



SISTEMA DE CONTROLE DE POTÊNCIA DE CARGAS MONOFÁSICAS COM PROTEÇÃO CONTRA SOBRECARGA, SUBTENSÃO E SOBRETENSÃO, COM ALERTAS VIA WIFI

Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica: Filipy Dener Oliveira Teixeira

Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica: Gabriel Leal Ramos

Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica: Vitor da Silva Santos

Docente Orientador do Curso de Engenharia Elétrica: Marcelo Lucas

Universidade de Uberaba – Uniube, Uberaba – MG, Brasil

E-mail do autor correspondente: filipyd@hotmail.com

RESUMO: Embora o controle de potência de cargas monofásicas já seja amplamente utilizado, as soluções convencionais apresentam limitações, como a ausência de monitoramento das grandezas elétricas e de integração com outros sistemas. Nesse contexto, este trabalho propõe uma solução baseada em microcontroladores da família ESP, capaz de controlar a potência da carga por meio do controle do ângulo de disparo de um triac, realizar medições de tensão e corrente, e integrar-se a redes Wi-Fi utilizando o protocolo MQTT, permitindo a troca de informações e o envio de alertas via Node-RED e Telegram quando são detectados valores elétricos inadequados.

Palavras-chave: Controle; Potência; Monofásico; Proteção.

ABSTRACT: Although power control of single-phase loads is already widely used, conventional solutions present limitations, such as the lack of monitoring of electrical quantities and integration with other systems. In this context, this work proposes a solution based on microcontrollers from the ESP family, capable of controlling load power through triac firing angle control, measuring voltage and current, and integrating with Wi-Fi networks using the MQTT protocol, enabling information exchange and the sending of alerts via Node-RED and Telegram when improper electrical values are detected.

Keywords: Control; Power; Single-phase; Protection.

1 INTRODUÇÃO

As cargas monofásicas resistivas e indutivas são amplamente utilizadas em ambientes residenciais, comerciais e agroindustriais, mas continuam vulneráveis a variações de tensão e corrente que comprometem seu

desempenho e reduzem sua vida útil. Bollen e Hassan (2011) afirmam que essas cargas apresentam elevada sensibilidade a oscilações de tensão, podendo sofrer aquecimento excessivo, perda de eficiência e falhas prematuras. Em cargas resistivas, como destaca Baggin (2008), a potência dissipada depende diretamente da tensão aplicada, de modo que elevações podem causar sobrecarga térmica, enquanto reduções acentuadas reduzem a eficiência. Já em cargas indutivas, especialmente motores, Fitzgerald, Kingsley e Umans (2013) explicam que subtensões tendem a elevar a corrente de operação e sobretensões aceleram a degradação do isolamento.

Os métodos tradicionais de proteção, a exemplo de relés térmicos e disjuntores, atuam apenas de forma reativa e sem monitoramento contínuo, permitindo que distúrbios cumulativos prejudiquem a integridade das cargas, como observa Glover, Sarma e Overbye (2012). Com os avanços em microcontroladores e tecnologias IoT, soluções mais acessíveis passaram a permitir supervisão permanente e conectividade Wi-Fi, ampliando a segurança e possibilitando ações preventivas, conforme discutido por Al-Fuqaha et al (2015). Nesse cenário, torna-se fundamental um sistema capaz de ajustar com precisão a energia fornecida a lâmpadas, aquecedores e motores, realizando o controle de potência enquanto monitora continuamente tensão e corrente da carga. A adoção de novas tecnologias para garantir boa operação e confiabilidade de motores monofásicos é ressaltada por Khurse et al (2022). Assim, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema inteligente de controle e proteção para cargas monofásicas, utilizando microcontroladores ESP32 e ESP8266 para executar o controle por ângulo de disparo, monitorar em tempo real as grandezas elétricas, detectar condições de subtensão, sobretensão e sobrecorrente, integrar comunicação via Wi-Fi com protocolo MQTT e enviar alertas remotos por meio de fluxos em Node-RED, validando sua eficácia por meio de testes práticos.

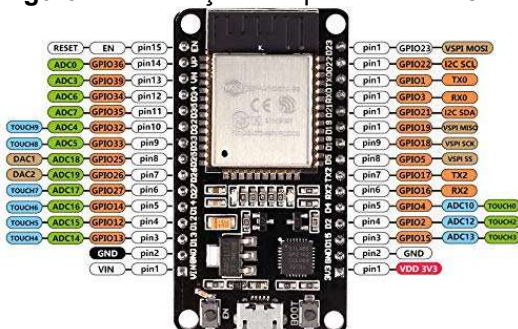
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Microcontrolador ESP32

O ESP32 é um microcontrolador de alto desempenho e baixo custo desenvolvido pela Espressif Systems, reconhecido por sua elevada capacidade de processamento, conectividade Wi-Fi e Bluetooth integradas e adequação a aplicações em Internet das Coisas e automação. Equipado com um processador dual core de até 240 MHz, dimensões reduzidas e modos de economia de energia, destaca-se frente a outros microcontroladores da mesma faixa de preço por oferecer rapidez na execução, versatilidade e possibilidade de operação em sistemas compactos e alimentados por bateria. Alves et al. (2021) ressaltam que o ESP32 apresenta grande potencial em projetos de automação residencial e industrial devido à sua facilidade de programação, baixo consumo energético e conectividade sem fio, características que reforçam sua adequação ao sistema proposto, que exige comunicação eficiente e processamento ágil. A versão utilizada neste trabalho disponibiliza 30 pinos (Figura 1), sendo 25 GPIOs com

múltiplas funções, como conversão analógica-digital, detecção de toque e interfaces seriais, o que viabilizou a leitura de sinais analógicos externos, a comunicação I2C com o display LCD e a integração com o ESP8266.

Figura 1 - Descrição dos pinos do ESP32-WROOM-32



Fonte: Amazon (s.d.).

2.2 Controle de potência

O sistema aqui proposto tem como um dos objetivos principais, controlar a potência fornecida à carga, seja ela uma lâmpada, resistência de aquecimento ou motor elétrico. Ou seja, determinar o quanto de trabalho, seja através de luminosidade, calor ou força mecânica, deve ser gerado.

De acordo com Boylestad (2012), é possível determinar a potência $P(t)$ em Watts de um circuito elétrico em um determinado momento, através do produto de valores instantâneos de tensão elétrica $v(t)$ e de corrente elétrica $i(t)$, estando os dois com unidades de medida em Volts e Amperes, respectivamente, como expressa a equação (1):

$$P(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (1)$$

Analogamente, aplicando a Primeira Lei de Ohm na equação anterior e levando em consideração grandezas senoidais e uma carga resistiva, temos que a potência média fornecida a um circuito é dada pela equação (2) a seguir:

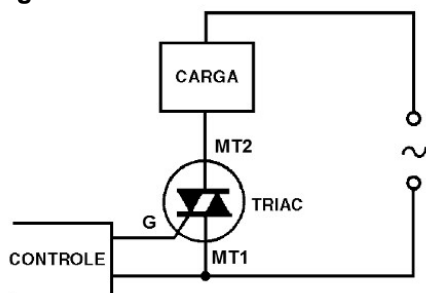
$$P = \frac{V_{rms}^2}{R} \quad (2)$$

Sendo assim, para que a lâmpada, por exemplo, diminua sua luminosidade, é preciso que a sua potência média diminua, mas como sua resistência elétrica é fixa, dada a construção física de seu filamento, a grandeza que precisa ser diminuída é a tensão aplicada em seus polos.

Para variar a tensão elétrica alternada, na rede monofásica, há um método bem comum, presente em diversos aparelhos eletrônicos e em eletrodomésticos, que é o controle do tempo de condução da onda senoidal através de disparos de um triac.

Esse método de controle consiste em um circuito que fornece pulsos que acionam um triac, e este é colocado entre a fonte de alimentação e a carga, como ilustra a Figura 2 a seguir:

Figura 2 - Circuito de conexão de um triac à carga.

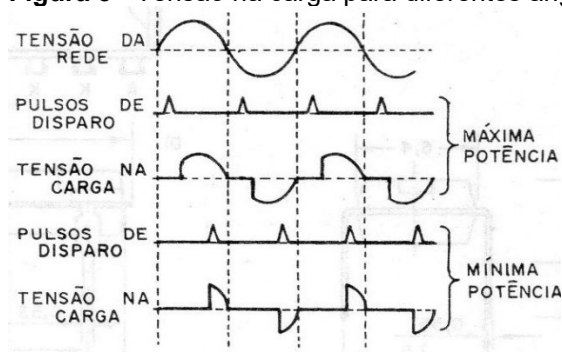


Fonte: Braga (s.d.).

