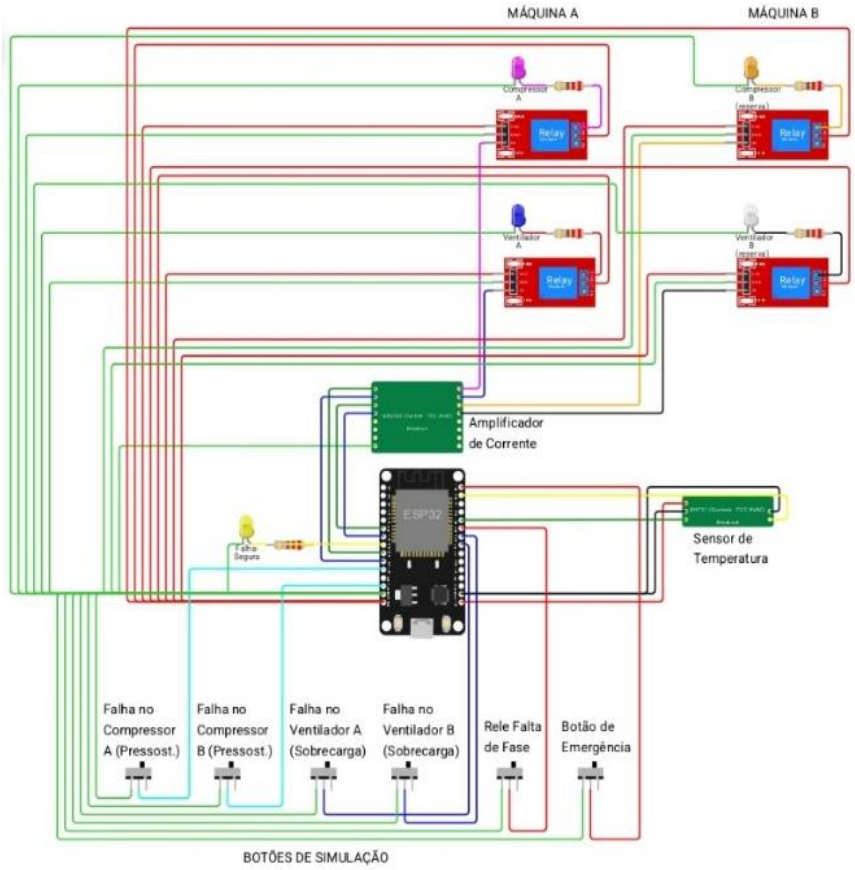
Utilizou-se a plataforma Wokwi, simulador *online* de sistemas embarcados com suporte ao ESP32, ao barramento I²C e à conectividade Wi-Fi (Wokwi, 2026). A escolha deveu-se a três fatores: (1) a gratuidade e a acessibilidade da plataforma; (2) o suporte ao barramento I²C e a componentes personalizados (*custom chips*), empregados para representar o sensor SHT31 e o

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

driver ULN2003; e (3) a possibilidade de controlar os valores simulados de temperatura e umidade ao longo do tempo, o que permite reproduzir os cenários de teste.

O circuito simulado, ilustrado na Figura 4, contém o ESP32, o sensor SHT31, o *driver* ULN2003, módulos de relé que representam o acionamento das cargas, indicadores de estado (LEDs) em cada saída, um conjunto reserva completo (compressor e ventilador) e as entradas de proteção contra falta de fase (RIFF) e de botão de emergência. Destaca-se uma limitação metodológica relevante: como o Wokwi não dispõe de modelos de SSR nem de optoacopladores, o estágio de potência foi representado por módulos de relé genéricos; logo, o isolamento galvânico dos SSRs e dos módulos optoacopladores PC817 e a imunidade a transientes não foram eletricamente verificados. O monitor serial da plataforma foi utilizado para registrar, com marcação de tempo, as transições de estado e os instantes de acionamento dos atuadores.

Figura 4. Esquemático da simulação funcional no Wokwi



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

O protocolo de testes compreende oito cenários (C1 a C8), definidos para verificar cada função da lógica de controle descrita na Seção 2.3, cada qual com um critério de aprovação estabelecido previamente:

C1 – Regime permanente: variação gradual da temperatura através dos limites da banda de histerese ($T_{setpoint} \pm \Delta T$); critério: acionamento do resfriamento no limite superior e desligamento no limite inferior, conforme a Figura 3.

