

DESENVOLVIMENTO DE UM INTERRUPTOR INTELIGENTE SEM NEUTRO PARA INSTALAÇÕES ELÉTRICAS JÁ EXISTENTES

Vítor Nathan Zanella, Orientador Marcos Antonio Salvador
Instituto Federal de Santa Catarina
Câmpus Jaraguá do Sul – Rau – Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica
e-mail: vitor.nz@aluno.ifsc.edu.br
Trabalho de Conclusão de Curso – TCC – 19/02/2025

Resumo – Este trabalho consiste na concepção e desenvolvimento de um interruptor sem neutro, visando solucionar o desafio da automação residencial em instalações já existentes, onde ocorre a dificuldade de passar cabos adicionais nos eletrodutos, atendendo às necessidades de automação residencial de forma eficiente e prática. A proposta do interruptor inteligente sem neutro é viabilizar o comando local e remoto da iluminação sem a necessidade da utilização direta do fio neutro para energização do interruptor, oferecendo maior facilidade na instalação. O desenvolvimento consiste na utilização de um conjunto de diodos em dois arranjos série ligados em antiparalelo para que a queda de tensão resultante possa ser utilizada aplicada em um retificador e assim energizar o circuito do interruptor e efetuar o carregamento da bateria do protótipo. Os resultados obtidos demonstram a capacidade de carregamento da bateria, do interruptor desenvolvido, a partir do circuito implementado e também apresenta a solução de baixo consumo com a utilização do microcontrolador no modo “light sleep”, uma forma de *standby*, enquanto aguarda a chegada de algum comando.

Palavras-Chave – Automação Residencial, ESP8266 Interruptor Inteligente sem Neutro.

DEVELOPMENT OF A SMART SWITCH WITHOUT NEUTRAL FOR EXISTING ELECTRICAL INSTALLATIONS

This work consists of the design and development of a smart switch without neutral, aiming to solve the challenge of home automation in existing installations, where there is difficulty in passing additional cables in conduits, meeting the needs of home automation in an efficient and practical way. The purpose of the smart switch without neutral is to enable local and remote control of lighting without the need to directly use the neutral wire to energize the switch, offering greater ease of installation. The development consists of using a set of diodes in two series arrangements connected in anti-parallel so that the resulting voltage drop can be applied to a rectifier and thus energize the main circuit and charge the prototype's battery. The results obtained demonstrate the charging capacity of the battery, of the developed switch, from the implemented circuit and also present the low consumption solution using the

microcontroller in “light sleep” mode, a form of standby, while waiting for some command.

Keywords – ESP8266, Home Automation, Smart Switch without Neutral.

I. INTRODUÇÃO

A automação de equipamentos é considerada essencial atualmente para o desenvolvimento da sociedade e apresenta crescimento na área industrial e residencial, visto que fornece inúmeros benefícios, como aumento da eficiência, melhoria da qualidade, aumento da segurança, flexibilidade e redução de custos. No âmbito residencial a principal demanda por automação é a procura por comodidade e facilidade em executar tarefas, podendo realizá-las de forma programada, por comando de voz ou até mesmo de forma remota [1].

Um dos principais desafios encontrado pelas empresas e profissionais que realizam automação residencial é implementar os equipamentos em instalações já existentes.

A idade média dos imóveis brasileiros é de 25 anos, apresentando assim muita dificuldade de implementação de novas tecnologias, pois a demanda por pontos de tomada e tamanho de eletrodutos disponibilizados nas construções, muitas vezes não atendem as necessidades atuais [2]. Esses fatores motivam a busca por equipamentos que possam ser instalados sem demandar grandes alterações na instalação elétrica pré-existente.

Neste contexto, o desenvolvimento de equipamentos com capacidade de controlar de forma remota, os pontos de iluminação de instalações já existentes, é uma realidade crescente. Um exemplo são as lâmpadas inteligentes [3], que são uma opção no mercado nacional e internacional, no entanto permitem apenas o controle de forma remota e exclui a presença de um interruptor local, assim gerando incômodo aos seus usuários. Embora já existam interruptores inteligentes que resolvem esse problema das lâmpadas [4], a maior parte deles necessita da presença do neutro na instalação, dificultando a implementação ou até mesmo tornando impossível a instalação em eletrodutos já existentes, tornando a automação da casa muito mais custosa e lenta.

Os interruptores inteligentes têm se destacado como uma maneira eficiente de acionar a iluminação de forma remota. Diferentes concepções de interruptores inteligentes são exploradas nos projetos [5] - [7]. Em um dos projetos é desenvolvido um interruptor inteligente com neutro, utilizando um módulo EPS32, o qual é responsável pela conexão Wi-fi do interruptor, a alimentação do módulo

EPS32 é realizada por uma bateria, que por sua vez é carregada por uma micro-fonte TPS-05 de 5 V, alimentada diretamente pela rede [5]. O segundo projeto estudado apresenta melhorias, como a utilização do módulo IoT ESP01 [6]. Este módulo facilita a implantação do projeto devido ao seu tamanho reduzido em comparação ao ESP32. Outra vantagem ao usar este módulo é que ele requer uma fonte de alimentação que opere em 3,3V. Além disso, foi incluído no projeto um sensor de luminosidade, responsável por monitorar a variação da luminosidade da lâmpada, com intuito de informar de forma antecipada o fim de sua vida útil. Alternativamente em [7] é apresentado o protótipo de um interruptor inteligente sem neutro, que apresenta muitas características em comum com os anteriores. O dispositivo utilizado para conexão Wi-Fi neste projeto é o módulo ESP-01, devido ao seu baixo consumo de energia. No entanto, a alimentação da fonte não é realizada diretamente na rede elétrica, eliminando a necessidade do cabo de neutro. A alimentação da fonte é feita a partir de dois arranjos, séries de diodos conectados em antiparalelo, os quais são utilizados para gerar uma diferença de potencial para alimentação do circuito do interruptor.

O objetivo do presente trabalho consiste em desenvolver um interruptor inteligente que possibilite o acionamento local e/ou remoto, de pontos de iluminação em instalações já existentes, demandando apenas os condutores de fase e retorno para sua instalação.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Considerando que a presente proposta consiste no desenvolvimento de um interruptor inteligente sem neutro, são apresentados a seguir os principais aspectos a serem compreendidos no âmbito do projeto.

A. Sistema IOT:

Com a popularização da internet nas últimas décadas viabilizou a criação de mais equipamentos com instrumentos de conexão Wi-Fi [8]. Isso vem impulsionando o desenvolvimento e produção de mais sensores incorporados ao sistema, reduzindo os custos e gerando um cenário favorável para utilização do sistema IOT (Internet das Coisas).

O sistema IoT é um modelo de rede que possui a capacidade coletar informações e as enviar e receber informações e agir sobre elas, essa inovação pretende impactar como vivemos, trabalhamos e estudamos. Esse sistema é composto por três componentes, sendo eles dispositivos inteligentes, aplicação de IOT e interface gráfica entre o usuário [9].

Dispositivos inteligentes são encarregados pela coleta dos dados, como entradas do usuário, padrões de uso e comunicam os dados pela Internet através da aplicação IOT.

Aplicação IOT é responsável pela interconexão dos dispositivos e capacidade de processamento das tecnologias de machine learning, permitindo que os dados sejam interpretados de maneira inteligente, possibilitando a tomada de decisões automatizadas e otimizadas Interface gráfica do

usuário: Gerencia os aplicativos de IoT por meio de aplicativos ou sites, facilitando o registro, monitoramento e controle dos dispositivos inteligentes. Proporcionando ao usuário total controle sobre seus dispositivos inteligentes.