O arranjo de controle pode ser construído de diferentes formas, mas o efeito é sempre o mesmo. Como é explicado por Ahmed (2010), em determinado instante é enviado um breve pulso de tensão para que o triac passe a conduzir e, dependendo do valor da amplitude da fonte de tensão alternada, ele se mantém dessa forma até que a corrente que passa nos seus terminais principais chegue a um valor muito pequeno, quando isso acontece ele para de conduzir. Dessa forma, para cargas resistivas, toda vez que a tensão passa por zero, o triac entra em corte e é necessário enviar outro pulso em seu gate.

Esse controle faz com que o semiciclo da onda senoidal de tensão seja “recortado”, tirando uma parte da onda que seria destinada à carga. Dependendo de onde o pulso foi alocado em relação à senoide, o valor RMS da tensão se altera por conta da perda da área sob a curva, como é mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Tensão na carga para diferentes ângulos de disparo.



Fonte: Braga (s.d.).

O tempo de espera entre a passagem por zero da tensão alternada controlada e o pulso para condução do triac, é chamado de ângulo de disparo. Esse nome se dá pois, como a onda senoidal tem sempre 360° e seus semiciclos a metade disso, é muito mais prático determinar quando será efetuado o disparo em termos angulares, do que em relação ao tempo, uma vez que esse último é dependente de outras variáveis, como a frequência da onda, por exemplo.

Segundo Rashid (2014), é possível determinar o valor de tensão RMS em função do ângulo de disparo (alfa) do triac, se este for feito periodicamente uma vez por semiciclo, deduzindo a partir da equação (3) conceitual da tensão RMS:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{\int_0^T v^2(t) dt}{T}} \quad (3)$$

Em que:

$v(t)$ = função da tensão em relação ao tempo;

T = período da função.

Sendo o período da onda igual a 2π , substituindo a função da tensão instantânea pela forma senoidal, e levando em consideração a simetria dos semiciclos, temos (4):

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{2V_p^2 \int_{\alpha}^{\pi} \sin^2(\omega t) dt}{2\pi}} \quad (4)$$

Sendo que:

ω = frequência angular.

Ao desenvolver a integral definida e a raiz quadrada, obtém-se a seguinte equação (5):

$$V_{rms} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}} \quad (5)$$

Onde:

α = ângulo de disparo do triac, em radianos.

Podemos ver que a equação da tensão RMS quando há o controle por ângulo de disparo, diferencia-se do valor RMS da onda senoidal sem controle, pelo coeficiente que acompanha a razão entre tensão de pico e a raiz quadrada de dois.

Da mesma forma, se substituirmos a equação (5) na equação (2), é possível calcular também o coeficiente que acompanha o valor da potência elétrica nesse tipo de sistema, como mostra a equação (6):

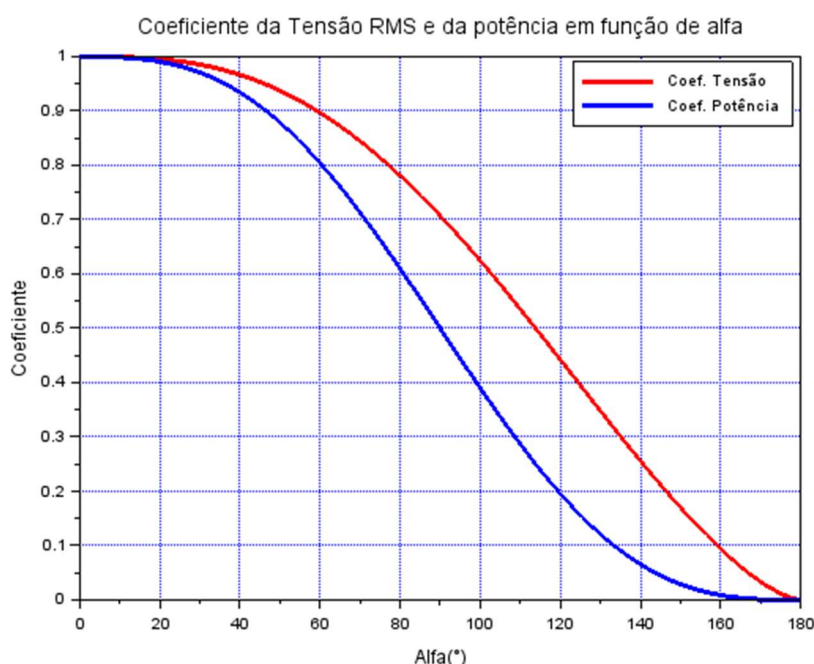
$$P = \frac{V_p^2}{2R} \left[1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi} \right] \quad (6)$$

Em que:

R = resistência elétrica da carga.

No gráfico a seguir (Gráfico 1), é possível analisar as curvas que representam os coeficientes obtidos em função de diferentes ângulos de disparos e entender de forma visual como os valores de tensão e potência são influenciados por eles de forma não linear e, inclusive, evidenciando a relação quadrática da potência em relação à tensão:

Gráfico 1 - Gráfico comparativo dos coeficientes de tensão RMS e potência



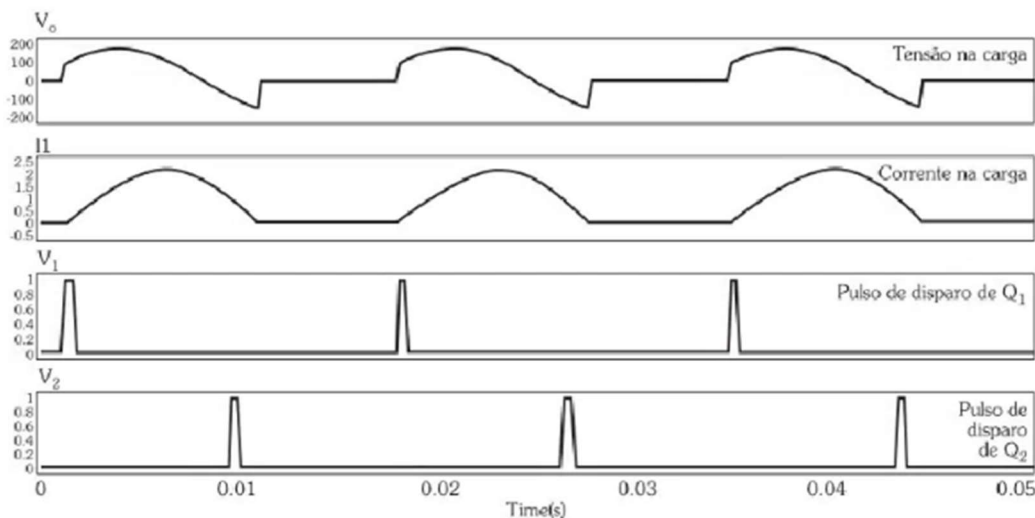
Fonte: Os autores (2025).

Após a realização dessas análises, foi possível desenvolver uma forma mais precisa para calcular o ângulo de disparo no algoritmo do microcontrolador. Pois, sabendo as equações de cada grandeza, é possível verificar qual valor de ângulo de disparo deverá ser resultado do cálculo para uma determinada potência.

Na análise para cargas com reatância indutiva, o comportamento do circuito é um pouco diferente. Como diz Almeida (2013) em sua obra sobre controle de potência ac com tiristores, quando a carga possui características indutivas, existe uma defasagem entre a tensão aplicada e a corrente circulante, o que faz com que no momento em que a tensão na carga é zero, a corrente de carga ainda esteja com um valor considerável, impedindo o desligamento da chave eletrônica.

Nessas condições, quando o pulso de disparo é dado enquanto a corrente ainda não é nula, seu efeito no triac é desprezado, e então não é feito o controle da tensão no semiciclo em questão. A Figura 4, demonstra esse fenômeno quando o controle é realizado com dois SCR's em anti-paralelo, tendo o mesmo efeito do triac, que no caso receberia os dois pulsos de controle que são mostrados de forma separada.

Figura 4 - Demonstração da falha na condução do tiristor com carga indutiva.



Fonte: Almeida (2013, p. 146).

Por conta desse problema, os controles baseados em tiristores em equipamentos com características indutivas, geralmente não fazem o controle de todo o semiciclo. Assim como diz Braga (s.d.), para evitar falhas na condução, o ângulo de disparo é mantido dentro de uma faixa segura, levando em conta o fator de potência das cargas indutivas.

