

Sistema de Controle de Energia Elétrica com Otimização de Corrente DC e RFID

Bruno Seiji Onouye Fujihara, Felipe Oliveira Marto, Gabriel Ferraioli, Henrique Moreira Couto Santos, Guilherme Marcondes Perez, Marcel Stefan Wagner

Universidade Anhembi Morumbi (UAM)
Departamento de Engenharia Elétrica

Resumo — Nos últimos anos, o mercado de automação residencial no Brasil tem crescido exponencialmente, conseqüentemente é observado um grande aumento em sua demanda e consumo. O objetivo deste estudo foi desenvolver um equipamento que possibilita a redução de custos, mantenha a eficiência e segurança, além de integrá-lo a um sistema domiciliar, com o uso de corrente contínua, providenciando mais comodidade com a capacidade de monitoramento e controle. Sendo assim, foi planejado um sistema de fonte chaveada robusto com PFC (*Power Factor Correction*) ativo que providencie o fornecimento de energia adequado para todos os equipamentos conectados e configurados para o uso. Foi montado um projeto e executado teste de uma central para o fornecimento de energia em outros equipamentos, mostrando uma redução dos custos de até 80%.

Palavras-Chave — Automação Residencial. Domótica. Corrente DC. Fonte de alimentação.

I. INTRODUÇÃO

Desde 2019 a expansão da automação residencial se fortaleceu com a adição de assistentes de voz em português, como exemplo a Alexa da Amazon, um dos principais impulsionadores do mercado de autoatendimento. Enquanto os mercados tradicionais seguem o ritmo de crescimento do PIB, o mercado de residências inteligentes deverá crescer cerca de 178%, considerando 2021 como ano base conforme dados da AURISIDE (Associação Brasileira de Automação Residencial e Predial) repassados no *Finder Talks* de 1 de junho de 2021[1]. Analisando o desenvolvimento do mercado de Domótica (Sinônimo de automação residencial) nos últimos anos, verificado que o número de fabricantes presentes no mercado cresceu rapidamente, este crescimento é associado este com os benefícios encontrados pelo consumidor e a crescente evolução tecnológica, gerando maior procura neste mercado. No entanto devido à falta de profissionais qualificados na área, não há possibilidade de atender toda a demanda, limitando a disponibilidade e aumentando o custo para a implementação conforme indicado por José Roberto Muratori na publicação da AECweb [2].

Desta forma, é identificado a necessidade de sistemas de automação com maior acesso ao consumidor, com o Foco na emergência de técnicas e tecnologias com o objetivo na redução de custo, consumo e mão de obra. Com esta visão para reduzir perdas, simplificar o processo de instalação e aumentar a potência fornecida podem ser utilizadas técnicas de unificação de fornecimento como o projeto das fontes ATX12VO revisadas pela fabricante de chips Intel [3] e com uma análise de seu protótipo no LinusTechTips [4] buscando se adequar de

acordo com as regulamentações energéticas de diversos países, como também o uso de corrente contínua nos servidores aumentando sua eficiência em 15.3% ao reduzir passos de conversão de acordo com Eduardo Fagundes do *Datacenter Road Show* [5], sendo possível viabilizar o uso de 48V para aumentar a potência fornecida e reduzir os efeitos da Perda Joule conforme ROBERT GENDRON, vice-presidente da VICOR [6].

Com base nestes itens, o projeto propõe desenvolver um sistema de automação doméstica que forneça e monitore a energia dos componentes do sistema de forma unificada e informe de forma clara o status de todos os componentes da rede para o usuário.

II. OBJETIVOS

Este trabalho tem como fim reduzir os custos de um sistema voltado a domótica, através de uma central de fornecimento de energia.

Utilizando técnicas de filtragem e correção de fator de potência em um sistema embutido, a fim de retirar a necessidade destes recursos para cada fonte individual, fornecendo um sistema mais robusto, trazendo maior confiabilidade para a rede com redução de harmônicos e garantindo o bom funcionamento dos equipamentos.

III. PESQUISA TEÓRICA

Equipamentos para Automação Residencial

Conforme a B2Home [7], a automação residencial ocorre através de equipamentos elétricos que conectados a uma central controladora, será possível programar e ser comandados através de uma interface do usuário, como aplicativo de celular, teclados de parede, displays *touch screen*, computadores, tablets ou via internet através de uma interface web.