B. Acionamentos de lâmpadas LED por interruptor inteligente

A crescente preocupação com o meio ambiente as lâmpadas LED passaram a ser o principal modelo de lâmpada presente nas residências, esse modelo de lâmpada pode ser 85% mais eficiente que as lâmpadas incandescentes e pode chegar a até 50 mil horas de uso [13]. A ligação de lâmpadas LED por interruptores inteligente ocorre conforme a representação da figura 1:

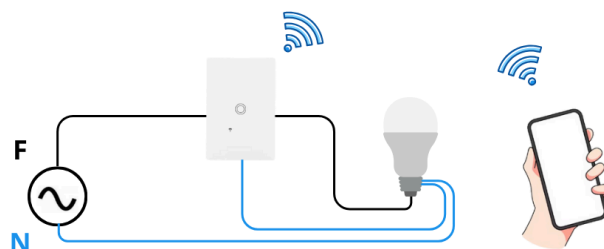


Fig. 1. Diagrama de ligação interruptor inteligente convencional (Com Neutro)

Para realizar o acionamento da lâmpada através do interruptor inteligente sem neutro é necessário entender o comportamento da lâmpada LED sem esta referência. Buscando a obtenção de sucesso ao acionar a lâmpada sem o cabo de neutro entre ela é o interruptor, é necessário a implementação de um neutro “fictício” no interruptor. Esse neutro fictício pode ser simulado através de um variedade de dispositivos, como uma fonte dedicada, banco de capacitores ou até mesmo com um banco de baterias.

A lâmpada LED é um componente eletrônico que consiste em transformar energia elétrica em luz de maneira eficiente. Para que um LED atinja o estado de emissão de luz, é essencial que ele receba uma corrente elétrica específica, conforme determinado pelo fabricante [10]. Esse componente tem como característica a capacidade de permitir a passagem de correntes menores, mesmo sem emitir luz visível, gerando possibilidade de aplicações criativas, como a conexão de equipamentos de baixa potência em série com a lâmpada.

Essa flexibilidade torna as lâmpadas LED uma escolha versátil em diversos cenários. Tornando possível sua utilização não apenas para iluminar ambientes, mas também para acionar dispositivos com baixo consumo de energia, como indicadores, sensores e pequenos aparelhos eletrônicos.

C - Circuito de alimentação do dispositivo IOT

O circuito de alimentação será responsável pelo carregamento da bateria, a qual é responsável por alimentar o dispositivo IOT. O principal desafio no desenvolvimento do circuito de alimentação é a exclusão do cabo neutro do mesmo. Para realizar o carregamento da bateria é

desenvolvido um circuito de alimentação composto por dois arranjos séries de diodos conectados em antiparalelo, gerando assim uma diferença de potencial, sendo esta retificada por um retificador em ponte completa com filtro capacitivo, que por sua vez alimenta o circuito de carregamento de uma bateria. A figura 2 apresenta um esboço do circuito de alimentação sem neutro, que é composto por dois arranjos séries de diodos conectados em antiparalelo D1 a DN e D2 a DN.

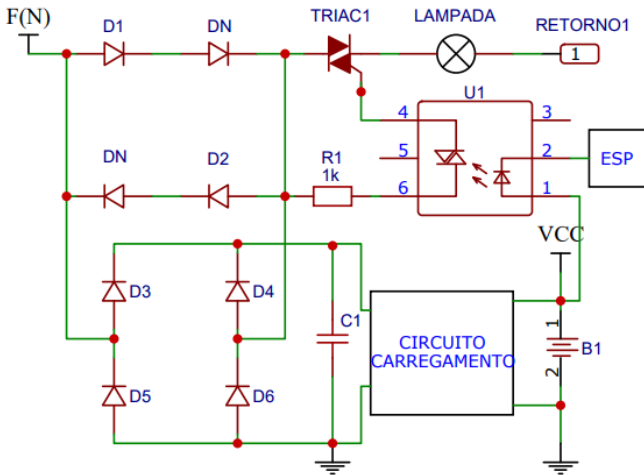


Fig. 2. Circuito de alimentação sem neutro

A queda de tensão nos diodos D1 a DN depende da potência da lâmpada conectada ao interruptor, pois a corrente da carga influencia na queda de tensão dos diodos como pode ser vista na figura 3.

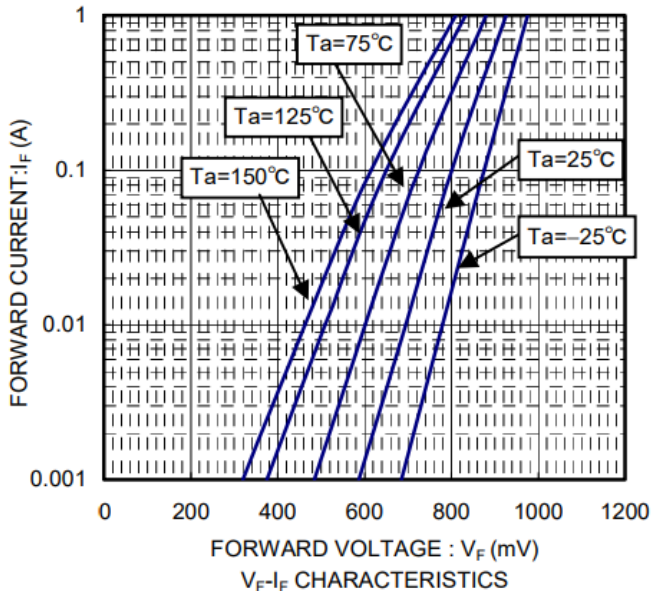


Fig. 3. Queda de tensão no diodo

Pode se observar que a queda de tensão no diodo aumenta com o aumento da corrente, sendo assim quanto maior a corrente da carga maior será a tensão na entrada da ponte

retificadora. Dessa forma, o valor de tensão retificada pode ser descrito por:

$$V_{ret} = V_p - \frac{\Delta V}{2} \quad (1)$$

Em que V_{ret} é a tensão de saída da ponte retificadora e V_p é a tensão obtida no arranjo de diodos de D1 a Dn. Logo V_p corresponde ao produto da tensão de condução de cada diodo (V_D) e o número de diodos (N), conforme descrito por:

$$V_p = (V_D \cdot N) \quad (2)$$

Já a ondulação de tensão, ΔV pode ser obtida através da equação (3), onde I representando a corrente consumida pela carga, F representando a frequência de ondulação e C representando a capacitância do capacitor conectado.

$$\Delta V = \frac{I}{F \cdot C} \quad (3)$$

No entanto, cabe destacar que só há queda de tensão no arranjo de diodos quando o interruptor estiver em condução, o qual ocorre quando o TRIAC estiver acionado.

D - Bateria

Considerando o dispositivo IOT em desenvolvimento é necessário a utilização de uma bateria compacta com tensão de 3,7V. Neste sentido uma das baterias que atenderem as necessidades seriam as baterias de íon de lítio, por exemplo baterias utilizadas em drones.

Para definir a bateria ideal é necessário conhecer algumas características, como a capacidade da bateria, a qual vai definir por quanto tempo a bateria vai fornecer energia antes de precisar ser recarregada, exigindo uma análise do consumo de energia do dispositivo conectado [10].