No caso dos motores monofásicos, que têm uma ampla faixa de valores para os fatores de potência, tendo como exemplo o catálogo da Hercules Motores Elétricos (s.d.), onde encontramos motores com fatores de potência que variam de aproximadamente 0,5 a 0,99 em diferentes situações, idealmente, o controle do ângulo de disparo deveria ser ajustado de acordo com cada carga específica. Mas para deixar o equipamento de controle de potência com uma aceitação de cargas mais ampla, o valor do ângulo de disparo pode ter a faixa de variação entre 60° e 180°, por exemplo.

3 METODOLOGIA

O desenvolvimento do esquema elétrico da placa eletrônica utilizou os softwares Proteus 8 e KiCad 9.0. O Proteus foi empregado nas simulações preliminares de circuitos analógicos, permitindo analisar grandezas elétricas e ajustar valores e modelos de componentes. O KiCad 9.0 foi responsável pela elaboração do esquemático e do layout da placa de circuito impresso, beneficiando-se de sua ampla biblioteca, documentação atualizada e suporte da comunidade.

A escrita, compilação e gravação do código dos microcontroladores ESP32 e ESP8266 foram realizadas no Arduino IDE, devido à compatibilidade com dispositivos da Espressif e à facilidade de integração de bibliotecas. Para comunicação via internet, adotou-se o protocolo MQTT, integrando o microcontrolador ao broker público HiveMQ. Os alarmes enviados pela placa

através da rede Wi-Fi são direcionados a um bot no Telegram, gerenciado por um fluxo no Node-RED que monitora o tópico correspondente no HiveMQ e encaminha as mensagens ao usuário.

Figura 5 - Logomarcas dos softwares principais utilizados no projeto.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025), a partir de logos institucionais dos softwares utilizados.

Olhando agora para os blocos do circuito desenvolvido, que pode ser analisado em detalhes na Figura 22 (APÊNDICE A), é possível ter um entendimento mais aprofundado de suas funcionalidades.

A alimentação do circuito é obtida a partir da tensão da rede, passando por uma mini fonte chaveada de 12V/0,25A. Como recomenda Costa (2019), a proteção do circuito foi garantida por um fusível de vidro 5x20mm de ação rápida, e então foi colocado um capacitor eletrolítico para filtragem do sinal e diminuição do ripple.

Logo após o filtro capacitivo foi implementado três estágios de regulação de tensão, utilizando reguladores lineares LM7809, LM7805 e LM1117T-3,3 que oferecem, respectivamente, tensões de 9V, 5V e 3,3V para os variados componentes do sistema.

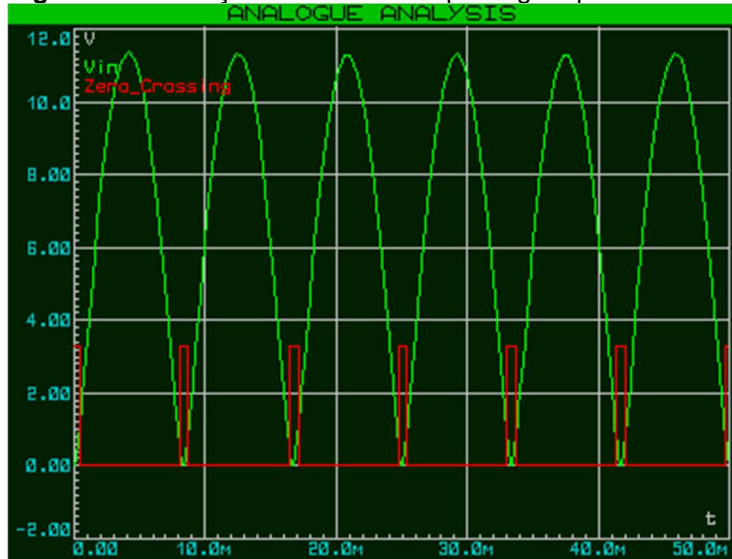
No estágio de interface de sinais digitais, foram utilizados transistores bipolares de junção atuando como chaves eletrônicas, na configuração emissor comum, assim como é explicado por Horowitz e Hill (2017), e para o condicionamento do sinal de saída, foram utilizadas portas NOT com histerese.

Para a vigilância das grandezas elétricas, foi utilizada uma combinação de resistores de precisão (1%) e buffers com amplificadores operacionais LM358. Esses componentes tiveram a função de atenuar os sinais de corrente e tensão para níveis compatíveis com o microcontrolador.

No sensoriamento da tensão da rede, foi utilizado um transformador com relação 127V/9V e uma ponte de diodos, para retificar a tensão alternada e não deixar tensões negativas afetarem o circuito.

A detecção de passagem por zero do sinal da rede, fundamental para o controle do ângulo de disparo do triac, foi feita com um optoacoplador PC817, funcionando em conjunto com um resistor de pull-up, gerando pulsos de tensão quando a tensão da rede passa por zero, como no gráfico gerado pela simulação no Proteus (Figura 6):

Figura 6 - Simulação do detector de passagem por zero.

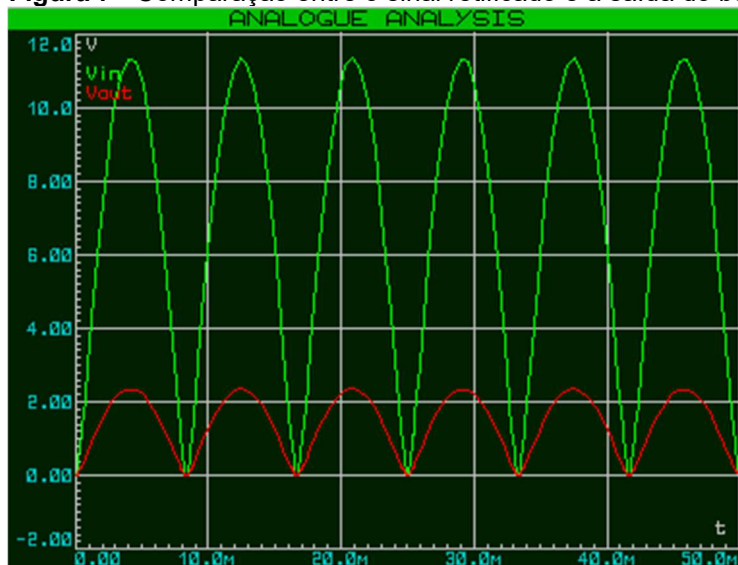


Fonte: Os autores (2025).

Conectado também ao retificador, está o circuito de atenuação da onda retificada, composto por um divisor de tensão e dois buffers.

Na saída do primeiro buffer, aparece a tensão atenuada pelo divisor de tensão de forma integral, por ter nenhum filtro de sinal. Como mostra a simulação (Figura 7):

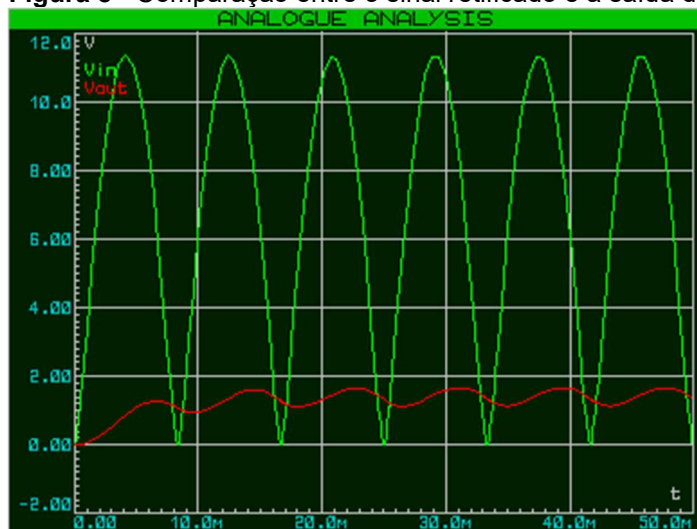
Figura 7 - Comparação entre o sinal retificado e a saída do buffer atenuada.



Fonte: Os autores (2025).

Já o segundo buffer tem um capacitor de filtro na sua saída, que como afirma Nilsson e Riedel (1999) deixa o sinal mais uniforme, apesar de ainda conter uma ondulação. Se o valor do capacitor fosse maior, a tendência do sinal seria eliminar cada vez mais o ripple do sinal. O gráfico da tensão de saída simulado é o seguinte (Figura 8):

Figura 8 - Comparação entre o sinal retificado e a saída do buffer com capacitor de filtro.



Fonte: Os autores (2025).

Como explica Boylestad e Nashelsky (2013), no caso da onda senoidal completamente retificada, o valor médio é igual ao valor de pico multiplicado por 0,637. Dessa forma, o valor médio da saída do buffer com filtro é igual a aproximadamente 1,6V por conta da atenuação do sinal pelo divisor de tensão.