Esse dispositivo pode ser acessado via *bluetooth* ou *Wi-Fi* (*Wireless Fidelity*), onde um aplicativo para *Smartphone* irá coletar informações de tempo de uso, consumo de energia e permitir agendar eventos para ligar automaticamente em dias e horários específicos.

Os dois principais equipamentos necessários são o controlador e o sistema de comunicação, pois com isso será possível acoplar os outros equipamentos a eles.

Controlador: Painel fixo, Controle Remoto, Computador ou notebook e Dispositivos móveis (celulares e *tablets*).

Sistema de comunicação: Tecnologias que integram os equipamentos para automação residencial e facilitam o controle

remoto das tarefas domésticas, de dentro ou fora.



Figura 1 - Exemplos de sistemas de comunicação. Fonte: B2Home [16].

Com esses equipamentos instalados, é possível acoplar e programar as áreas de atuação na residência, como por exemplo: iluminação, controle de temperatura, Cortina automatizada, Fechadura inteligente, Sensor de presença de portas e janelas, Câmera de segurança residencial, Home Theater e som ambiente, Sensor de vazamento de água e consumo e entre outros.



Figura 2 - Exemplos de equipamentos conectados. Fonte: B2Home [16].

Fonte de alimentação

É fato que todos os eletroeletrônicos necessitam de energia da rede, no entanto para o uso é necessária uma conversão para a tensão de operação do equipamento. Para isto, existem as fontes de alimentação que transformam a corrente alternada da rede (CA) em corrente contínua (CC) na tensão necessária.

As fontes de alimentação podem ser divididas em 2 tipos, a linear e a chaveada, conforme monolithicpower [8].

A fonte linear utiliza um transformador, retificadores e filtros a fim de abaixar e manter uma tensão constante na saída, por possuir um sistema mais simples tem perdas mais altas.

A fonte chaveada, ao contrário da linear, recebe a tensão de entrada retificada e filtrada para um circuito *chopper* em alta frequência permitindo somente a energia necessária para a carga. Sua composição pode ser verificada na Figura 3

Entre seus benefícios em relação a fonte linear, pode ser verificado um circuito menor e mais leve, mais eficiente e capaz de lidar com alta potência.

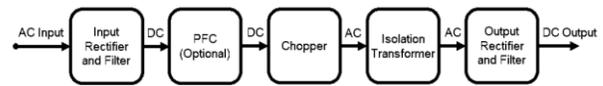


Figura 3 - Fonte chaveada isolada CA/CC. Fonte: MONOLITHICPOWER[8].

a) Retificadores

Os retificadores de entrada e filtragem, tem como objetivo a transformação inicial da tensão CA para CC. Em sua maioria utilizam retificadores passivos compostos geralmente por diodos e capacitores como pode ser verificado na Figura (4), onde os diodos permitem somente a passagem da tensão em uma única direção, transformando a corrente AC em uma DC pulsante e por sua vez é filtrado com o capacitor para a filtragem do *Ripple*.

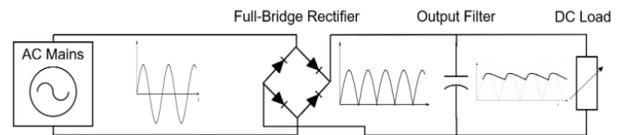


Figura 4 - Retificador de onda completa com filtro de suavização. Fonte: MONOLITHICPOWER [8].

Os diodos, apesar de relativamente eficientes, produzem uma perda de 0.5 a 1V na tensão, o que reduz a eficiência. Para contornar deste problema, podem ser trocados por retificadores ativos, onde utilizam um conjunto de Interruptores controláveis como MOSFETs (Transistor de Efeito de Campo de Metal-Óxido-Semicondutor) e transistores BJT (Transistor de Junção Bipolar), como pode ser observado na Figura 5.