Outro aspecto importante a ser analisado é a tensão nominal da bateria, a qual deve ser compatível com a necessidade do dispositivo, enquanto a corrente de descarga máxima é importante para garantir o fornecimento adequado de energia durante o funcionamento.

A tensão máxima das baterias de lítio quando carregadas é de 4,2V e de 3V quando descarregadas por completo, podendo sofrer pequenas variações de acordo com o fabricante [11].

Visto que processo de carga e descarga da bateria é complexo envolvendo reações químicas internamente na bateria, necessitando assim de mecanismos de proteção para evitar a descarga da bateria em níveis críticos, assim como a sobrecarga no processo de carregamento [10].

III. DESENVOLVIMENTO

Este capítulo apresenta o desenvolvimento do projeto, bem como o dimensionamento dos componentes utilizados visando atender as especificações apresentadas na tabela I.

TABELA I
Requisitos de projeto

Acionamento local (Touch)	Sim
Acionamento remoto (Wi-Fi)	Sim
Conexões elétricas	Fase e retorno
Potência Mínima	9W
Potência Máxima	120W

O diagrama apresentado na figura 4 representa o esboço da proposta, que se concentra no desenvolvimento do interruptor com comunicação sem fio e um acionamento local via botão sem a necessidade do neutro na energização do interruptor.

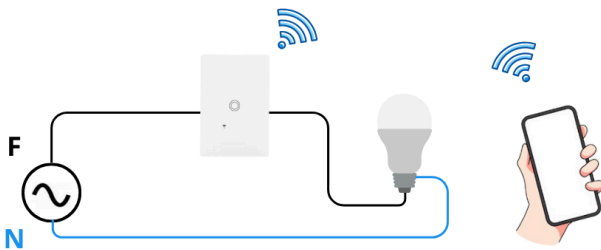


Fig. 4. Diagrama de ligação interruptor inteligente sem neutro

O circuito do interruptor proposto pode ser dividido em quatro etapas: circuito de retificação, carregamento, processamento e acionamento da carga.

A. Circuito de retificação

Conforme já apresentado na figura 2, o circuito de alimentação do interruptor é composto por dois arranjos séries de diodos conectados em antiparalelo D1 a DN e D2 a DN, responsáveis por alimentar o circuito de carregamento, através da queda de tensão gerada pelo arranjo de diodos a qual é retificada por um retificador em ponte completa com filtro capacitivo.

Os diodos utilizados no arranjo série paralelo serão do modelo 1SR154-600 devido ao seu tamanho reduzido e disponibilidade.

Devido a influência da corrente da carga na queda de tensão dos diodos, o dimensionamento do arranjo deve considerar o valor máximo e mínimo de potência, que são respectivamente de 120 W e 9 W.

Para o dimensionamento do circuito é importante conhecer os valores de corrente para os limite de carga:

$$I_{min} = \left(\frac{9}{220} \right) = 40,91 \text{ mA} \quad (4)$$

$$I_{max} = \left(\frac{120}{220} \right) = 545,45 \text{ mA} \quad (5)$$

Com o modelo de diodo definido é possível calcular através das equações (1) e (2), os valores de tensões retificadas obtidas em função da quantidade de diodo utilizado no circuito. Considerando o emprego de 14 diodos e a variação da queda de tensão dos diodos em função da corrente, conforme Figura 3, pode se estimar V_{pmin} e V_{pmax} adotando a curva de temperatura de 75oC:

$$V_{pmin} = (V_D \cdot N) = 0,65 \cdot 14 = 9,1 \text{ V} \quad (6)$$

$$V_{pmax} = (V_D \cdot N) = 0,82 \cdot 14 = 11,48 \text{ V} \quad (7)$$

A ondulação de tensão é obtida através da equação (3), onde I representa a corrente consumida pelo módulo carregador de tensão TP4056, o qual fornece uma corrente de até 1A, quando a bateria está totalmente descarregada e vai reduzindo à medida que a bateria vai sendo carregada, podendo chegar a correntes inferiores a 0,1A. A equação (8) representa o cálculo da ondulação de tensão média do carregador de 0,5 A [14].

$$\Delta V = \frac{0,5 \text{ A}}{120 \text{ Hz} \cdot 1000 \mu\text{f}} = 4,17 \text{ V} \quad (8)$$

Substituindo as equações (6), (7) e (8) em (1) são obtidos os valores das tensões retificadas em função da quantidade de diodo utilizado no circuito.

$$V_{ret_min} = 9,1 \text{ V} - \frac{4,17 \text{ V}}{2} = 7,02 \text{ V} \quad (9)$$

$$V_{ret_max} = 11,48 \text{ V} - \frac{4,17 \text{ V}}{2} = 9,40 \text{ V} \quad (10)$$

Analisando o V_{ret_min} percebe-se que tensão está de acordo para o funcionamento do circuito integrado (CI) de carregamento TP4056, que opera na faixa de 4 V a 8 V [14]. Já V_{ret_max} ultrapassa este valor, e deste modo, para adequar os níveis de tensão de entrada do CI, é empregado um regulador de tensão 7805 no circuito, como pode ser visto no diagrama do Apêndice A.

B. Circuito da bateria

O circuito de carga foi embasado no circuito integrado TP4056 conforme apresentado na Figura 5. O circuito é composto por U3 chip controlador de carga TP4056, o qual gerencia o controle da corrente e tensão durante o carregamento, contando com um regulador de tensão LM7805 para garantir que a tensão de alimentação do circuito não ultrapasse 5 V.

O circuito é complementado por componentes externos, como os capacitores de desacoplamento C2 e C3, ambos de 10 μ F, utilizados para reduzir a tensão em pontos específicos do circuito. O resistor R3, com valor de 0,4 Ω , conforme especificado no datasheet do fabricante, é empregado para limitar a corrente. O resistor de *pull-down* R6, com valor de 1,2 Ω é responsável por manter o pino PROG em estado lógico baixo quando não há alimentação ou sinal de entrada. Para indicar o estado da bateria, são utilizados dois LEDs: LED1 conectado ao pino STDBY indica que a bateria está completamente carregada e o LED2 conectado ao pino CHGR indica que a bateria está em processo de carregamento.

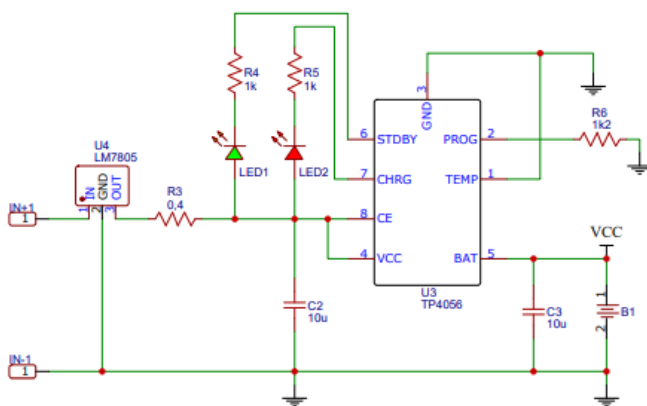


Fig. 5. Circuito de carregamento

C. Processamento e Programação do Dispositivo

A programação desenvolvida para o interruptor inteligente foi implementada a partir do *software* Arduino IDE, na linguagem de programação C++, visando a aplicação do microcontrolador ESP01. A lógica de funcionamento está representada no fluxograma do Apêndice B, e consiste na inicialização das variáveis, conexão com a rede local, seguindo com a leitura de possíveis eventos de comando, via botão ou Wi-fi. Na sequência, é atualizado o estado da lâmpada e o microcontrolador entra no modo “Light Sleep”, e fica aguardando a chegada de um novo evento.