Para realizar a medição da corrente que circula pela carga, foi utilizado o transformador de corrente SCT-013. Sendo assim, foi calculado um resistor de carga, que fica em série com o enrolamento do secundário do transformador de corrente, para atender os limites de tensão do microcontrolador, sendo o valor máximo permitido igual a 3,3V.

No entanto, como a corrente induzida no secundário é alternada, foi preciso adicionar um offset na tensão gerada no resistor de carga, para que a tensão de saída passasse a ficar totalmente positiva, através de um divisor de tensão.

Para que fosse possível determinar a potência destinada à carga, foram adicionados dois circuitos para leitura de sinais analógicos, um para ser usado com potenciômetro e o outro para sinais de 4 a 20mA, tornando viável a mudança da potência de forma dinâmica.

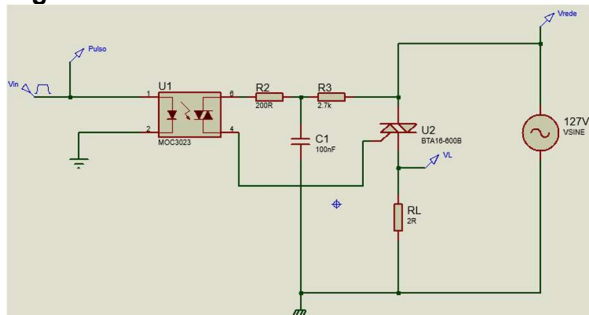
Como possibilidade de monitorar o status da carga, foi utilizado um relé de 12V com um contato NAF que comuta se a carga for ligada. Para a proteção do circuito contra sobretensões geradas pelo desligamento do relé, foi utilizado um diodo roda livre em paralelo com ele, como indica Malvino e Bates (2016).

No bloco de ativação da carga, foi empregado o optotriac MOC3023, e o triac BTA16, assim como resistores de 2W de potência para controle do triac no lado da rede e um capacitor para reduzir o efeito de cargas indutivas no circuito, assim como é indicado no datasheet do optotriac.

O bloco tem a função de controlar a tensão que a carga recebe, através dos pulsos enviados pelo microcontrolador. O MOC3023 isola galvanicamente o circuito da placa, permitindo a ativação do triac sem comprometer a integridade do circuito.

O circuito foi simulado primeiramente com uma carga resistiva, como na Figura 9, para verificar o comportamento da tensão na carga para diferentes ângulos de disparo. Na Figura 10 o ângulo de disparo é de 30° e na Figura 11 o ângulo é de 90° .

Figura 9 - Circuito de acionamento do triac com carga resistiva.



Fonte: Os autores (2025).

Figura 10 - Gráfico das tensões com carga resistiva e alfa igual a 30° .



Fonte: Os autores (2025).

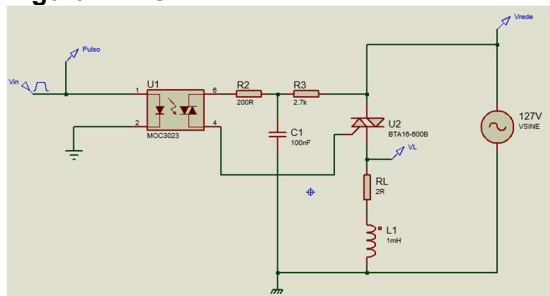
Figura 11 - Gráfico das tensões com carga resistiva e alfa igual a 90° .



Fonte: Os autores (2025).

Da mesma forma, foi feita a simulação do circuito com carga indutiva (Figura 12, Figura 13 e Figura 14).

Figura 12 - Circuito de acionamento do triac com carga indutiva.



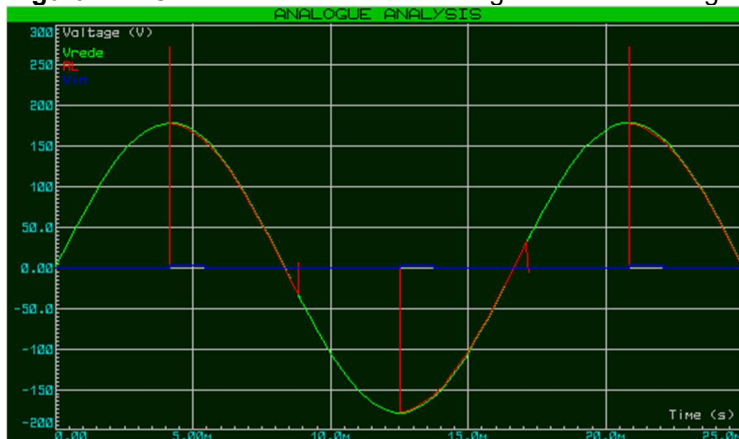
Fonte: Os autores (2025).

Figura 13 - Gráfico das tensões com carga indutiva e alfa igual a 30° .



Fonte: Os autores (2025).

Figura 14 - Gráfico das tensões com carga indutiva e alfa igual a 90° .



Fonte: Os autores (2025).

Como foi possível visualizar nas simulações, o circuito com carga indutiva apresenta harmônicos no chaveamento e, quando a tensão passa por zero, ocorre uma condução indevida no semiciclo seguinte ao pulso de controle, caracterizando a resposta da parcela reativa da carga, da mesma forma como acontece com os retificadores controlados, explicados por Rashid (2014).

Após toda a simulação e desenvolvimento do hardware, a placa eletrônica foi fixada por parafusos em uma chapa de MDF, com botoeiras de liga, desliga,

emergência, e um sinalizador de LED vermelho para indicar o status de operação da carga. Para organização dos cabos, foram colocadas canaletas de PVC, com dimensões de 30x30mm. Foi fixado também um trilho DIN e bornes, para praticidade na conexão de componentes externos. Para proteção contra curtos-circuitos, foi utilizado um disjuntor de 10A.

Na programação, o código principal, feito no ESP32, foi responsável por: ler e processar as entradas digitais e analógicas; executar rotinas de interrupção por hardware e por timer para ativação do triac; calcular o ângulo de disparo; calcular os valores de tensão e corrente RMS do circuito de controle; realizar comunicação serial com o ESP8266 para poder receber e enviar informações vindas da rede; tratar os dados recebidos via serial para controle via parametrização remota; mostrar os valores de tensão, corrente, potência percentual e dos parâmetros em um menu tipo lista, através do display LCD I2C.

Nele é possível determinar a potência da carga, de zero a cem por cento, através das leituras analógicas de potenciômetro ou sensor 4-20mA, ou também por meio de parametrização via comunicação serial.

Esse valor de potência é utilizado para calcular o ângulo de disparo do triac, por meio de uma aproximação matemática da equação (6) da potência para cargas resistivas, como mostra Figura 15.

Figura 15 - Bloco de função para cálculo do ângulo de disparo.

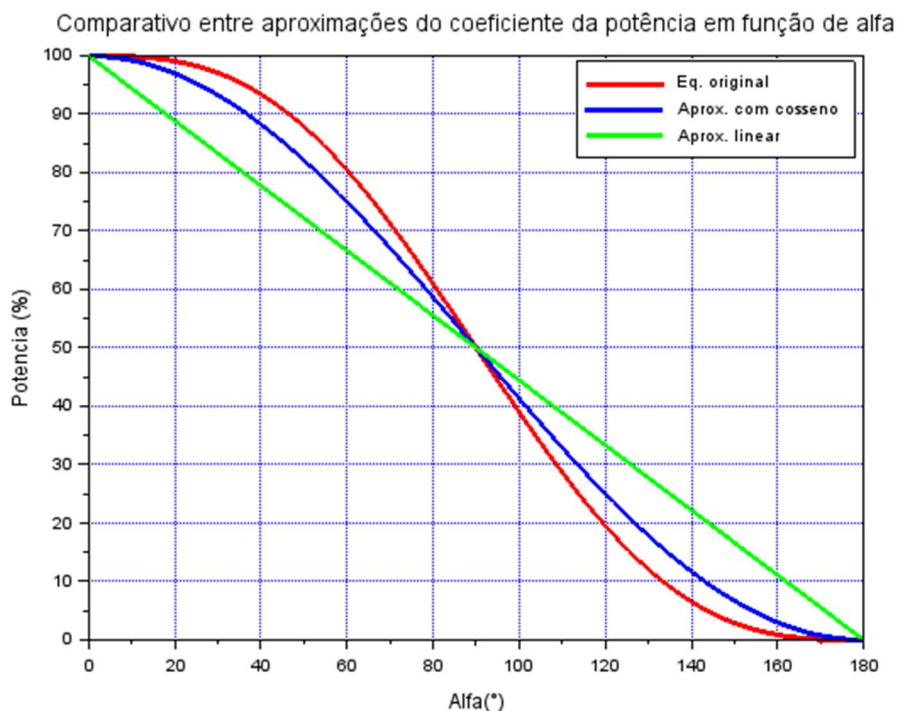
```
//Função para calcular o ângulo de disparo do triac
void calculaAnguloDeDisparo() {
    float x = -(1.0f - 0.02f * potenciaDeSaida);
    x = constrain(x, -1.0f, 1.0f);
    float anguloRadianos = acosf(x);
    intervaloDeDisparo = constrain((anguloRadianos * periodo) / 6.283, 1500, 8333);
}
```

Fonte: Os autores (2025).

