DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO FUNCIONAL E ELÉTRICA DE SISTEMA IoT PARA CONTROLE DE ILUMINAÇÃO COM ESP32

Bruno Alexandre Holanda de Lima Silva, *Hélio Lourenço Esperidião Ferreira*

Universidade do Vale do Paraíba/Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova - 12244-000 - São José dos Campos-SP, Brasil, bru.alex1811@gmail.com, helio@univap.br

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a avaliação funcional e elétrica de um sistema IoT para controle de iluminação em rede Wi-Fi, utilizando ESP32, módulo relé de 5 V e interface web. O ESP32 foi configurado como servidor HTTP embarcado, com *firmware* desenvolvido em C no PlatformIO com *framework* ESP-IDF. A avaliação envolveu cinco procedimentos, incluindo resposta do LED indicador do relé aos comandos, medições de tensão, comutação dos contatos do relé e acionamento de uma carga externa. Inicialmente, a ligação direta entre o GPIO do ESP32 e o relé não resultou em acionamento adequado. Para corrigir essa limitação, foi implementado um estágio de adaptação elétrica com transistor NPN BC548B, resistor de base e resistor *pull-up* de 10 kΩ. Após a adaptação, foram medidos 0 V no estado desligado e 5 V no estado acionado, verificou-se a comutação dos contatos do relé e a luminária respondeu corretamente aos dois comandos avaliados. Os resultados indicaram que a configuração final do protótipo atendeu aos requisitos funcionais definidos para o sistema.
Palavras-chave: Internet das Coisas. ESP32. Automação residencial.

Área do Conhecimento: Engenharias - Engenharia da Computação.

Introdução

A Internet das Coisas (*Internet of Things* – IoT) caracteriza-se pela integração entre dispositivos físicos, sistemas computacionais e tecnologias de comunicação, permitindo que objetos conectados realizem processos de aquisição de dados, comunicação e atuação sobre o ambiente. Essa integração tem possibilitado o desenvolvimento de aplicações em diferentes áreas, incluindo a automação residencial, na qual sensores, atuadores e sistemas embarcados podem ser empregados para monitorar e controlar equipamentos elétricos por meio de redes de comunicação (Atzori; Iera; Morabito, 2010).

No contexto residencial, diferentes arquiteturas têm sido propostas para o controle de equipamentos por meio de tecnologias IoT. Kumar e Chaudhury (2022), por exemplo, desenvolveram um sistema de automação residencial utilizando comunicação Wi-Fi, módulos de relé, ESP8266, Raspberry Pi e a plataforma Blynk. Em outra abordagem, Esposito et al. (2023) propuseram uma arquitetura baseada em MQTT, comunicação NB-IoT e funções *serverless* em nuvem, considerando aspectos de desempenho da comunicação, como latência e perda de pacotes. Esses trabalhos evidenciam a diversidade de soluções disponíveis para automação residencial, que podem envolver diferentes protocolos, plataformas externas, serviços em nuvem e componentes de processamento.

Embora essas arquiteturas ampliem as possibilidades de comunicação e controle, sua implementação pode exigir serviços externos ou componentes adicionais. Para aplicações de menor complexidade, uma alternativa consiste na utilização de arquiteturas locais, nas quais o próprio microcontrolador concentra as funções de processamento, comunicação e disponibilização da interface ao usuário. Além dos aspectos de comunicação, a integração entre o microcontrolador e os elementos de acionamento deve considerar a compatibilidade entre seus níveis elétricos. Villegas et al. (2025), ao desenvolverem uma solução de automação envolvendo ESP32, PLC e relés, empregaram circuitos de interface para adequar diferentes níveis de tensão, evidenciando a importância da integração entre os subsistemas de controle e acionamento.

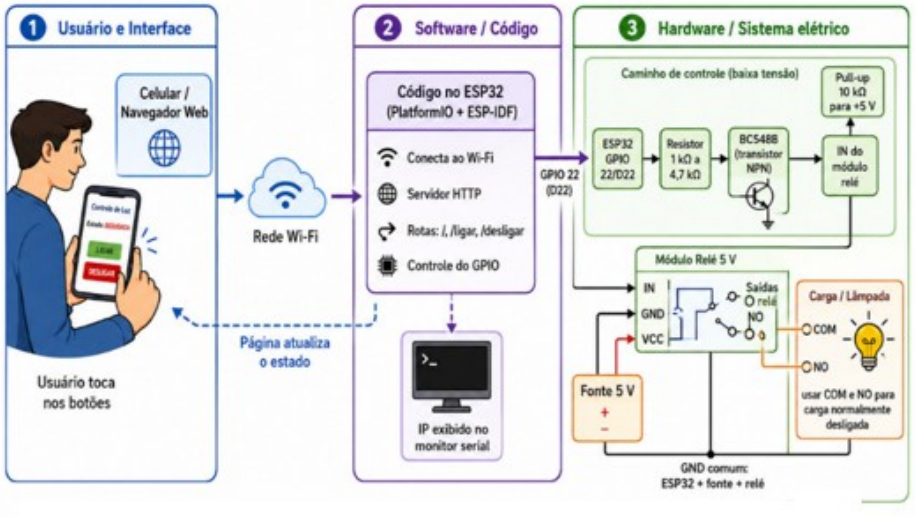
Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo desenvolver e avaliar funcional e eletricamente uma arquitetura IoT local para controle de iluminação em rede Wi-Fi, utilizando o ESP32 como unidade