C2 – Intertravamento: tentativa de nova partida do compressor durante o tempo de bloqueio; critério: recusa da partida durante 180.000 ms e religamento automático ao término do bloqueio.

C3 – Ciclo curto: oscilações rápidas e de pequena amplitude da temperatura em torno da referência; critério: ausência de comutação do compressor enquanto a variável permanecer dentro da banda de histerese.

C4 – Falha do sensor (falha segura): interrupção da comunicação I²C com o sensor; critério: ativação da rotina de falha segura após 10 s sem leitura, com desligamento dos atuadores e sinalização de alarme.

C5 – Partida sequencial: demanda simultânea de resfriamento e de ventilação; critério: defasagem mínima de 500 ms entre os acionamentos, verificada pelos tempos registrados no monitor serial.

C6 – Resiliência de rede: desativação da conectividade Wi-Fi durante a execução; critério: manutenção da operação da malha de controle independentemente do estado da conexão.

C7 – Redundância de equipamentos: indução de falha em um atuador do conjunto em operação e, em seguida, nos dois conjuntos; critério: comutação integral para o conjunto reserva, alerta quando não houver conjunto disponível e reintegração automática após a remoção das falhas.

C8 – Paradas incondicionais: acionamento das entradas de falta de fase (RIFF) e de emergência; critério: desligamento do conjunto ativo, sem comutação para a reserva, e sinalização de alarme geral.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados dos oito cenários de teste definidos na Seção 2.4, executados na plataforma Wokwi com o circuito simulado descrito anteriormente. Cada item discute os dados registrados frente aos critérios de aprovação estabelecidos.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

3.1. Apresentação dos resultados

C1 – Regime permanente e banda de histerese: a temperatura simulada foi elevada gradualmente até ultrapassar o limite superior da banda de histerese ($T_{setpoint}$ + ΔT = 22,5 °C), o que ativou o compressor, e em seguida reduzida até o limite inferior ($T_{setpoint}$ − ΔT = 21,5 °C). O *firmware* registrou o desligamento no instante em que a variável atingiu esse limite, conforme o registro Compressor OFF (T=21.50ºC). O resultado indica que a lógica de estados executada no núcleo 1 reproduz a curva de histerese teórica.

C2 – Intertravamento de segurança: logo após o desligamento do compressor, o intertravamento foi acionado, com bloqueio de 180.000 ms (3 minutos), como mostra o registro Compressor OFF (T=21.50ºC) - bloqueado por 180000ms. Durante esse período, realizou-se nova tentativa de partida, com a elevação da temperatura para 22,60 °C; o sistema recusou o acionamento e registrou Partida do compressor bloqueada (intertravamento até 286872ms). Ao fim do bloqueio, o compressor religou automaticamente (Compressor ON (T=22.60ºC)), o que mostra que o intertravamento opera como atraso temporário, e não como trava permanente, em atendimento ao requisito de proteção contra partidas sucessivas.

C3 – Ciclo curto: para reproduzir uma condição de instabilidade térmica, a temperatura foi variada rapidamente entre 22,00 °C e 22,40 °C, valores próximos à referência (22,0 °C) que não cruzam os limites da banda de histerese. Cinco leituras consecutivas publicadas via MQTT (22,16 °C, 22,00 °C, 22,40 °C, 22,30 °C e 22,00 °C) não alteraram o estado do compressor, que permaneceu ligado. O resultado indica que a banda de histerese absorve esse tipo de oscilação e previne o acionamento intermitente que ocorreria em um controlador sem histerese.

C4 – Falha do sensor e rotina de falha segura: a perda de comunicação com o sensor foi simulada pela desconexão da linha SDA antes do início da execução. Como o SHT31 não respondeu, os campos de temperatura e de umidade das mensagens MQTT permaneceram sem valores de leitura durante toda a simulação. Decorrido o tempo limite configurado, de 10 s, a rotina de falha segura foi ativada: os conjuntos foram desligados, o LED local de alarme foi aceso e registrou-se [FAIL-SAFE] Perda de comunicação com o SHT31 - atuadores desligados.