Isso foi necessário pois, o processo de obtenção do ângulo de disparo através da potência percentual inserida, seria muito extenso e demorado para a rotina de scan do ESP32, por conta dos cálculos trigonométricos envolvidos.

O Gráfico 2 mostra um comparativo entre a equação do coeficiente da potência original e duas aproximações possíveis. A primeira sendo uma função simples com cosseno e a outra uma equação linear decrescente, normalmente utilizada através da função map() no ESP32.

Gráfico 2 - Comparativo entre aproximações do coeficiente de potência.



Fonte: Os autores (2025).

Evidentemente, a melhor aproximação da função original é a equação (7) com cosseno, sendo que a equação (8) linear tem um resultado não tão próximo do esperado. As equações de aproximação são dadas a seguir:

$$P_1(\%) = \frac{100(1 - \cos(\alpha))}{2} \quad (7)$$

$$P_2(\%) = 100 \left(-\frac{x}{180} + 1 \right) \quad (8)$$

A parametrização da carga pode ser feita através de comunicação serial, tanto por cabo micro USB ligado ao microcontrolador, quanto pela comunicação com o ESP8266, através de uma página html gerada por ele. Ela é possível através da inserção dos códigos listados no Quadro 1 a seguir:

Quadro 1 - Código e funções dos parâmetros disponíveis para configuração.

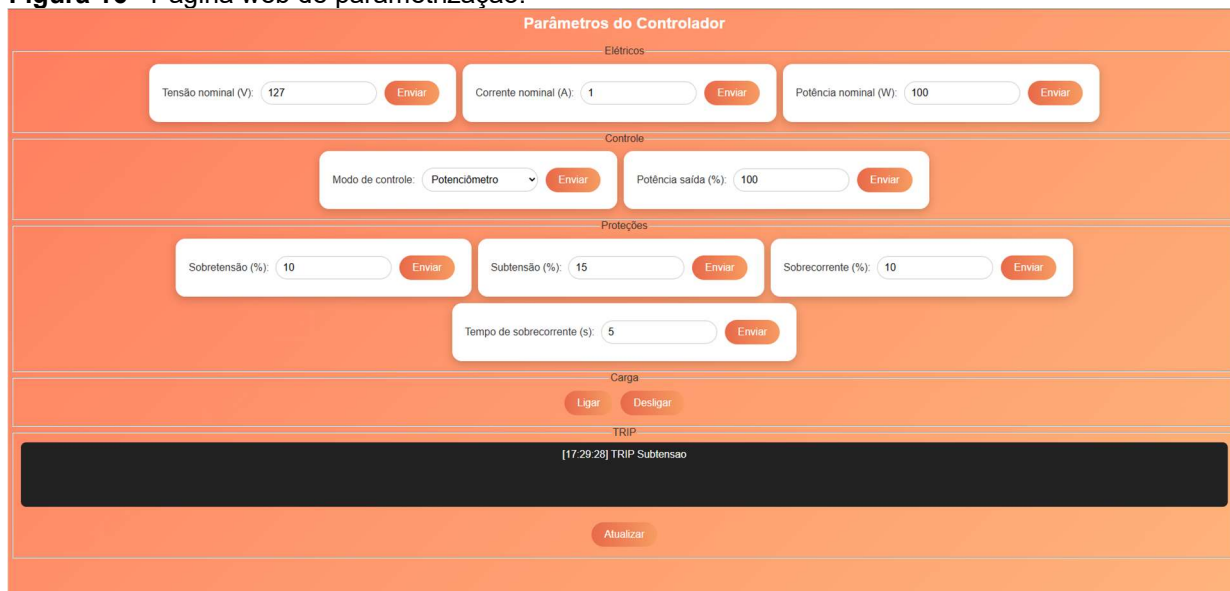
Código	Descrição do parâmetro
P51	Define a <i>tensão nominal da carga</i> (0–150 V, padrão 127 V).
P52	Define a <i>corrente nominal da carga</i> (0–10 A, padrão 1 A).
P53	Define a <i>potência nominal da carga</i> (0–1500 W, padrão 100 W).
P60	Define o <i>modo de controle de potência</i> (0–3, padrão 1).
P101	Define a <i>potência de saída</i> quando o modo de controle (P60) é 3 (0–100%, padrão 100%).
P110	Define o <i>tempo de rampa</i> para alteração de potência (0–10 s, padrão 0).
P120	Define o limite de <i>sobretensão máxima permitida</i> (0–25%, padrão 10%).
P121	Define o limite de <i>subtensão máxima permitida</i> (0–25%, padrão 15%).
P122	Define o limite de <i>sobrecorrente máxima permitida</i> (0–20%, padrão 10%).
P123	Define o <i>tempo permitido de sobrecorrente</i> (0–10 s, padrão 5 s).
P200	Comando de debug: exibe <i>potência e ângulo de disparo</i> quando valor = 1.
P201	Liga a carga via serial quando valor = 1.
P202	Desliga a carga via serial quando valor = 1.

Fonte: Os autores (2025).

No ESP8266, foi escrita toda a parte de comunicação via Wi-Fi, desde a conexão com redes externas até a configuração de acesso ao broker MQTT.

O sistema inicia conectando-se à rede Wi-Fi configurada e, após estabelecer a conexão, cria a página web para parametrização da carga, acessível via navegador acessando pelo IP que é mostrado no display LCD, como é possível visualizar na Figura 16.

Figura 16 - Página web de parametrização.



Fonte: Os autores (2025).

A comunicação MQTT é outro ponto central do projeto. O microcontrolador mantém conexão com o broker público HiveMQ, enviando

atualizações e escutando comandos remotos de forma automática, assim como recomenda Sellers e Downey (2020).

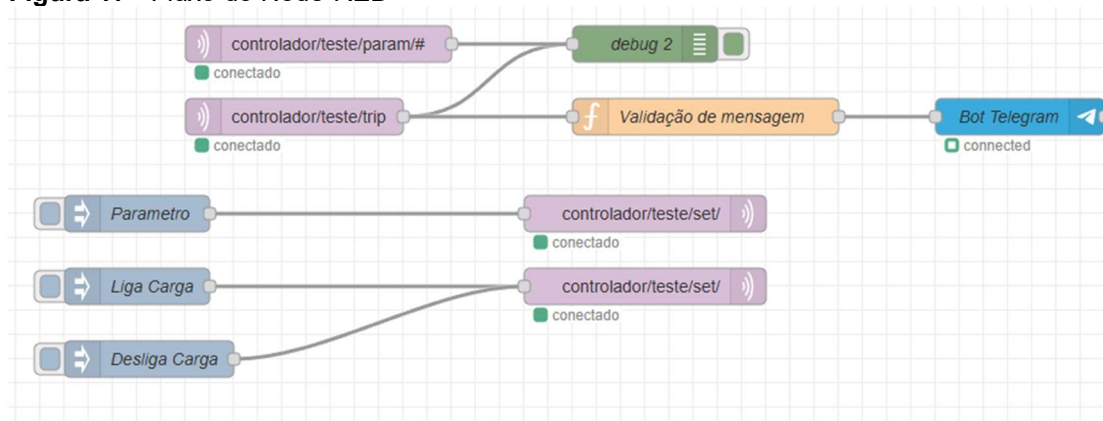
É através desse protocolo que é possível enviar os sinais de “trip” para outros sistemas, o que, de acordo com o National Institute of Standards and Technology (2021), é essencial para diagnósticos confiáveis.

Para facilitar a integração do projeto com outros dispositivos e interfaces, é possível desenvolver fluxos no Node-RED que faz o intercâmbio de instruções via MQTT, utilizando os blocos prontos presentes na aplicação.

Sabendo disso, foi criado um fluxo para ler o tópico de “trip” configurado pelo ESP8266 e assim que o tópico for escrito, o Node-RED lê e manda a mensagem para o chat do Telegram, através de um bot criado para essa função, sendo os tokens inseridos e configurados através do bloco “Telegram Sender”.