de processamento, comunicação e servidor HTTP embarcado, dispensando a utilização de servidor externo durante a operação em rede local. A arquitetura incorpora um estágio de adaptação elétrica baseado em transistor NPN BC548B para realizar a interface entre a lógica de 3,3 V do ESP32 e o módulo relé alimentado em 5 V. A avaliação funcional considera o estabelecimento da conexão Wi-Fi, o acesso à interface web por dispositivos conectados à rede local, o processamento dos comandos de acionamento e desligamento e o funcionamento do circuito responsável pelo controle da carga.

Metodologia

O trabalho foi desenvolvido a partir da implementação de uma arquitetura IoT destinada ao controle local de uma carga elétrica por meio de rede Wi-Fi. A arquitetura foi organizada em quatro camadas funcionais: usuário, comunicação, processamento e acionamento físico. A camada de usuário é composta por um celular ou computador equipado com navegador web; a camada de comunicação utiliza a rede Wi-Fi e o protocolo HTTP; a camada de processamento é constituída pelo ESP32, responsável pela execução do *firmware*, hospedagem da interface web e controle do GPIO; e a camada física compreende o circuito de adaptação elétrica, o módulo relé de 5 V e a carga controlada. A Figura 1 apresenta a integração entre essas camadas e o fluxo dos comandos desde a interface web até o circuito de acionamento da carga.

Figura 1 – Integração entre interface web, firmware do ESP32 e circuito de acionamento.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os principais elementos empregados na implementação são apresentados na Tabela 1. O ESP32 foi utilizado como unidade de processamento e comunicação, enquanto o módulo relé foi empregado como elemento de chaveamento da carga. A interação com o sistema foi realizada por meio de uma página HTML hospedada no próprio microcontrolador, dispensando a utilização de servidor externo durante a operação em rede local.

Tabela 1 – Principais componentes e características do sistema desenvolvido.

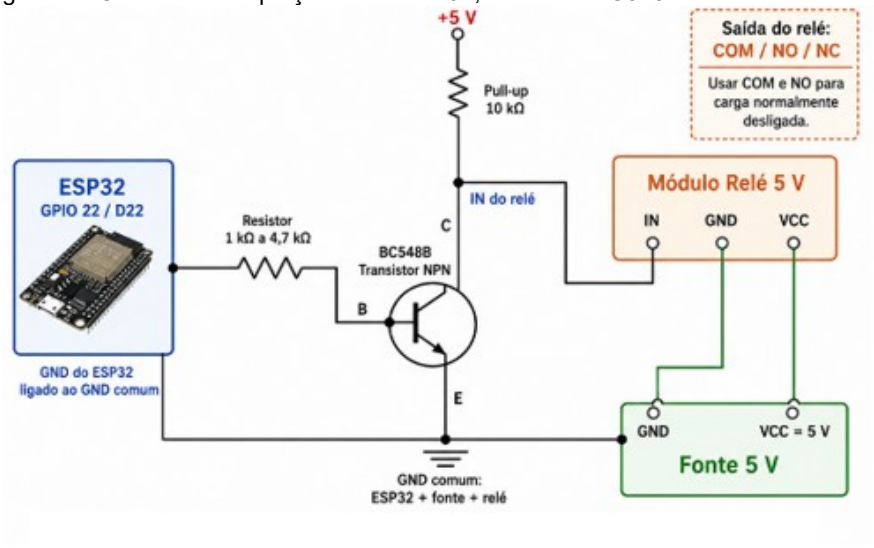
Item	Descrição
Microcontrolador	ESP32, programado em C usando *PlatformIO* com *framework* ESP-IDF.
Atuador	Módulo relé de 5 V para chaveamento de uma carga externa.
Interface	Página HTML servida pelo próprio ESP32 e acessada pelo navegador.
Comunicação	Wi-Fi e requisições HTTP locais.
Circuito de adaptação	Transistor NPN BC548B, resistor de base e resistor *pull-up* de 10 kΩ.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O firmware foi desenvolvido em C, utilizando o framework ESP-IDF no ambiente PlatformIO, integrado ao Visual Studio Code. O ESP32 foi configurado como servidor HTTP embarcado, com três rotas principais: “/”, para disponibilização da interface web; “/ligar”, para acionamento da carga; e “/desligar”, para seu desligamento. Os comandos enviados pelo navegador são processados pelo ESP32, que altera o estado lógico do GPIO 22. A operação descrita foi realizada na rede Wi-Fi local, sem utilização de servidor externo.