C5 – Partida sequencial dos atuadores: a temperatura e a umidade foram ajustadas para valores acima das respectivas referências (23,00 °C e 65,00%) antes da primeira leitura do sensor, para que ambas as condições fossem avaliadas no mesmo ciclo de varredura. Os registros indicaram Compressor ON (T=23.00ºC) no instante t = 1.627 ms e Ventilador ON (UR=65.00%) em t = 2.128 ms, um intervalo de 501 ms, compatível com a constante de 500 ms programada. Confirma-se, assim, a aplicação do atraso sequencial entre os acionamentos.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

C6 – Resiliência de rede: avaliou-se a independência entre a malha de controle (núcleo 1) e o estágio de conectividade (núcleo 0). Com o Wi-Fi desativado, o que impediu a conexão do ESP32 à rede, a malha de controle continuou a operar normalmente. Trata-se de verificação funcional qualitativa: o tempo de varredura não foi medido comparativamente nas condições com e sem conectividade.

C7 – Redundância de equipamentos: para aproximar a simulação de sistemas reais, incorporou-se um conjunto reserva completo, de compressor e ventilador, em regime de redundância, conforme a Figura 4.

Com o Conjunto A em operação, induziu-se uma falha isolada no ventilador. O monitor serial registrou Falha detectada no Conjunto A (compressor ou ventilador), seguido de Comutando do Conjunto A para o Conjunto B por falha e de Conjunto B assume (lead). Mesmo com a falha restrita ao ventilador, o compressor do Conjunto A também foi desligado e o conjunto reserva assumiu por completo, sem combinação de atuadores de conjuntos distintos, como em um equipamento real, cujo compressor e ventilador compartilham o mesmo circuito de refrigeração. O teste foi repetido de forma simétrica, com falha isolada no compressor do Conjunto B em operação, e o mesmo padrão de registros foi obtido.

Em seguida, avaliou-se a indisponibilidade dos dois conjuntos: com as quatro entradas de falha ativas (compressor e ventilador dos Conjuntos A e B), o monitor serial passou a repetir ALERTA: nenhum conjunto disponivel para atender a demanda, com o LED de alarme geral aceso. Ao serem desativadas as quatro entradas de falha, os conjuntos foram reintegrados automaticamente, sem intervenção manual.

C8 – Paradas incondicionais: avaliaram-se as duas condições que interrompem a alimentação de todas as unidades e não admitem comutação para a reserva. Tanto o acionamento da entrada de falta de fase (RIFF) quanto o do botão de emergência desligaram o compressor e o ventilador do conjunto ativo e ativaram o LED de alarme geral, diferindo apenas na mensagem registrada, o que indica que o *firmware* distingue a condição ativa. Em ambos os casos, não houve migração para o conjunto reserva, comportamento coerente com o fato de essas condições afetarem a alimentação elétrica do painel como um todo.

3.2. Síntese dos resultados

O Quadro 2 consolida os oito cenários, com a variável manipulada, o critério de aprovação, o resultado observado e a situação final de cada um.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Quadro 2. Síntese dos cenários de teste funcional do *firmware*

Cenário	Variável manipulada	Critério de aprovação	Resultado observado	Situação
C1 – Regime permanente	Temperatura elevada acima de 22,5 °C e reduzida até 21,5 °C	Acionamento no limite superior e desligamento no limite inferior da banda	Compressor ligado acima de 22,5 °C e desligado em 21,50 °C	Atendido
C2 – Intertravamento	Nova demanda (22,60 °C) durante o bloqueio	Partida recusada por 180.000 ms e religamento automático ao final	Partida bloqueada e religamento ao término do bloqueio	Atendido
C3 – Ciclo curto	Oscilação entre 22,00 °C e 22,40 °C	Nenhuma comutação dentro da banda de histerese	Cinco leituras sem alteração do estado do compressor	Atendido
C4 – Falha do sensor	Linha SDA desconectada	Falha segura após 10 s sem leitura	Atuadores desligados, alarme e registro de falha segura	Atendido
C5 – Partida sequencial	Demanda simultânea (23,00 °C e 65,00%)	Defasagem mínima de 500 ms entre os acionamentos	Acionamentos em 1.627 ms e 2.128 ms (501 ms)	Atendido
C6 – Resiliência de rede	Wi-Fi desativado	Malha de controle mantida sem conexão	Controle mantido em operação	Atendido
C7 – Redundância	Falha em atuador do conjunto ativo e falha nos dois conjuntos	Comutação integral para a reserva, alerta sem conjunto disponível e reintegração automática	Comutação por conjunto completo, alerta e reintegração automática	Atendido
C8 – Paradas incondicionais	Entradas de falta de fase (RIFF) e de emergência	Desligamento sem comutação para a reserva e alarme geral	Conjunto ativo desligado e alarme geral nas duas condições	Atendido