O comando local ocorre a partir do acionamento de botão *touch* disponível no interruptor. Esse botão envia um sinal para o pino RXD do ESP01, cuja leitura resulta na alteração do estado da lâmpada para ligado ou desligado, e armazenando-o na EEPROM. Alternativamente, o comando também pode ser efetuado remotamente através de uma página *WEB* hospedada pelo ESP01, possibilitando que o usuário ligue e desligue a lâmpada a partir de um *smartphone*, por exemplo. Além disso, por meio da interface

WEB o usuário pode além de alterar, verificar o estado da lâmpada em tempo real.

Para reduzir o consumo de energia do interruptor desenvolvido, foi implementada a operação do ESP01 no modo “*Light Sleep*”, o qual diminui consideravelmente o consumo do microcontrolador durante *standby*, sem comprometer o acionamento do mesmo de forma local ou Wi-fi. O microcódigo completo desenvolvido pode ser visto no Apêndice C.

D. Acionamento do dispositivo

O circuito de acionamento visa energizar a lâmpada a partir de duas interfaces de comando, a partir de um comando local e um comando remoto (Wi-Fi). O acionamento Wi-Fi é realizado através do controlador ESP01 que ao receber um sinal Wi-fi aciona o GPIO0, o qual ativa o LED interno do optoacoplador MOC3021, representado como U1, permitindo que o circuito estabeleça o acionamento do TRIAC BT137, representado como TRIAC1.

O acionamento local é realizado através do módulo touch TTP223, representando como U2, assim que o botão é acionado ele emite um sinal para a saída OUT, a qual emite um sinal para porta RXD do ESP01, acionando a GPIO0 e a lâmpada, seguindo o mesmo fluxo do acionamento remoto, conforme ilustrado na Figura 6:

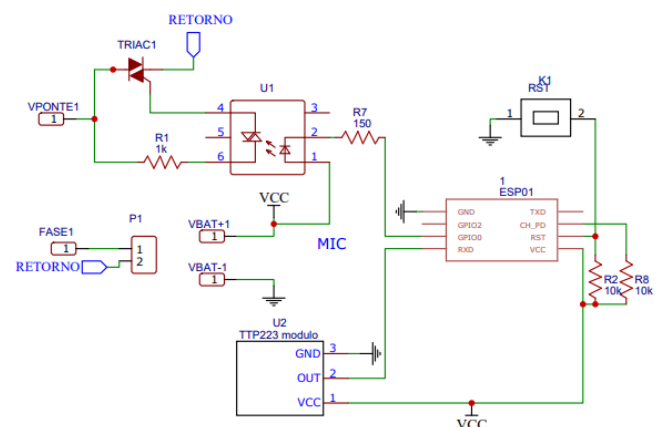


Fig. 6. Circuito de acionamento.

Conforme ilustrado na Figura 6, são necessários outros componentes para realização do acionamento. Os resistores R2 e R8 (10 k Ω) são resistores de *pull-up* empregados para garantir nível baixo nos pinos RST e CH-PD respectivamente. O resistor R7 (150 Ω) é empregado para limitar a corrente no LED do optoacoplador. Já o resistor R1 (1 k Ω) limita a corrente para o TRIAC do optoacoplador.

E. Construção do Protótipo

O principal desafio encontrado para concepção do protótipo é a limitação de espaço. O interruptor foi projetado para ser embutido em uma caixa de luz padrão 4x2, com dimensões de 99 mm de altura, 57 mm de largura e 52 mm de profundidade.

Para atender a restrição de espaço foi necessário dividir o circuito em duas placas dispostas em sanduíche. A placa inferior, com dimensões de 70 mm de altura e 40 mm de largura, é composta pelo arranjo de diodos em série conectados em antiparalelo e o circuito de retificação. Enquanto a placa superior, com as mesmas dimensões, acomoda o circuito de carregamento da bateria, circuito de acionamento da lâmpada, microcontrolador e botão *touch*, conforme ilustrado na figura 7.

Com o sanduíche de placas montado, foi possível observar que havia espaço para alocação da bateria no verso da placa inferior, otimizando ainda mais o uso do espaço. Essa disposição resultou em um conjunto final com 70 mm de altura, 40 mm de largura e 35 mm de profundidade, atendendo às dimensões da caixa de luz 4X2. A Figura 8, apresenta o protótipo completo montado.

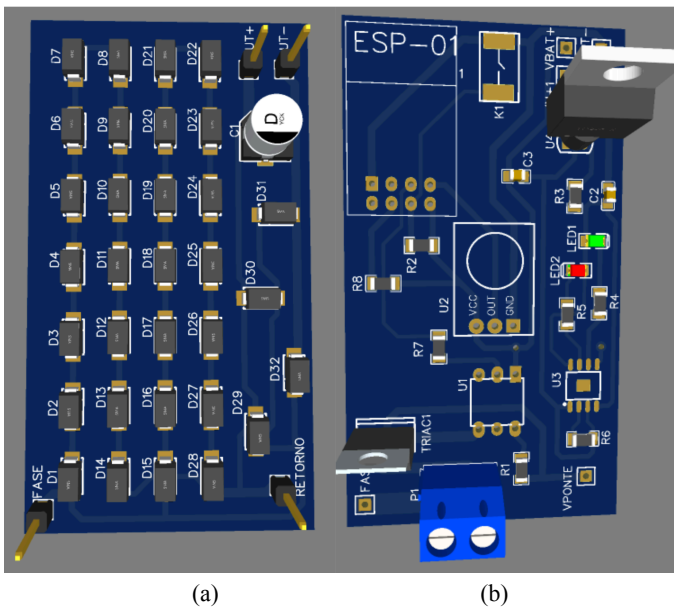


Fig. 7. Placas do protótipo. a) Placa inferior. b) Placa superior.

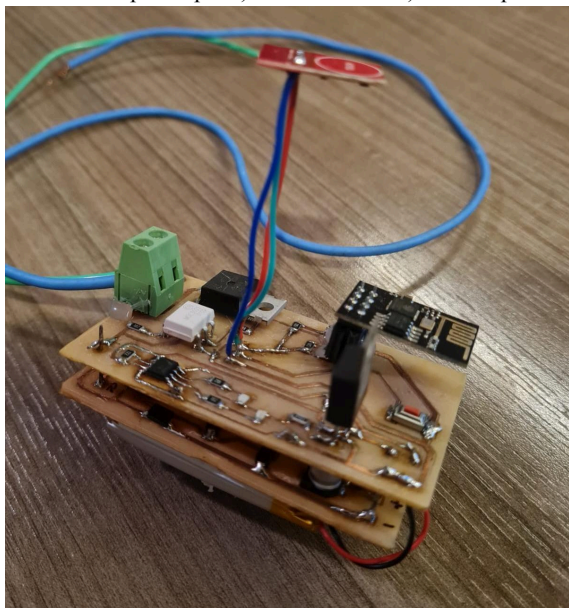


Fig. 8. Interruptor montado.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Essa seção apresenta os resultados práticos obtidos, sendo eles divididos em tensão do arranjo de diodos, tensão retificada, corrente de saída do retificador, verificação da funcionalidade de comando local e remoto, corrente de consumo do ESP modo normal e modo *sleep*.