Foram utilizadas duas configurações de acionamento: ligação direta entre o GPIO do ESP32 e a entrada do módulo relé de 5 V e ligação com estágio de adaptação elétrica, implementado com transistor NPN BC548B, resistor de base e resistor *pull-up* de 10 kΩ. Na segunda configuração, o GPIO 22 foi conectado à base do transistor por meio do resistor, mantendo-se o GND comum entre ESP32, fonte de alimentação e módulo relé. A Figura 2 apresenta o circuito de adaptação implementado.

Figura 2 – Circuito de adaptação entre ESP32, transistor BC548B e módulo relé de 5 V.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A avaliação foi realizada por meio de cinco procedimentos sequenciais de verificação funcional e elétrica. Inicialmente, avaliou-se a resposta do LED indicador de estado do módulo relé aos comandos de ligar e desligar enviados pela interface. Em seguida, mediu-se a tensão do sinal de controle no GPIO D22 do ESP32 antes da inclusão do estágio de adaptação. Após a instalação do circuito com transistor NPN BC548B, foram realizadas medições de tensão entre o terminal negativo da fonte e a saída do transistor nos estados desligado e acionado. Posteriormente, verificou-se com multímetro a comutação dos contatos do relé. Por fim, o funcionamento integrado foi avaliado utilizando uma luminária como carga externa, conectada aos contatos de comutação do relé e alimentada pela rede elétrica de 220 V. Os procedimentos adotados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Procedimentos de avaliação funcional e elétrica.

Teste	Parâmetro avaliado	Critério de verificação
1	Resposta do LED do módulo relé	Observação do indicador durante os comandos ligar/desligar.
2	Tensão antes da adaptação	Medição entre GND e GPIO 22 nos dois estados de comando.
3	Tensão após a adaptação	Medição entre o negativo da fonte e a saída do transistor nos dois estados de operação.
4	Comutação dos contatos do relé	Teste de continuidade com multímetro nos contatos avaliados.
5	Acionamento da carga	Verificação da correspondência entre comando e estado da luminária.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os parâmetros considerados na avaliação foram a resposta funcional do relé, a continuidade dos contatos, a tensão elétrica medida em volts e a correspondência entre o comando enviado pela interface e o estado físico da carga. Os cinco procedimentos constituíram etapas distintas de diagnóstico e validação do protótipo, e não repetições independentes de um mesmo ensaio. Dessa forma, os resultados não foram utilizados para estimar estatisticamente a confiabilidade ou a taxa de falhas do sistema.

Resultados

O ESP32 estabeleceu conexão com a rede Wi-Fi e disponibilizou seu endereço IP, permitindo o acesso à interface web por celular e computador conectados à mesma rede local. Os comandos de ligar e desligar foram recebidos pelo servidor HTTP embarcado e processados pelo ESP32.

Na configuração inicial, embora a interface web apresentasse alteração de estado em resposta aos comandos, o LED indicador do módulo relé não alterava seu estado. A medição no GPIO 22 indicou variação do sinal de controle, porém sem acionamento adequado do relé. Adicionalmente, a verificação de continuidade não indicou alteração no estado dos contatos. Essas observações motivaram a inclusão do estágio de adaptação elétrica com transistor NPN BC548B.

Após a implementação do estágio de adaptação, foram registrados 0 V no estado correspondente à carga desligada e 5 V no estado acionado, considerando o terminal negativo da fonte como referência. Uma nova verificação de continuidade indicou alteração do estado dos contatos do relé em resposta aos comandos.

Na avaliação final, a luminária permaneceu apagada após o comando de desligamento e acendeu após o comando de acionamento. Os resultados dos cinco procedimentos são sintetizados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados dos procedimentos de avaliação funcional e elétrica.