Além disso é possível assinar nos tópicos MQTT e, conseqüentemente, controlar o equipamento projetado. A Figura 17 mostra o fluxo criado.

Figura 17 - Fluxo do Node-RED



Fonte: Os autores (2025).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As leituras de tensão e corrente foram realizadas através do multímetro Minipa ET-1507B para efeito de comparação e análise de qualidade de leitura do controlador.

Dessa forma, o painel foi energizado e a tensão da rede foi aferida com o multímetro, colocando as pontas de prova nos bornes de entrada de alimentação da rede. Os valores aferidos podem ser vistos na Figura 18:

Figura 18 - Comparação na aferição de tensão.



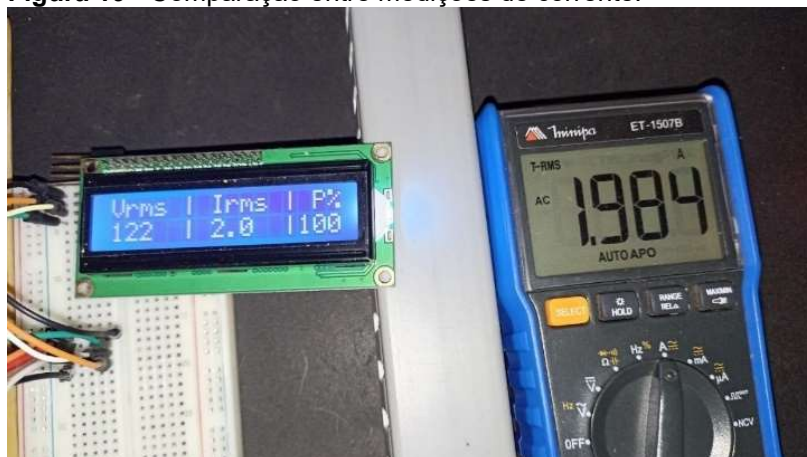
Fonte: Os autores (2025).

Na etapa de leitura de corrente, um motor monofásico com capacitor permanente de 0,5CV, mostrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, foi utilizado como carga.

Primeiro foi feita a parametrização, através da página web, onde o parâmetro P52 foi atualizado para 2A, que é o valor aproximado do motor sem carga acoplada ao rotor. A confirmação da mudança do parâmetro se deu através da leitura no display LCD.

A leitura de corrente foi realizada colocando o multímetro em série com o motor, resultando na medição apresentada na Figura 19.

Figura 19 - Comparação entre medições de corrente.



Fonte: Os autores (2025).

Foram constatados também o pleno funcionamento das entradas digitais e a energização do sinalizador conectado ao relé da saída digital.

Nesse procedimento, houve em paralelo o teste do controle de potência pelo potenciômetro, apresentando uma diminuição da corrente conforme a diminuição da potência ao girar o potenciômetro.

Após isso, foi confirmada a comunicação com o Node-RED e Telegram. Para isso, na página de parametrização, a corrente nominal da carga foi atualizada para 1A, de forma com que ao ligar o motor, sua corrente

ultrapassasse o limite de sobrecarga padrão que é de 10% da corrente nominal parametrizada.

Dessa forma, ao pressionar o botão de ligar, o motor foi acionado normalmente, e após 5 segundos, tempo padrão da falha por sobrecarga (para evitar o desligamento do motor no período de partida), o motor foi desligado de forma autônoma e a mensagem foi enviada ao chat do Telegram, às 18:48 do dia 22 de novembro, como pode ser observado na Figura 20.

Figura 20 - Mensagens de falha enviadas por Telegram.

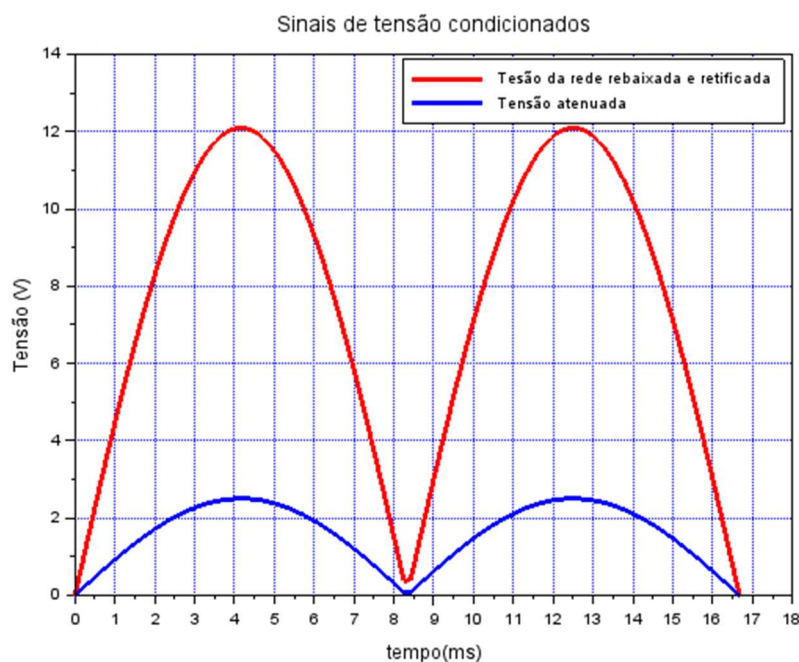


Fonte: Os autores (2025).

Recapitulando, a etapa inicial de desenvolvimento do projeto constituiu na simulação dos blocos de circuitos presentes na placa. As respostas dos blocos de condicionamento dos sinais de tensão e corrente são apresentadas no Gráfico 3 e Gráfico 4. Evidencia-se que os sinais lidos puderam ser adequados

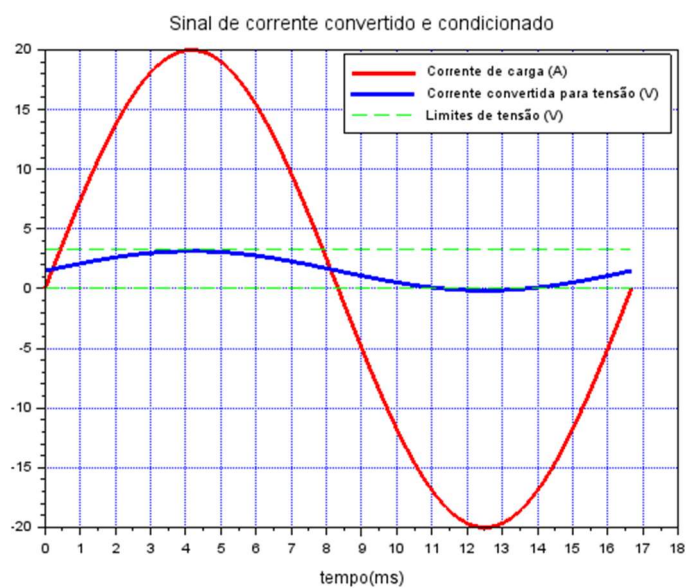
à faixa de leitura do ESP32 (0 a 3,3V), deixando sempre uma margem para as oscilações da rede, através da atenuação do sinal.

Gráfico 3 - Sinais de tensão da rede após condicionamento.



Fonte: Os autores (2025).

Gráfico 4 - Sinal de corrente de carga convertido para tensão.



Fonte: Os autores (2025).

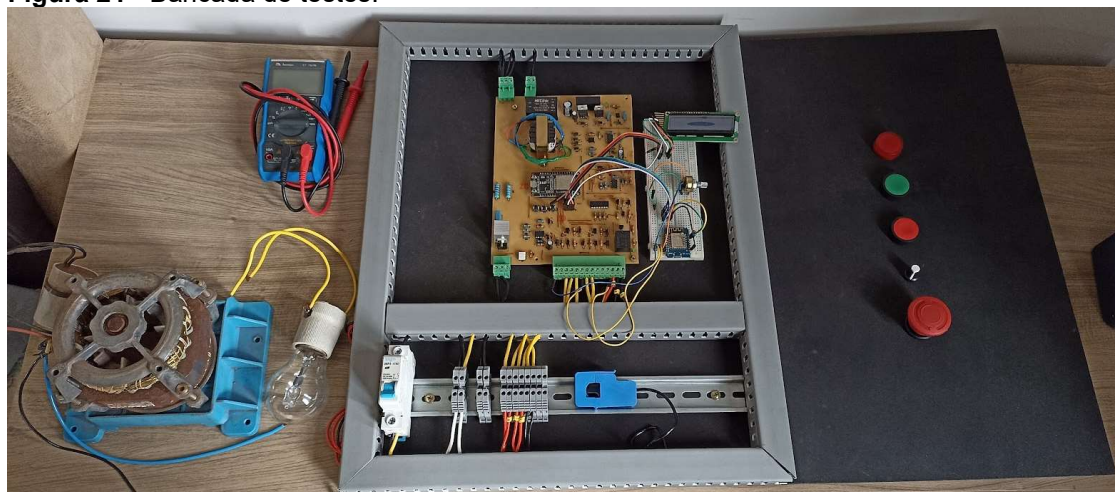
Posterior ao desenvolvimento do layout e a confecção da placa de circuito impresso, foi feita a fixação de cada componente eletrônico por meio da soldagem com estanho.