A. Tensão do arranjo de diodos

Para obtenção dos resultados de tensão do arranjo de diodos, foi realizada a medição para condição de potência mínima e máxima da lâmpada, sendo elas de 9W e 120W, com temperatura ambiente de 20°C. Conforme pode ser observado nas figuras 9 e 10:

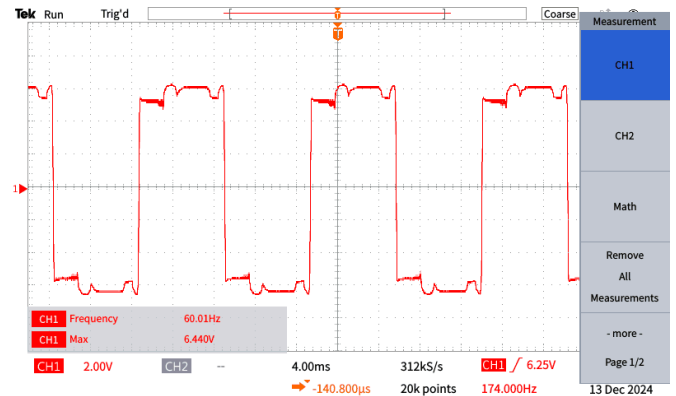


Fig. 9. Tensão arranjo de diodo para carga mínima (VP_min)

A partir dos resultados apresentados na Figura 9 pode-se observar que para carga de 9W a tensão de pico foi igual a 6,44 V. A forma de onda apresenta pulsos regulares, com frequência de 60 Hz, consistente com a rede elétrica. A tensão RMS é visivelmente menor devido a baixa amplitude do sinal.

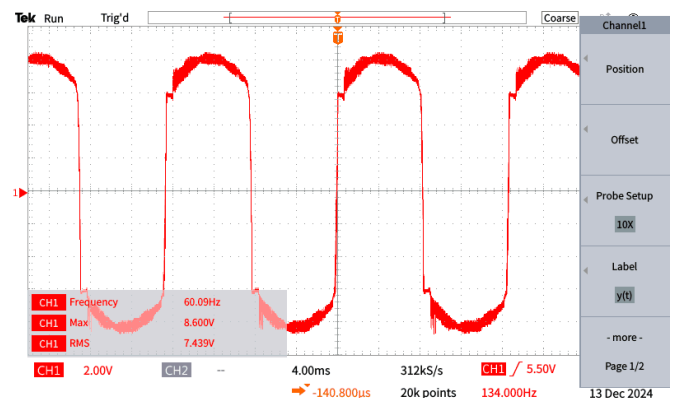


Fig. 10. Tensão arranjo de diodo para carga máxima (VP_max)

Observando a figura 10, observa-se que com o aumento da carga, a corrente no circuito também aumenta, resultando em uma tensão maior, sendo VP_max igual a 8,60 V e tensão RMS de 7,43 V. A forma de onda apresenta pulsos de maior amplitude, indicando um aumento na corrente que percorre o arranjo de diodos.

Comparando V_{P_min} e V_{P_max} confirma-se que a saída V_{ret} apresenta uma relação direta com a potência da carga conectada. Reforçando a importância da definição da carga mínima de máxima da carga para os dimensionamentos componentes.

B. Tensão retificada com carga mínima e máxima.

A medição da tensão retificada foi realizada para duas potências de carga, mínima de 9 W e máxima de 120 W, conforme pode ser observado nas figuras 11 e 12:

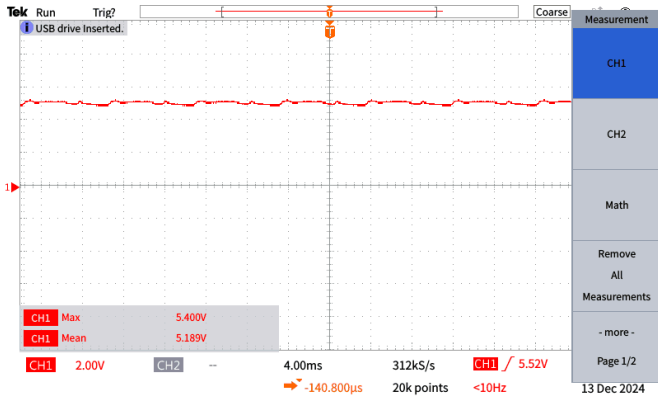


Fig. 11. Tensão retificada com carga mínima (V_{ret_min}).

Analisando a Figura 11 pode se observar a tensão retificada para carga mínima, sendo a tensão de pico é de 5,4 V e tensão média de 5,19 V com baixa ondulação.

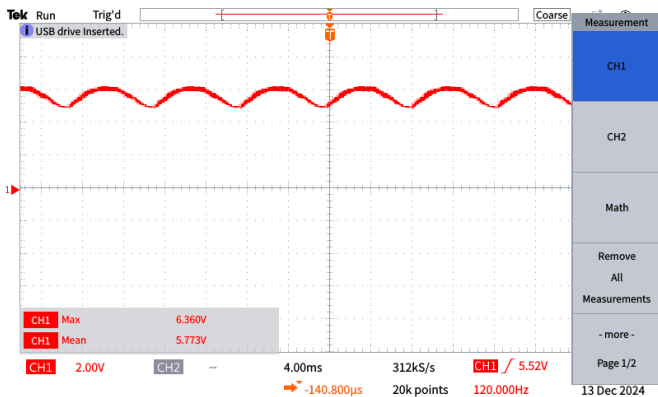


Fig. 12. Tensão retificada com carga máxima (V_{ret_max}).

Analisando a Figura 12 observa-se a tensão retificada para carga máxima, sendo a tensão de pico de aproximadamente 6,36 V e a tensão média de 5,77 V.

Comparando os resultados práticos com os resultados teóricos obtidos nas equações 9 e 10, observa-se que os valores medidos são inferiores aos previstos, dispensando a necessidade do regulador de tensão, visto que a tensão obtida fica dentro da faixa de operação do carregador.

A diferença entre os resultados é devido às diferentes condições, como diferença de temperatura do laboratório de 20°C em comparação a temperatura de 75°C considerada nos cálculos, influenciando na queda de tensão dos diodos conforme demonstrado na Figura 3.

Os resultados medidos foram realizados com a bateria com carga baixa, fazendo com que a corrente de ΔV se aproximasse do valor máximo de 1A, diminuindo assim a tensão retificada, conforme representado na equação (1).

Contudo é importante a implementação do regulador de tensão visto que tensão retificada varia de acordo com a carga conectada e temperatura.

C. Corrente de saída no retificador

Para avaliar a capacidade de carregamento do retificador foram realizadas medições de corrente na saída do mesmo para carga mínima e máxima, respectivamente de 9 W e 120W, através de um multímetro Minipa ET-2042F, conforme apresentados nas Figuras 13 e 14.

A Figura 13 demonstra o valor medido na saída do retificador sob condição de carga mínima, igual a 28,9 mA. Este resultado é relativamente baixo, demonstrando como a carga conectada influencia diretamente na corrente retificada.

No entanto, a Figura 14, apresenta o valor medido na saída do retificador sob condição de carga máxima, igual a 292,8 mA. Para carga máxima a corrente retificada aumenta consideravelmente. A diferença entre os valores medidos para carga mínima e máxima evidenciam o impacto da carga sobre o desempenho do interruptor, sendo essencial considerar esses parâmetros para o dimensionamento do circuito.