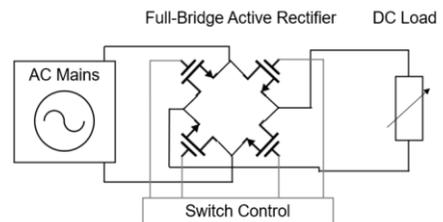


Figura 5 - Retificador de onda completa ativo. Fonte: MONOLITHICPOWER [8].

Esta metodologia permite redução de perdas devido à baixa resistência destes componentes e a possibilidade de controle de frequência que por sua vez sua a otimização. Em contrapartida são mais complexos e com maior custo.

b) Correção do fator de potência (PFC)

Devido aos componentes capacitivos e indutivos, ocorrem picos de corrente, que geram problemas tanto na fonte quanto na rede, devido a grande quantidade de harmônicos injetados por estas correntes, alterando o fator de potência para diferente de 1 conforme TOSHIBA [9].

Para mitigar estes problemas, existem técnicas como a correção do fator de potência (*Power Factor Correction - PFC*). Trata-se de um circuito capaz de reduzir harmônicos e corrigir o fator de potência. Conforme a Tabela 1 pode-se verificar os tipos de PFC e suas qualidades.

Tabela 1 - Comparativo entre: Sem PFC, PFC Passivo e PFC Ativo.

Tipo	Aparência	Peso	Valor PF	Meio Ambiente	Preço
Nenhum PFC	Com tensão de entrada, interruptor ou tensão de entrada fixa	Leve	50-60%	Pior	Barato
PFC Passivo	Com tensão de entrada, interruptor ou tensão de entrada fixa	Mais pesado	70-80%	Ruim	Normal
PFC Ativo	Sem interruptor de tensão de entrada	Normal	90-99.9%	Melhor	Caro

Fonte: SILVERSTONE [10].

1) PFC Passivo

O PFC Passivo conforme NUVATION [11] é indicado para baixa potência (<100W). Possui baixa complexidade e custo, no entanto possui maior peso. Trata-se basicamente de um filtro passa-baixa, onde filtra harmônicos do circuito, inibindo vibrações. Tem como objetivo manter a frequência do circuito alocado um pouco acima da frequência de rede.

O circuito como identificado no diagrama (Figura 6) utiliza indutor e capacitores, quanto maior a carga, é necessário componentes mais robustos consequentemente aumento do tamanho e do peso do circuito.

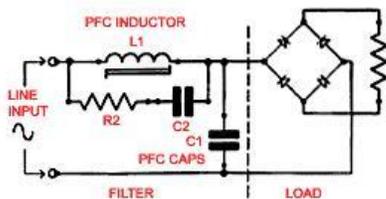


Figura 6 - Circuito PFC passivo. Fonte: NUVATION [11].

Conforme a Tabela 2 pode-se identificar as vantagens e suas desvantagens.

Tabela 2 - Vantagens e desvantagens do PFC Passivo.

Vantagens	Desvantagens
Custo	Peso e tamanho
Eficiência	Ausência da capacidade de regulação de tensão
Baixa complexidade	Range limitado de tensões de entrada

Fonte: NUVATION [11].

Tabela 4 - Comparativo entre os três modos de condução.

Modo de condução	Método de controle	Capacidade de saída e aplicações	Vantagens e desvantagens	Forma de onda da corrente do reator
Modo de condução contínua CCM	Controle PWM (Modulação de largura de pulso)	> 300W (Fontes de alimentação industriais)	Pequenas ondulações na corrente de entrada Pequena corrente de pico Diminui a eficiência geral de um circuito e causa um problema de ruído se o diodo PFC tiver um longo tempo de recuperação reversa	
Modo de condução crítica CRM	Controle PFM (Modulação de frequência de pulso)	75 a 300W (TV LCD, PCs, Fontes de alimentação comerciais)	Pequena ondulação na corrente do reator Alta corrente de corrente zero e baixa perda de comutação	
Modo de condução descontínua DCM	PWM, PFM e controle de vale	25 a 100W (Fontes de alimentação para iluminação LED)	Grandes ondulações na corrente do reator Alta corrente de pico Comutação de corrente zero e baixa perda de comutação	

Fonte: TOSHIBA. Power Factor Correction (PFC) [9].