E então, com a placa pronta, cada parte do circuito teve seu funcionamento avaliado. Para isso foram realizadas medições de tensão em cada ponto com um multímetro digital. Após isso, a placa de circuito foi fixada em uma chapa de MDF que então comporia a base para testes.

A partir dos ensaios feitos com um motor de indução e posteriormente com cargas resistivas, como lâmpadas halógenas, o sistema foi calibrado via software para melhorar a precisão das medições.

Montada a bancada para testes com os dois tipos de carga, como na Figura 21, foi possível verificar o funcionamento do controle e parametrização remota, incluindo a parte visual da página web de parametrização, de comunicação via MQTT e tratamento de dados pelo Node-RED, demonstrando que suas funcionalidades não estão limitadas apenas à leitura da IHM local.

Figura 21 - Bancada de testes.



Fonte: Os autores (2025).

Na realização de testes com uma lâmpada halógena de 60W, houve a medição de tensão e corrente da carga com o multímetro, o que possibilitou a criação da Tabela 1, com os dados de cada grandeza para o valor de potência correspondente.

Tabela 1 - Tensão e corrente medidos para diferentes potências percentuais e carga resistiva.

Potência (%)	Tensão na carga (V)	Corrente na carga (A)	Tensão da rede (V)
0	0	0	124
25	60,2	0,23	122
50	86,5	0,34	123
75	104,9	0,42	122
100	122,1	0,49	123

Fonte: Os autores (2025).

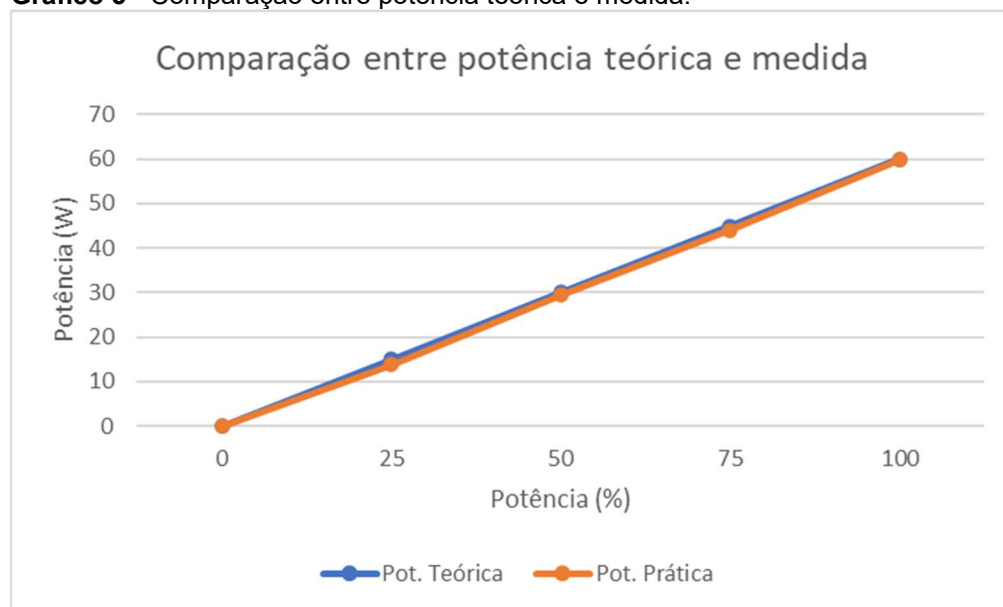
Como comparativo aos valores teóricos, foram montadas a Tabela 2, Gráfico 5 e Gráfico 6 para verificação visual.

Tabela 2 - Valores teóricos e práticos de potência.

Potência (%)	Potência Teórica (W)	Potência Prática (W)
0	0	0
25	15	13,846
50	30	29,41
75	45	44,058
100	60	59,829

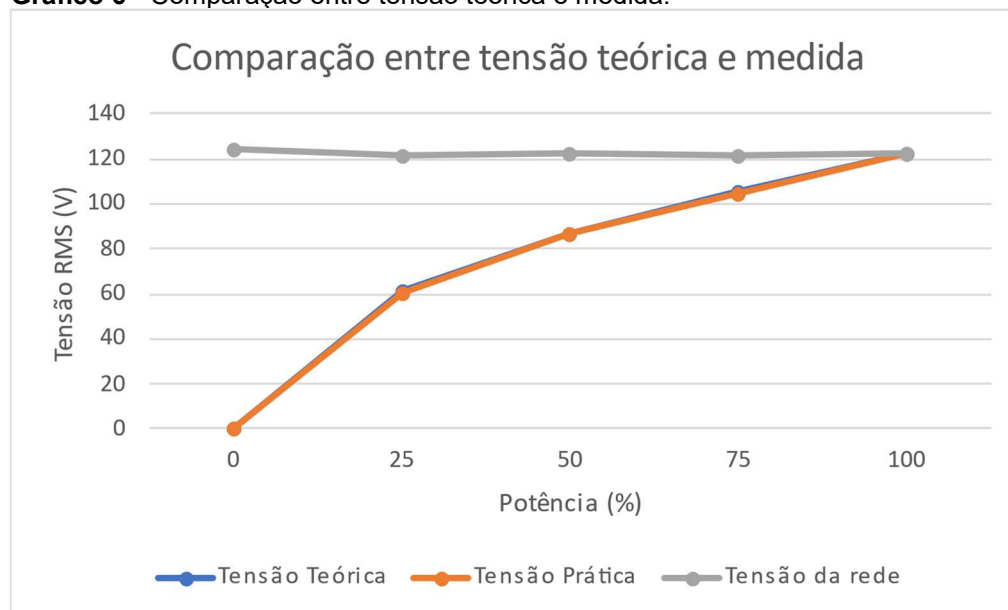
Fonte: Os autores (2025).

Gráfico 5 - Comparação entre potência teórica e medida.



Fonte: Os autores (2025).

Gráfico 6 - Comparação entre tensão teórica e medida.



Fonte: Os autores (2025).

Analisando os gráficos, é possível observar que os valores obtidos foram bastante satisfatórios em relação à precisão do controle de potência para a carga utilizada. Além disso, conforme abordado no trabalho de Tat e Haur (2016), a faixa de controle obtida com microcontroladores é significativamente maior quando comparada à de dimmers comuns e, no caso do projeto desenvolvido, as proteções implementadas constituem um diferencial importante para a aplicação.

Embora este trabalho ofereça uma boa funcionalidade, é importante considerar algumas limitações.

O sistema foi projetado apenas para atender cargas monofásicas, deixando de lado a possibilidade de uso com motores trifásicos ou outras configurações, o que limita sua utilidade em instalações industriais maiores.

A funcionalidade de parametrização e notificação remota depende da presença e da qualidade da rede Wi-Fi. Em locais com sinal ruim ou inexistente, a comunicação com o usuário pode ser comprometida.

O projeto utiliza sensores e circuitos calibrados para um intervalo específico de corrente e tensão. Assim, situações que fogem dessa faixa podem levar a leituras imprecisas ou até danificar o sistema.

Tendo isso em vista, é importante a realização de melhorias em atualizações futuras, para que o sistema fique mais completa e com menos pontos fracos, abrangendo uma maior gama de aplicações.

5 CONCLUSÃO

O controlador de potência com proteções desenvolvido, produziu resultados notáveis e satisfatórios, desde as fases de simulação até as etapas experimentais. Isso comprovou que a proposta é viável do ponto de vista técnico, funcional e facilmente implementável em ambientes residenciais e pequenos negócios, além dos recursos que os dimmers convencionais não possuem.

Nas fases de concepção, implementação e teste, foi possível observar que o sistema criado para o ESP32 demonstrou um bom desempenho ao ler as variáveis elétricas, processar os dados e executar decisões automáticas de proteção, assegurando segurança e controle eficaz dos motores e outras cargas conectadas.