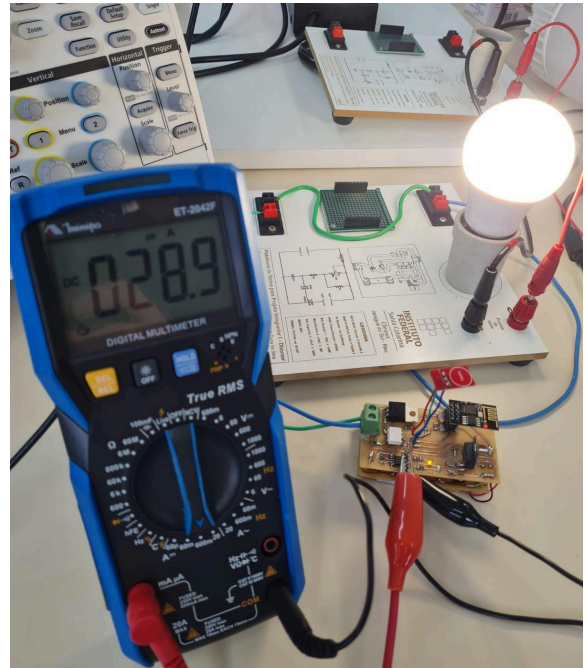


Fig. 13. Corrente na saída do retificador para carga mínima.

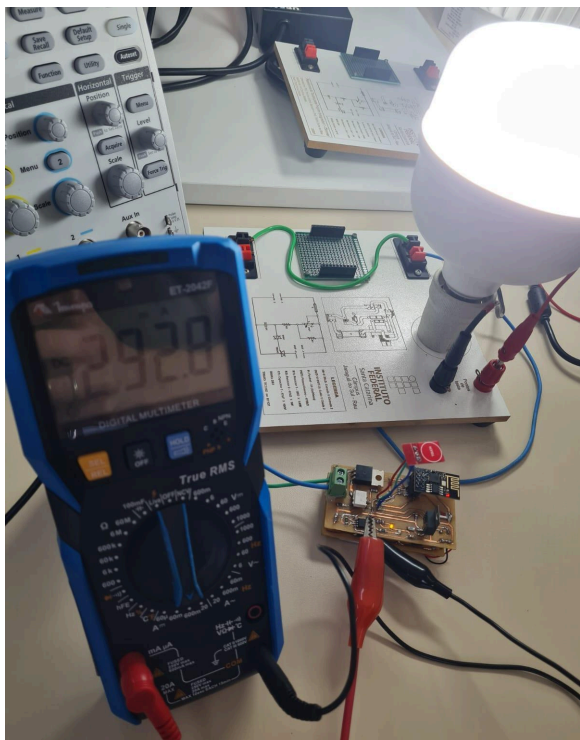


Fig. 14. Corrente na saída do retificador para carga máxima.

D. Verificação da funcionalidade de comando local e remoto

Com o protótipo montado foram realizados testes para verificar o acionamento do interruptor de forma local e de forma remota. No comando local o interruptor tem seu acionamento realizado através de um botão touch capacitivo, o qual cumpriu sua função ligando e desligando a lâmpada instantaneamente.

O teste de acionamento remoto foi realizado através da comunicação do ESP com a rede Wi-fi, permitindo a sua operação através de interface web, conforme apresentado na Figura 15. Na realização dos testes o interruptor foi comandado várias vezes, resultando no acionamento e desligamento da carga sem atrasos significativos, validando seu funcionamento através do toque local e comando remoto.

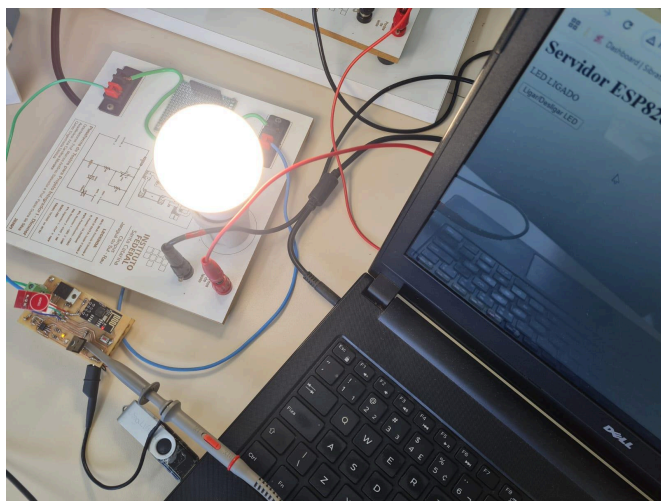


Fig. 15. Verificação da funcionalidade de comando local e remoto.

E. Corrente de consumo do ESP modo normal e *light sleep*.

O consumo do ESP varia conforme o momento de operação e modo de acionamento. No modo normal com Wi-fi ativo o ESP01 possui um consumo que varia de 70 mA a 200 mA, com picos durante as transmissões Wi-fi [12].

Durante a realização das medições práticas para modo normal foram encontrados os valores de 73 mA de consumo e picos de até 167 mA, que representa um valor considerável para o projeto em questão.

Com o intuito de reduzir o consumo do ESP foi realizada a programação no modo *light sleep*, onde o consumo varia entre 0,9 mA e 1,2 mA, mantendo o Wi-Fi ativo enquanto o processador é colocado em um estado de baixo consumo [12].

Para demonstrar o impacto na autonomia do ESP no modo *light sleep* foi calculada a autonomia do dispositivo sem carregamento. Considerando que o interruptor possui uma bateria de lítio com capacidade de carga de 800 mAh. Supondo que o mesmo permaneça 99,5% do tempo em estado *light sleep* com consumo médio de 1,2 mA e supondo 0,5% do tempo ativo com consumo de 170 mA, é possível estimar a corrente ponderada drenada através da equação (11).

$$(99,5\% \cdot 1,2 \text{ mA}) + (0,5\% \cdot 170 \text{ mA}) = 2,04 \text{ mA} \quad (11)$$

Considerando que a bateria do interruptor desenvolvido é carregada somente enquanto a lâmpada (cargas) está acionada, é importante estimar a autonomia do total do dispositivo para os casos em que possa ficar longos períodos sem uso, pois neste caso a alimentação deve ser garantida somente pela carga disponível na bateria de 800 mAh. Logo, se considerado um consumo de corrente na ordem de 2,04 mA, pode se estimar a autonomia do circuito conforme a equação (12):

$$\frac{800 \text{ mAh}}{2,04 \text{ mA}} \approx 392 \text{ horas} \approx 16,33 \text{ dias} \quad (12)$$

Desta forma, estima-se que o protótipo com uma bateria de 800 mAh pode funcionar por aproximadamente 392 horas sem a necessidade de carregamento, operando no modo *light sleep*.

V. CONCLUSÕES

O desenvolvimento de um protótipo de interruptor inteligente sem neutro foi realizado com o intuito de minimizar os empecilhos de implementar a automação residencial em instalações já existentes. O protótipo demonstrou sua capacidade de viabilizar o acionamento local e remoto de lâmpadas, sem a necessidade de alterações na infraestrutura elétrica, ou seja, sem a necessidade de um condutor de neutro, conectado ao interruptor.