2) PFC Ativo

O PFC ativo conforme NUVATION [12] é mais comum em fontes de > 100W devido a sua complexidade e custo. Provem de um sistema leve e eficiente do controle do Fator de potência. Consistindo em um circuito chaveado em alta frequência similar a um conversor DC/DC. Conforme a Tabela 3 pode-se identificar as vantagens e desvantagens.

Tabela 3 - Vantagens e desvantagens do PFC Ativo.

Vantagens	Desvantagens
Fator de potência ≥ 0.95	Maior custo e complexidade
Tensão intermediária constante para o circuito. Simplificando a complexidade e requerimentos do conversor DC/DC	Necessita de filtros melhores para evitar o retorno de frequências altas a linha
Componentes indutivos pequenos e leves	Componentes de tensão maior que os necessários em PFC passivos
Ampla range de tensões de entrada, pode trabalhar com 87 Vrms – 266Vrms 47Hz-63Hz sem chaveamento	-
Ótima flexibilidade e controle	-

Fonte: NUVATION [12].

O circuito funciona a partir da análise das tensões e corrente, por sua vez procura ajustar o tempo de chaveamento e o ciclo de trabalho (*duty-cycle*) de acordo com a necessidade, como pode ser verificado no Diagrama (Figura 7).

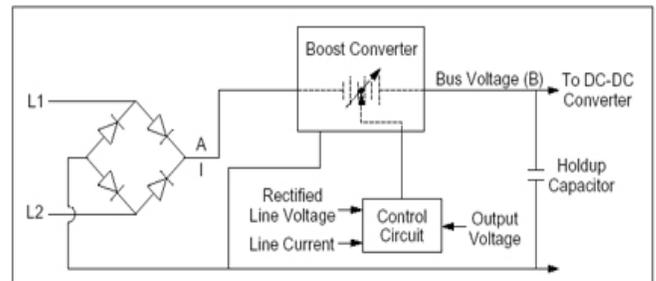


Figura 7 - Diagrama de bloco do PFC Ativo. Fonte: NUVATION [12].

O PFC ativo, pode ser dividido em 3 tipos de acordo com o modo de condução de corrente usado. O que pode ser demonstrado na Tabela 4.

c) Circuito Chopper

Trata-se de um circuito designado para converter uma tensão CC (corrente contínua) para outra de mesmo tipo ajustável. É conhecido como DC *Chopper* ou Conversor CC para CC. Possuem o mesmo objetivo de um transformador que é abaixar ou subir a tensão de forma variável, conforme Electronicscoach [13].

Em fontes chaveadas, devido ao fornecimento de tensões altas mesmo sem o uso do PFC, necessitam de circuitos para a redução para tensão de operação do aparelho. Estes podem ser isolados ou não isolados, onde tem suas características conforme a Tabela 5.

Tabela 5 - Características de fontes isoladas e não isoladas

	Fontes AC/DC	Fontes AC/DC não isoladas
Topologia	Conversor Flyback	Conversor Buck
Segurança	Isolação galvânica oferece uma segurança maior	Possíveis vazamentos de corrente podem causar danos a carga e ao usuário
Tamanho / Peso	Transformadores aumentam o tamanho e peso	Somente um indutor necessário
Eficiência	Perdas no entreferro e no cobre do transformador	Indutor único é muito mais eficiente que o transformador
Complexidade	Ambas necessitam de um circuito de controle	

Fonte: MONOLITHICPOWER [8].

Devido a questão de segurança, são comumente usados os conversores *Flyback* e o *Resonant LLC*. Ambos utilizam o chaveamento para produzir ondas quadradas a partir da corrente CC para a conversão no transformador, reduzindo a tensão e por sua vez a retificação novamente em corrente CC. Seus respectivos circuitos podem ser verificados na Figura 8.

O circuito Flyback, funciona similarmente aos conversores *buck/boost*, tem um design mais enxuto, com eficiência menor e desgaste maior devido ao *hard switching*.

O conversor *Resonant LLC*, é definido pela ressonância criada pelo filtro LC (Filtro Capacitor e indutor) adicionado ao primário do transformador, sendo chamado de LLC devido ao uso do transformador que possui em seu primário um indutor. Seu funcionamento consiste no chaveamento quando a corrente chega próxima a zero, gerando menos interferência eletromagnética e maior eficiência.