Os testes realizados com equipamentos residenciais, como motores monofásicos e lâmpadas, mostraram que o sistema responde rapidamente e com boa precisão às situações de sobrecarga, subtensão e sobretensão, desconectando automaticamente o circuito quando necessário e enviando alertas imediatos via Wi-Fi.

Em relação às perspectivas futuras, o sistema pode ser expandido para usos com outros sensores, para ampliar a quantidade de grandezas monitoradas voltadas à proteção, garantindo ainda mais confiabilidade ao projeto. Além disso, devido sua comunicação com brokers MQTT, é uma boa proposta de melhoria o desenvolvimento de um banco de dados e dashboards para armazenamento e leitura remota das variáveis lidas da carga.

6 REFERÊNCIAS

AHMED, Ashfaq. **Eletrônica de potência**. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2010.

AL-FUQAHA, A. et al. **Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications**. IEEE Communications Surveys & Tutorials, v. 17, n. 4, p. 2347–2376, 2015.

ALMEIDA, José Luiz Antunes de. **Dispositivos semicondutores: tiristores – controle de potência em CC e CA**. 13. ed. rev. São Paulo: Érica, 2013.

ALVES, Davi M.; RIBEIRO, João P.; SANTOS, Rafael L. **Aplicações do microcontrolador ESP32 em sistemas de automação baseados em Internet das Coisas (IoT)**. Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada, v. 6, n. 2, p. 1–9, 2021. DOI: 10.25286/rep.v6i2.1721.

AMAZON. **Placa de desenvolvimento com microcontrolador ESP-WROOM-32**. Disponível em: <https://www.amazon.com.br/DORHEA-desenvolvimento-Processador-microcontrolador-ESP-WROOM-32/dp/B086MJGFVV>. Acesso em: 14 nov. 2025.

BAGGINI, A. **Handbook of Power Quality**. Chichester: Wiley, 2008.

BOLLEN, M. H. J.; HASSAN, F. **Integration of Distributed Generation in the Power System**. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2011.

BOYLESTAD, Robert L. **Introdução à análise de circuitos**. 12. ed. São Paulo: Pearson, 2012.

BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**. 11. ed. São Paulo: Pearson, 2013.

BRAGA, Newton C. **Circuitos com TRIACs**. Disponível em: <https://www.newtonbraga.com.br/projetos/15176-circuitos-com-triacs-art1029s-art3978.html>. Acesso em: 18 nov. 2025.

BRAGA, Newton C. **Controle de fase para cargas indutivas**. Disponível em: <https://www.newtonbraga.com.br/projetos/19321-controle-de-fase-para-cargas-indutivas-art2314.html>. Acesso em: 18 nov. 2025.

ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP8266 Wi-Fi SoC – overview**. Espressif Systems, s.d. Disponível em: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp8266/overviewESP8266>. Acesso em: 14 nov. 2025.



ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP8266EX Datasheet**. 2023. Disponível em: <https://www.espressif.com>. Acesso em: 18 nov. 2025.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas**. 6. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

GLOVER, J. D.; SARMA, M. S.; OVERBYE, T. J. **Power System Analysis & Design**. 5. ed. Stamford: Cengage Learning, 2012.

HÉRCULES MOTORES. **Catálogo de motores trifásicos e monofásicos**. Disponível em: <https://herculesmotores.com.br/arquivos/catalogo-trifasico-monofasico.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2025.

KHURSE, S.; NAIR, S.; SALAM, S.; HARDAS, V. **IOT Based Single phase Induction Motor Protection System**. IJRASET Journal For Research in Applied Science and Engineering Technology, 2022.

MALVINO, Albert Paul; BATES, David. **Eletrônica: Volume 1**. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST). **Guidelines for Industrial Control System Security**. NIST Special Publication 800-82, 2021. Disponível em: <https://www.nist.gov>. Acesso em: 18 nov. 2025.

NILSSON, James W.; RIEDEL, Susan A. **Circuitos elétricos**. 5. ed. São Paulo: Addison Wesley, 1999.

NODE-RED. **About Node-RED**. Disponível em: <https://nodered.org/about>. Acesso em: 16 nov. 2025.

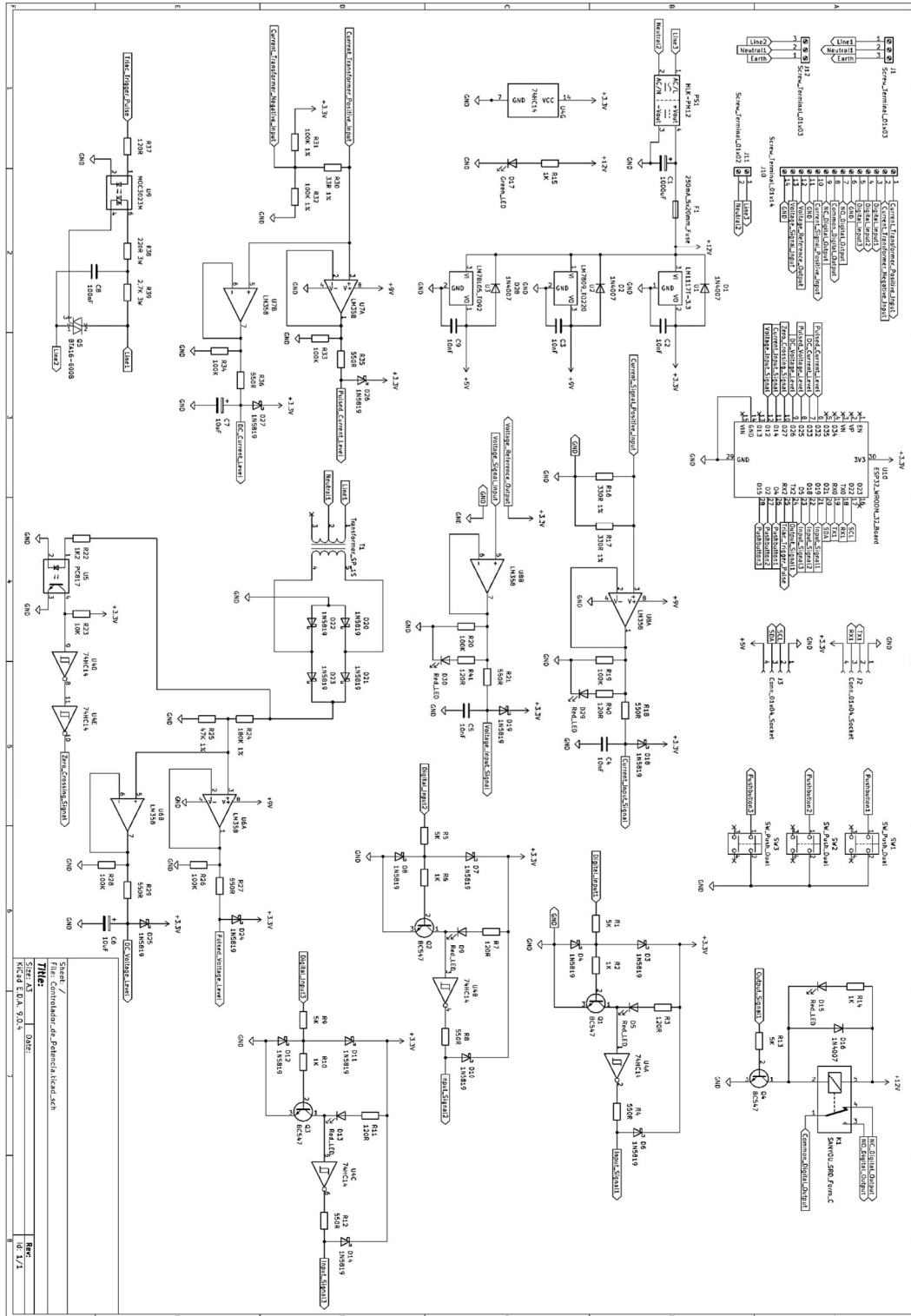
RASHID, Muhammad H. **Eletrônica de potência**. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2014.

SELLERS, B.; DOWNEY, A. **MQTT Applied: Building Reliable IoT Systems**. O'Reilly Media, 2020.

TAT, Lee S.; HAUR, Yiau K. **Remote AC Power Control by Using Microcontroller**. Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering (JTEC) [Internet], v. 8, n. 12, p. 53-58, dez. 2016. Disponível em: <https://jtec.utem.edu.my/jtec/article/view/1435>. Acesso em: 29 nov. 2025.

APÊNDICE A

Figura 22 - Esquemático elétrico do projeto desenvolvido.



Fonte: Os autores (2025).