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Todos os cenários apresentaram comportamento compatível com os critérios definidos para a simulação. Esses resultados constituem evidências preliminares, obtidas em ambiente virtual, de que a arquitetura baseada no ESP32 é capaz de executar as funções de controle, intertravamento, falha segura e redundância normalmente implementadas em um CLP em sistemas AVAC de pequeno e médio porte. Eles não demonstram, contudo, equivalência de confiabilidade, de segurança ou de robustez industrial entre as duas plataformas.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

3.3. Limitações e requisitos para aplicação industrial

A adoção da arquitetura proposta em ambiente industrial depende de requisitos que a simulação não contempla. Um CLP comercial é projetado e ensaiado segundo a norma IEC 61131-2, que estabelece requisitos de equipamento e ensaios, inclusive de compatibilidade eletromagnética e de condições ambientais (International Electrotechnical Commission, 2017), ao passo que uma montagem com módulos eletrônicos de uso geral exigiria ensaios equivalentes de emissão e de imunidade eletromagnética, além de ensaios térmicos e ambientais. Quando o controlador participa de funções de segurança, aplica-se ainda a abordagem de segurança funcional da norma IEC 61508 (International Electrotechnical Commission, 2010), que requer a análise dos modos de falha e a estimativa de indicadores de confiabilidade, como o tempo médio entre falhas (MTBF), não realizadas neste estudo.

No plano do *firmware* e da comunicação, permanecem como requisitos a supervisão por temporizador cão de guarda (*watchdog*) independente, a detecção de subtensão de alimentação (*brownout*), o comportamento do sistema após a corrupção ou a atualização remota do *firmware* e a segurança cibernética da comunicação Wi-Fi/MQTT, incluindo autenticação e criptografia, bem como a disponibilidade e a recuperação da rede. Como etapa intermediária entre a simulação e a instalação em campo, recomenda-se a validação do tipo *Hardware-in-the-Loop* (HIL), na qual o controlador físico é ensaiado contra um modelo simulado da planta, seguida de ensaios em protótipo de bancada.

3.4. Viabilidade econômica

A dimensão econômica foi avaliada por meio de um levantamento comparativo do custo de aquisição entre um CLP comercial de referência e o conjunto de componentes necessário para reproduzir, com o ESP32, uma capacidade equivalente de entradas e saídas digitais.

Como referência para o controlador convencional, adotou-se o modelo Siemens LOGO! 24CE (código de referência 6ED1052-1CC08-0BA2), com alimentação de 24 Vcc, 8 entradas digitais e 4 saídas digitais a transistor, configuração de entradas e saídas (E/S) equivalente à empregada na simulação. O levantamento identificou uma faixa de preços de R$ 625,99 a R$ 755,99 para o modelo especificado, conforme o Quadro 3. Adota-se o primeiro valor como referência principal do comparativo, por corresponder ao código de referência do fabricante.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Quadro 3. Especificação e preço de referência do CLP (Siemens LOGO! 24CE)

Item	Valor
Modelo / código de referência	Siemens LOGO! 24CE – 6ED1052-1CC08-0BA2
Alimentação	24 Vcc
Entradas digitais	8
Saídas digitais (a transistor)	4 (0,3 A por canal)
Faixa de preço identificada no mercado nacional	R$ 625,99 – R$ 755,99
Preço de referência adotado (à vista, Pix)	R$ 625,99

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Para compor uma arquitetura baseada em ESP32 com capacidade de E/S equivalente à do CLP de referência, foram considerados: o módulo ESP32 DevKit V1; o sensor SHT31, que consolida as leituras de temperatura e de umidade em um único barramento I²C, conectado a dois pinos GPIO; o *driver* ULN2003, responsável pela ampliação de corrente; quatro módulos de relé de estado sólido (SSR) de 25 A; dois módulos optoacopladores de 4 canais (PC817), destinados a isolar eletricamente as entradas digitais de 24 Vcc do nível lógico de 3,3 V do ESP32; e um conversor CC/CC abaixador, para alimentar o ESP32 a partir do barramento de 24 Vcc do painel. O Quadro 4 detalha os itens e os valores considerados.