Além disso, os testes realizados demonstraram a capacidade de energização e carregamento da bateria do dispositivo desenvolvido, a partir do circuito construído. No entanto, por se tratar de um circuito alimentado por bateria,

cujo carregamento ocorre somente enquanto a carga (lâmpada) estiver ligada, foi necessário reduzir o consumo de corrente do interruptor inteligente durante seu período de inatividade, mas mantendo-o pronto para uso assim que fosse requisitado de forma local ou até mesmo remota. Neste sentido, foi implementado o modo de funcionamento foi “*light sleep*” para o microcontrolador do ESP01, permitindo uma redução considerável da corrente drenada da bateria durante a ociosidade do protótipo.

Apesar do protótipo ter atendido aos requisitos estabelecidos, acionando lâmpadas com potências entre 9W e 120W, e ter demonstrando estabilidade e regularidade nos comandos efetuados com diferentes potências de carga, foi possível perceber a influência direta das cargas no circuito de energização e carregamento da bateria, resultando na alteração da tensão de saída do retificador de forma proporcional à potência da carga acionada pelo interruptor, influenciando diretamente no sistema de carregamento da bateria.

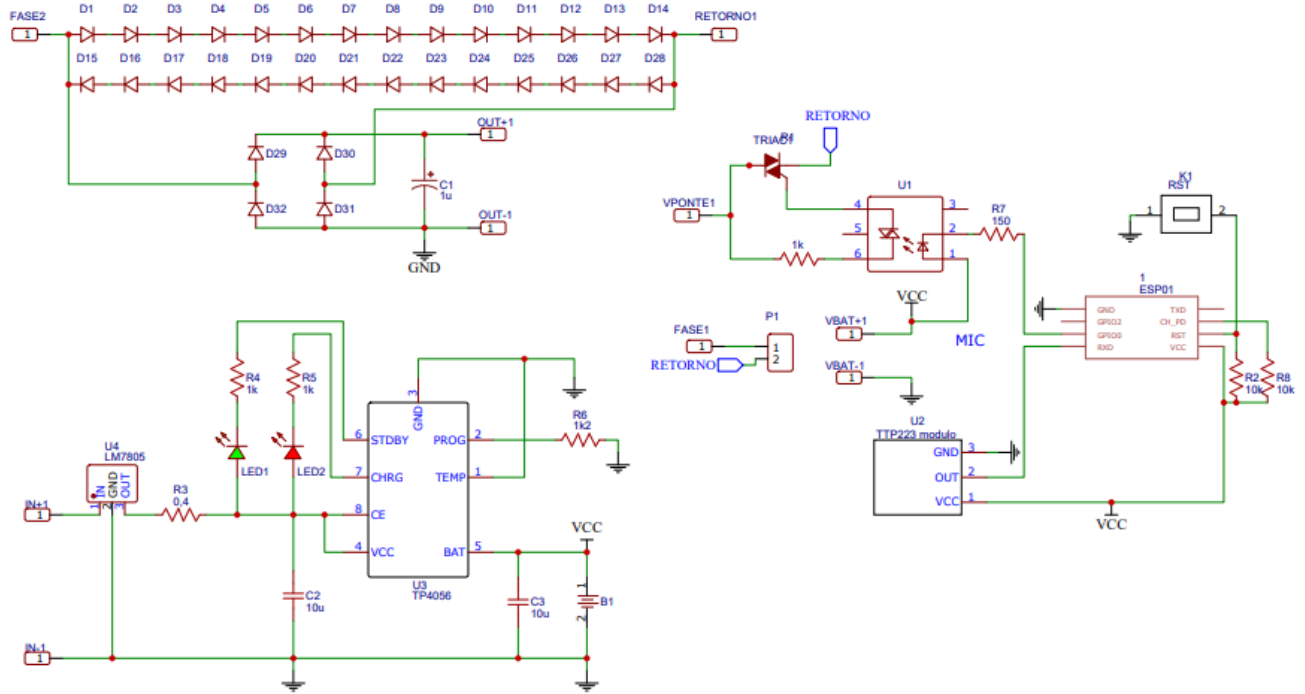
Dentre as principais possibilidades de aperfeiçoamento, do projeto pode se citar a utilização de componentes SMD ainda menores e o desenvolvimento de uma única placa dupla face reduzindo assim o tamanho do produto e ainda facilitando a montagem do conjunto em contraste ao agrupamento “sanduíche” de placas, produzido durante a prototipagem deste trabalho. Uma outra possibilidade de melhoria inclui o aumento do número de diodos no conjunto série e antiparalelo, aumentando assim a tensão na saída do retificador principalmente nos casos do acionamento de cargas de menor potência. Além disso, a utilização de uma bateria com maior capacidade de carga, 2000 mAh por exemplo, pode ampliar a autonomia do dispositivo e melhorar sua confiabilidade no caso de longos períodos de inatividade do interruptor. Por fim, a interface de acionamento remoto também pode ser melhorada com desenvolvimento de aplicativos dedicados e melhoria no acesso remoto com a hospedagem em servidores mais elaborados.

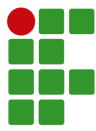
REFERÊNCIAS

- [1] SANTOS, Jean Willian; LARA JUNIOR, Renato Capelin de. Sistema de automatização residencial de baixo custo controlado pelo microcontrolador ESP32 e monitorado via smartphone. 2019. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Automação Industrial) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2019.
- [2] Idade média dos imóveis no Brasil é de 25 anos, aponta pesquisa. Disponível em: <https://exame.com/mercado-imobiliario/idade-media-dos-imoveis-no-brasil-e-de-25-anos-aponta-pesquisa/>. Acesso em: 31 maio 2023.
- [3] MOREIRA, B. O setor elétrico. IoT é a nova revolução tecnológica. Santa Cecília, São Paulo, v. 123, n. 11, p. 58-61, abr. 2016.
- [4] Como funciona o interruptor inteligente? Blog Intelbras, 22 mar. 2022. Disponível em: <https://blog.intelbras.com.br/como-funciona-o-interruptor-inteligente/>. Acesso em: 30 maio 2023.
- [5] DÍAZ ÁVILA, S. F.; INGRAM, B. R. EcoLight: Interruptor inteligente para o uso eficiente de luz elétrica. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidad de Talca, Talca, Chile, 2016.
- [6] TORREZAN, J. P. D. Interruptor inteligente controlado via rede. 2021. Monografia (Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação) – Universidade de São Paulo, São Paulo, out. 2021.
- [7] BERLANGA, F. de M. P. Sistema de controle de iluminação para instalações existentes. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Manufatura Avançada) – Faculdade de Tecnologia de Garça “Deputado Júlio Julinho Marcondes de Moura” São Paulo, 29 nov. 2021.
- [8] Afinal, o que é IoT? Conceito e aplicação. VIA Estação Conhecimento, 14 nov. 2019. Disponível em: <https://via.ufsc.br/afinal-o-que-e-iot/>. Acesso em: 30 maio 2023.
- [9] O que é IoT – Explicação sobre a Internet das Coisas. AWS. Disponível em: <https://aws.amazon.com/pt/what-is/iot/>. Acesso em: 30 maio 2023.
- [10] TP4056 - Laboratório de hardware de código aberto EasyEDA. Disponível em: https://oshwlab.com/Little_Arc/TP4056. Acesso em: 9 maio 2024.
- [11] WOLLINGER, L. Baterias de lítio-íon: um guia completo. Embarcados, 2019. Disponível em: <https://embarcados.com.br/baterias-de-litio-ion-um-guia-completo/>. Acesso em: 9 maio 2024.
- [12] MESQUITA, J. et al. Avaliando o módulo WiFi ESP8266 para a Internet das Coisas. In: 2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). IEEE, 2018. p. 784-791.
- [13] FRAGOSO, A. et al. Análise do efeito flicker em lâmpadas domésticas do mercado brasileiro. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE, v. 1, n. 1, 2020.
- [14] TP4056 – Linear Li-Ion Battery Charger. Disponível em: <https://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Prototyping/TP4056.pdf>. Acesso em: 4 fev. 2025.