Teste	Parâmetro avaliado	Resultado observado	Atendimento ao critério
1	Resposta do LED indicador do relé	A interface alterou o estado, mas o LED não comutou.	Não atendido
2	Tensão no GPIO 22 antes da adaptação	O sinal apresentou variação, mas o relé não comutou.	Não atendido
3	Tensão após a adaptação	Foram medidos 0 V no estado desligado e 5 V no acionado.	Atendido
4	Comutação dos contatos do relé	Houve alteração de continuidade dos contatos em resposta aos comandos.	Atendido
5	Acionamento da carga	A luminária permaneceu apagada no comando desligado e acendeu no comando ligado.	Atendido

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Dos cinco procedimentos realizados, os dois primeiros identificaram limitações na configuração inicial, enquanto os três posteriores à inclusão do estágio de adaptação atenderam aos respectivos critérios de verificação. Os cinco procedimentos constituíram etapas distintas de diagnóstico e validação do protótipo, e não repetições independentes de um mesmo ensaio.

Discussão

Os resultados indicam que a arquitetura implementada integrou comunicação Wi-Fi, servidor HTTP embarcado, interface web e circuito de acionamento em uma aplicação baseada no ESP32. Em comparação com soluções que utilizam plataformas externas ou infraestrutura adicional, como as

apresentadas por Kumar e Chaudhury (2022) e Esposito et al. (2023), as funções de comunicação, processamento e disponibilização da interface foram concentradas no próprio microcontrolador. Na configuração avaliada, essa abordagem possibilitou a operação em rede local sem utilização de servidor externo.

A principal limitação identificada esteve relacionada à interface elétrica entre o ESP32 e o módulo relé, uma vez que a variação do sinal de controle na configuração inicial não resultou no acionamento adequado do atuador. A inclusão do estágio com transistor BC548B possibilitou a obtenção de estados elétricos distintos, a comutação dos contatos e o acionamento da carga. A utilização de circuitos de interface entre unidades de controle e elementos de acionamento também é observada por Villegas et al. (2025), evidenciando a importância da compatibilidade elétrica entre os subsistemas de sistemas embarcados.

Embora tenham sido realizados cinco procedimentos de avaliação, eles representaram etapas distintas de diagnóstico e validação, e não repetições independentes de um mesmo experimento. Portanto, os dados obtidos não permitem estimar estatisticamente taxa de falhas, confiabilidade ou robustez, nem avaliar quantitativamente a latência do sistema. Trabalhos futuros podem ampliar a validação experimental por meio de ensaios repetidos e medições de tempo de resposta.

Conclusão

O trabalho apresentou o desenvolvimento e a avaliação funcional e elétrica de uma arquitetura IoT para controle de iluminação em rede Wi-Fi utilizando ESP32 e servidor HTTP embarcado. A configuração inicial apresentou limitação no acionamento direto do módulo relé, superada após a implementação do estágio de adaptação com transistor BC548B.

Na configuração final, verificou-se a comutação do relé e a correspondência entre os comandos enviados pela interface e os estados da luminária, indicando o atendimento aos requisitos funcionais definidos para o protótipo. Como a avaliação não envolveu repetições controladas, não foi possível estabelecer conclusões estatísticas sobre confiabilidade ou taxa de falhas. Estudos futuros podem ampliar a validação experimental e avaliar o desempenho do sistema em diferentes condições de operação.

Referências

ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. The Internet of Things: a survey. Computer Networks, v. 54, n. 15, p. 2787–2805, 2010. DOI: 10.1016/j.comnet.2010.05.010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/222571757_The_Internet_of_Things_A_Survey. Acesso em: 16 set. 2026.

ESPOSITO, M.; BELLI, A.; PALMA, L.; PIERLEONI, P. Design and Implementation of a Framework for Smart Home Automation Based on Cellular IoT, MQTT, and Serverless Functions. Sensors, v. 23, n. 9, art. 4459, 2023. DOI: 10.3390/s23094459. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/370547371_Design_and_Implementation_of_a_Framework_for_Smart_Home_Automation_Based_on_Cellular_IoT_MQTT_and_Serverless_Functions. Acesso em: 16 set. 2026.

KUMAR, K. M.; CHAUDHURY, S. Development of a Smart Home Automation System using IoT enabled Devices. In: 2022 IEEE 19th India Council International Conference (INDICON). Kochi: IEEE, 2022. p. 1–5. DOI: 10.1109/INDICON56171.2022.10040165. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/10040165. Acesso em: 16 set. 2026.

VILLEGAS, M. D. et al. Smart Automation for Residential Spaces with PLC-ESP32 Architecture. Engineering Proceedings, v. 115, n. 1, art. 7, 2025. DOI: 10.3390/engproc2025115007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/397675448_Smart_Automation_for_Residential_Spaces_with_PLC-ESP32_Architecture. Acesso em: 16 set. 2026.