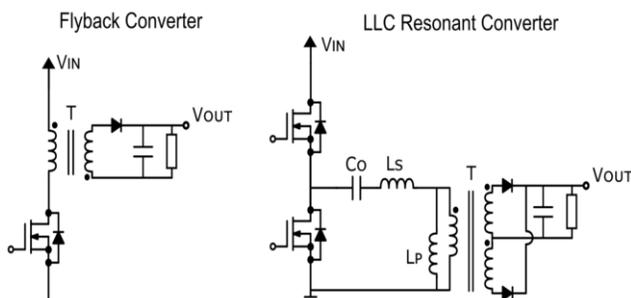


Figura 8 - Conversor Flyback (Esquerda) e Conversor LLC Ressonante (Direita).
Fonte: MONOLITHICPOWER [9].

IV. METODOLOGIA

Conforme o objetivo deste artigo, foi desenvolvido um equipamento que possibilite a redução de custos, mantenha a eficiência e segurança igual ou maior. Por sua vez integrá-lo a um sistema domótico, com o objetivo de providenciar um sistema mais cômodo, com a capacidade de monitoramento e controle.

Para isto, os componentes de filtro e PFC das fontes chaveadas são separados e integrados à rede, alimentando os diversos reguladores com uma única entrada não necessitando circuitos específicos para cada equipamento. Como o sistema estará íntegro, mesmo com circuitos maiores não terão problema de peso e tamanho.

Estas modificações promovem maior qualidade e durabilidade dos equipamentos, além de usufruir de técnicas como o Retificador *Bridgeless*, do qual provém de uma técnica para redução da perda joule gerada pelos diodos da ponte retificadora, possuindo seu conceito no artigo da TOSHIBA [8] e testes no canal GreatScott! [16] o qual usualmente não é utilizado devido ao alto custo do sistema e sua complexidade.

Com este ponto, há a possibilidade de reduzir o custo de produção de cada equipamento, redução do lixo eletrônico e até mesmo aumentar a eficiência geral dos eletroeletrônicos.

Como metodologia do sistema de controle, foi utilizado o microcontrolador NODEMCU ESP8266, que possibilita o uso de acesso remoto necessário para aplicações de Internet das coisas (*Internet of Things*, IoT), é compatível com o software Arduino IDE, dispõe de vários módulos compatíveis e uma programação amigável. Utilizado como referência o guia NodeMCU – ESP12, de Eletrogate em [14].

Para a conexão inteligente, utilizado como referência o tutorial de *IoT Circuit Hub* [21], já engloba o uso de um aplicativo.

Para o reconhecimento do equipamento foi proposto o uso de TAGs com tecnologia NFC (*Near Field Communication*) a fim de validar se ele é compatível com o sistema e posteriormente monitorar a corrente de forma constante através do ACS712. Caso ocorra algum erro durante o processo, o usuário será alertado e instruído sobre como deve prosseguir.

As TAGs serão pré-configuradas para uma identificação específica, denominando no código do sistema o tipo de equipamento e sua especificação para o controle constante.

A tecnologia NFC utiliza a tecnologia de indução magnética para estabelecer a conexão entre dois aparelhos capacitados, esta tecnologia é amplamente utilizada hoje em dia em diversas aplicações alguns exemplos são os pagamentos por aproximação, transporte público e portarias eletrônicas conforme FONSECA, Gabriel em [15].

O projeto utiliza TAGs NFC, devido ao baixo custo e fácil manuseio com a possibilidade de fazer as configurações das TAGs através de smartphones com auxílio de um aplicativo chamado “*NFC TOOLS*” facilitando assim o uso de novos equipamentos que venham a ser inseridos no sistema.

Existem outras formas de comunicação com os equipamentos como *Bluetooth*, mas como são tecnologias mais complexas e que necessitam de pareamento com os componentes, não faria sentido utilizar pois só é necessário

informar as características do equipamento para o sistema.

Para realização da leitura das TAGs foi utilizado o RFID-RC522 de alta frequência (13.56MHz), que é a mesma tecnologia utilizada em *smartcards*. Existem outros leitores que trabalham na faixa de ultra frequências (850 a 950MHz), que são utilizados em pedágios, por exemplo, por terem grande alcance e rápida leitura conforme RFID GTA UFRJ [20]. Por não haver necessidade de leituras ágeis e de grandes distancias foi adotado o RFID de alta frequência.