Quadro 4. Custo de aquisição dos componentes da arquitetura baseada em ESP32

Componente	Função	Qtd.	Valor unit.	Valor total
ESP32 DevKit V1 (30 pinos)	Unidade central de processamento e conectividade	1	R$ 89,90	R$ 89,90
Sensor SHT31 (I²C)	Leitura de temperatura e umidade	1	R$ 44,91	R$ 44,91
Módulo *driver* ULN2003	Estágio sorvedouro de corrente para acionamento	1	R$ 11,89	R$ 11,89
Módulo relé de estado sólido SSR 25 A	Estágio de potência das saídas digitais	4	R$ 44,15	R$ 176,60
Módulo optoacoplador PC817 (4 canais)	Isolamento das entradas digitais 24 Vcc → 3,3 V	2	R$ 32,15	R$ 64,30
Conversor CC/CC abaixador 24 V → 5 V	Alimentação do ESP32 a partir do painel	1	R$ 17,91	R$ 17,91
Total				**R$ 405,51**

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A comparação entre os dois levantamentos indica uma redução estimada do custo de aquisição dos componentes considerados entre R$ 220,48 e R$ 350,48, conforme o preço de mercado do CLP tomado como referência, o que equivale a aproximadamente 35% a 46% do valor do controlador convencional.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Esse comparativo considera apenas o custo de aquisição dos componentes eletrônicos e não contempla itens como gabinete, trilho DIN, bornes e cabeamento do painel, nem o custo de desenvolvimento do programa de controle. No CLP, esse desenvolvimento corresponde à programação em linguagem Ladder ou em diagrama de blocos funcionais (FBD), no ambiente do fabricante; no ESP32, o desenvolvimento exige conhecimento de programação embarcada em C/C++ e FreeRTOS. O tempo de engenharia necessário ao desenvolvimento, à validação e à manutenção do *firmware* constitui um custo indireto não refletido no levantamento.

Deve-se observar, ainda, que a comparação envolve um produto industrial comercial e uma composição de módulos eletrônicos, que diferem em aspectos não quantificados neste levantamento: certificação e conformidade normativa, esforço de montagem e de integração, vida útil, suporte técnico e garantia do fabricante, disponibilidade de reposição, proteção contra as condições ambientais e manutenção. Uma conclusão ampla sobre a viabilidade econômica requer, portanto, a análise do custo total de propriedade, que inclua esses fatores ao longo do ciclo de vida do painel.

Ainda assim, uma redução de 35% a 46% no custo de aquisição do *hardware* indica, em conjunto com os resultados dos testes funcionais, potencial vantagem econômica da arquitetura proposta em aplicações de pequeno e médio porte, especialmente em cenários com restrição orçamentária.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho investigou a hipótese de que a substituição de CLPs por microcontroladores de arquitetura de 32 bits, no caso o ESP32, pode apresentar viabilidade técnica e econômica na automação de sistemas AVAC industriais de pequeno e médio porte, desde que aplicados circuitos de isolamento e de proteção contra transientes e ruídos eletromagnéticos.

Na dimensão técnica, os oito cenários de teste funcional apresentaram comportamento compatível com os critérios definidos para a simulação. A separação entre a malha de controle (núcleo 1) e as tarefas de rede (núcleo 0) permitiu que a indisponibilidade da conectividade Wi-Fi/MQTT não interrompesse o controle do processo no cenário simulado.