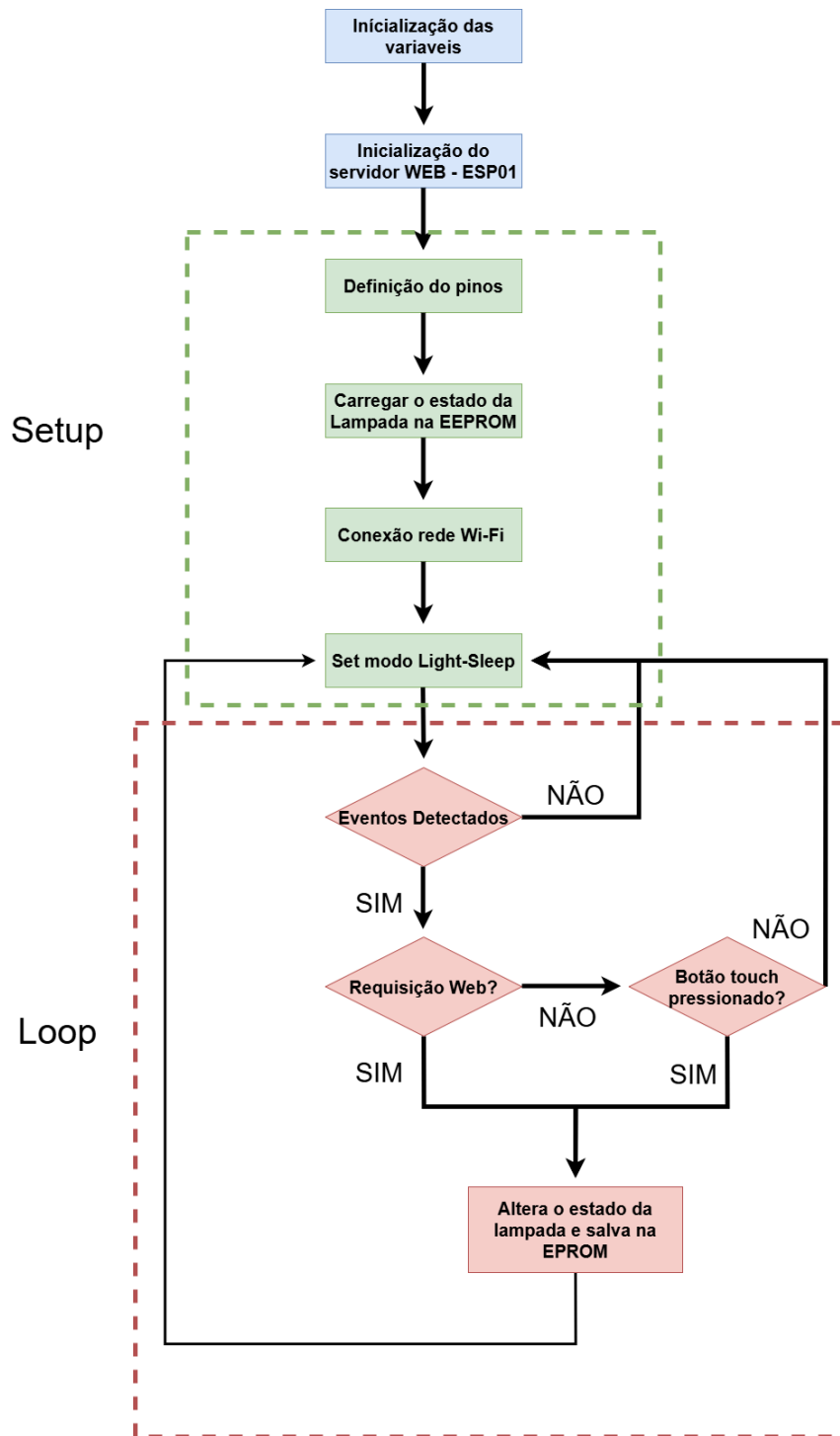


APÊNDICE - A
Diagrama esquemático completo





APÊNDICE - B
Fluxograma programação





APÊNDICE - C
Microcódigo desenvolvido

```
#include <ESP8266WiFi.h>
#include <ESP8266WebServer.h>
#include <ESP8266mDNS.h>
#include <EEPROM.h>

const char *ssid = "REDE";
const char *password = "SENHA";
ESP8266WebServer server(80);
const int lampPin = 0;
const int touchPin = 3;
bool ledState = false;
bool lastTouchState = HIGH;
void saveLedState() {
    EEPROM.begin(1);
    EEPROM.write(0, ledState);
    EEPROM.commit();
}
void loadLedState() {
    EEPROM.begin(1);
    ledState = EEPROM.read(0);
}
void handleRoot() {
    String html = "<html><body>";
    html += "<h1>Servidor ESP8266</h1>";
    html += "<p>LED <span id='ledState'>" + String(ledState ?
"LIGADO" : "DESLIGADO") + "</span></p>";
    html += "<p><button onclick='toggleLed()'>Ligar/Desligar
LED</button></p>";
    html += "<script>";
    html += "function toggleLed() {";
    html += "    var xhr = new XMLHttpRequest();";
    html += "    xhr.open('GET', '/toggle', true);";
    html += "    xhr.onreadystatechange = function () {";
    html += "        if (xhr.readyState == 4 && xhr.status == 200) {";
    html += "            var response = JSON.parse(xhr.responseText);";
    html += "            document.getElementById('ledState').innerText =
response.ledState ? 'LIGADO' : 'DESLIGADO';";
    html += "        }";
    html += "    }";
    html += "    xhr.send();";
    html += "};";
    html += "</script>";
```



```
html += "</body></html>";
server.send(200, "text/html", html);}
void writeLed() {
    digitalWrite(lampPin, ledState ? LOW : HIGH);}
void toggleLed() {
    ledState = !ledState;
    writeLed();
    saveLedState();
    String message = "{ \"ledState\": ";
    message += (ledState ? "true" : "false");
    message += " }";
    server.send(200, "application/json", message);
}
void setup() {
    pinMode(lampPin, OUTPUT);
    pinMode(touchPin, INPUT_PULLUP);
    loadLedState();
    writeLed();
    WiFi.mode(WIFI_STA);
    WiFi.begin(ssid, password);
    WiFi.setSleepMode(WIFI_LIGHT_SLEEP); // Light Sleep automático
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        delay(500);
    }
    if (MDNS.begin("esp8266")) {
        MDNS.addService("http", "tcp", 80);
    }
    server.on("/", handleRoot);
    server.on("/toggle", toggleLed);
    server.begin();
}
void loop() {
    server.handleClient();
    MDNS.update();
    bool touchState = digitalRead(touchPin);
    if (touchState == LOW && lastTouchState == HIGH) {
        ledState = !ledState;
        writeLed();
        saveLedState();
        delay(50);
    }
    lastTouchState = touchState;}
```