Foi utilizado o ACS712 para a leitura da corrente, o qual trata-se de um sensor barato capaz de efetuar uma análise com uma taxa de erro de 1,5% a 25°C. Utiliza o efeito HALL para a detecção da corrente onde em seu encapsulamento possui semicondutores que sofrem influência do campo magnético.

Ao serem afetados pelo campo magnético, produzem uma diferença de potencial no semicondutor, a qual pode ser medida pelo microcontrolador. Para a programação deste item, será utilizado como base o tutorial de Ezequiel Demetras [17].

V. DESENVOLVIMENTO

Como desenvolvimento, foi procurado prover um projeto em escala para a redução de custos e riscos à segurança. Com isso o controle do equipamento tem o suporte a somente 1 equipamento de baixa potência de cada vez.

Para a confecção do protótipo, foi realizado um fluxograma (Figura 9) para a base do funcionamento do sistema. Por sua vez, foi realizado o esquema elétrico para identificar as devidas conexões.

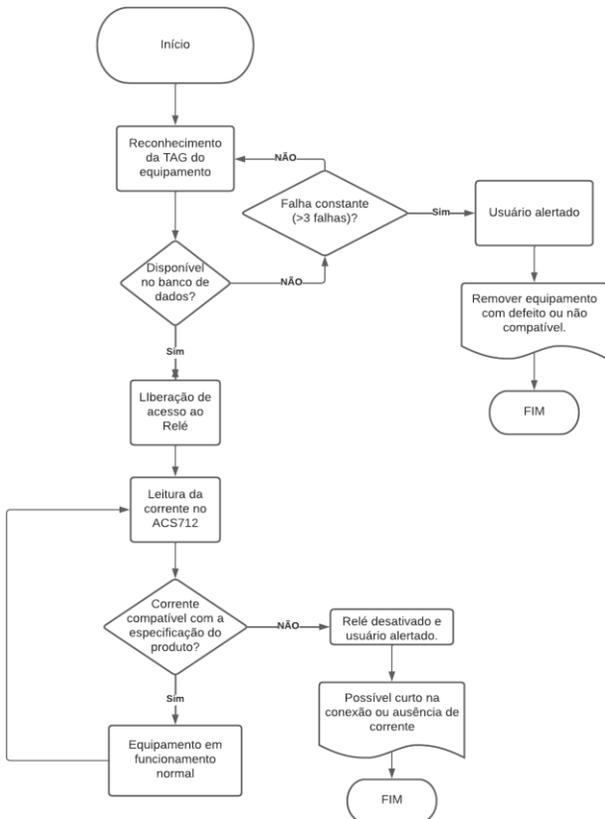


Figura 9 - Esquema elétrico do circuito de controle. Fonte: Autoria Própria, 2022.

No desenvolvimento ocorreu a troca do NODEMCU ESP8266 para o NODEMCU ESP32 V1, devido a maior quantidade de códigos exemplo, maior poder de processamento e maior quantidade de portas utilizáveis.

O Microcontrolador ESP32 Figura 10 está configurado para realizar a comunicação com os demais módulos, providenciar informação ao usuário e identificar falhas no circuito.

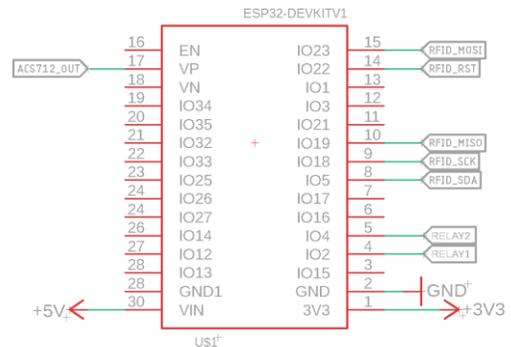


Figura 10 - Esquema elétrico do NODEMCU ESP32. Fonte: Autoria Própria Eagle, 2022.