Na dimensão econômica, o levantamento indicou redução estimada de 35% a 46% no custo de aquisição dos componentes considerados, em relação ao CLP de referência (Siemens LOGO! 24CE). Como o CLP responde por cerca de 8,24% do valor total de um painel de automação AVAC, conforme apresentado na Introdução, uma redução de 35% nesse item

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

representa, mantidas constantes as demais parcelas, um ganho da ordem de 2,9% sobre o custo total do painel. Essa estimativa não contempla os custos de engenharia, de certificação e de manutenção discutidos anteriormente.

Os resultados devem ser interpretados dentro das limitações do estudo. Os testes foram conduzidos integralmente em ambiente de simulação, sem a montagem de protótipo físico; o estágio de potência foi representado por módulos de relé genéricos, de modo que o isolamento galvânico, a compatibilidade eletromagnética e o comportamento térmico não foram verificados; e o levantamento de custos restringe-se ao valor de aquisição dos componentes. Assim, a simulação sustenta a viabilidade funcional preliminar da arquitetura nas condições modeladas, mas não demonstra sua robustez industrial em condições reais.

Em síntese, os resultados fornecem evidências preliminares de viabilidade funcional e de potencial vantagem econômica, no cenário simulado, da substituição de CLPs por microcontroladores ESP32 em sistemas AVAC de pequeno e médio porte. Como trabalhos futuros, propõem-se a validação real do hardware, a montagem de protótipo físico com ensaios de compatibilidade eletromagnética, térmicos e de confiabilidade, a avaliação da segurança cibernética da comunicação e a análise do custo total de propriedade.

REFERÊNCIAS

BANKS, Andrew; GUPTA, Rahul (ed.). **MQTT version 3.1.1**: OASIS standard. [*S. l.*]: OASIS, 2014. Disponível em: http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/os/mqtt-v3.1.1-os.html. Acesso em: 1 out. 2026.

ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32 series datasheet**: version 5.3. Shanghai: Espressif Systems, [2025?]. Disponível em: https://documentation.espressif.com/esp32_datasheet_en.pdf. Acesso em: 1 out. 2026.

ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP-IDF programming guide**: FreeRTOS (IDF). Shanghai: Espressif Systems, [2026]. Disponível em: https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32/api-reference/system/freertos_idf.html. Acesso em: 3 out. 2026.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61508-1**: functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems: part 1: general requirements. 2. ed. Geneva: IEC, 2010.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61131-2**: industrial-process measurement and control: programmable controllers: part 2: equipment requirements and tests. 4. ed. Geneva: IEC, 2017.

ISLAM, Fabliha Bushra; NWAKANMA, Cosmas Ifeanyi; KIM, Dong-Seong; LEE, Jae-Min. IoT-based HVAC monitoring system for smart factory. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGY CONVERGENCE (ICTC), 2020, Jeju Island. **Anais** [...]. Jeju Island: IEEE, 2020. p. 701-704.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

LUGLI, Alexandre Baratella; SANTOS, Max Mauro Dias. **Redes industriais**: características, padrões e aplicações. São Paulo: Érica, 2014.

MCQUISTON, Faye C.; PARKER, Jerald D.; SPITLER, Jeffrey D. **Heating, ventilating, and air conditioning**: analysis and design. 6. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.

MONTEBELLER, Sidney José. **Estudo sobre o emprego de dispositivos sem fios – wireless na automação do ar condicionado e de outros sistemas prediais**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PETRUZELLA, Frank D. **Controladores lógicos programáveis**. 4. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

SENSIRION. **Datasheet SHT3x-DIS**: humidity and temperature sensor. Version 7. Stäfa: Sensirion, 2022. Disponível em: https://sensirion.com/media/documents/213E6A3B/63A5A569/Datasheet_SHT3x_DIS.pdf. Acesso em: 5 out. 2026.

TEXAS INSTRUMENTS. **ULN200x, ULQ200x high-voltage, high-current Darlington transistor arrays**: SLRS027T. Dallas: Texas Instruments, 2025. Disponível em: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/uln2003a.pdf. Acesso em: 1 out. 2026.

WOKWI. **Wokwi docs**: ESP32 simulation. [*S. l.*]: Wokwi, [2026]. Disponível em: https://docs.wokwi.com/guides/esp32. Acesso em: 5 out. 2026.

ZANCAN, Marcos Daniel. **Controladores programáveis**. 3. ed. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2011.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.