O RFID-RC522 Figura 11 realiza a leitura do cartão NFC. Realizando a comunicação com o microcontrolador através do protocolo SPI (Serial Peripheral Interface).

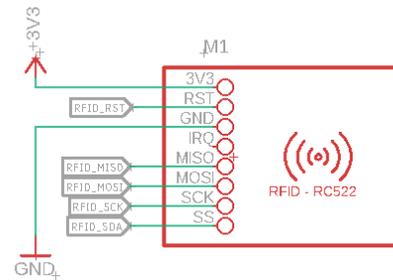


Figura 11 - Esquema elétrico da placa RC522. Fonte: Autoria Própria Eagle, 2022.

O módulo relé de 2 canais Figura 12, utiliza as portas 2 e 4 para seu controle e suporta tensões de 30V em corrente contínua.

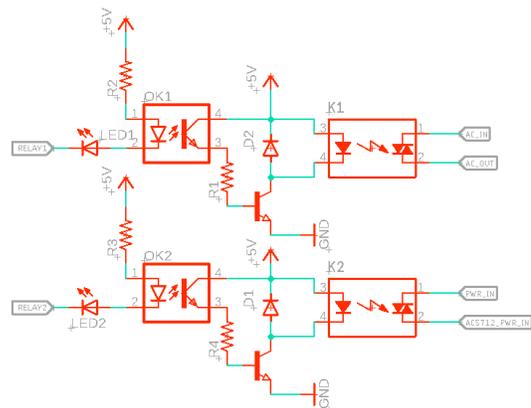


Figura 12 - Esquema elétrico do circuito de controle. Fonte: Autoria Própria Eagle, 2022.

A leitura do ACS712 Figura 13a é realizada a partir da porta VP do ESP32, providenciando uma leitura analógica de até 12bits de precisão.

O conversor DC/DC Figura 13b, consiste em um conversor do tipo *Step-Down* com o objetivo de abaixar a tensão para o fornecimento adequado para carga.

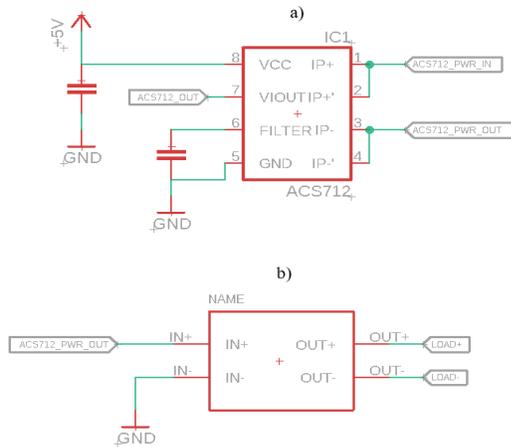


Figura 13 - a) Esquema elétrico ACS712 e b) Placa de conversão de tensão DC/DC. Fonte: Autoria Própria Eagle, 2022.

Ao finalizar a montagem do projeto do sistema de controle foi adquirido a listagem dos componentes e seus valores para a confecção na Tabela 6.

Tabela 6 - Listagem de componente x preço

Componente	Valor (R\$)
NODEMCU ESP32 V1	40,00
ACS712 5A	25,00
Módulo Relé de 2 Canais	20,00
Fonte para notebook com 19.5V 2A Bivolt	100,00
Led 12V DC 12W	20,00
Conversor abaixador DC/DC baseado no chip XL4015E1	20,00
Resistência para chuveiro de 6800W 220V (cerca de 7,2Ω)	20,00
Total:	245,00

Fonte: Autoria Própria, 2022.

A finalização da montagem do sistema de controle é verificada na Figura 14.

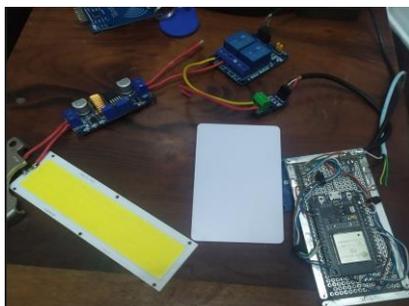


Figura 14 - Montagem do Protótipo. Fonte: Autoria Própria, 2022.

Leitor NFC RFID-RC522

O leitor tem como objetivo validar o card NFC e, por sua vez, orientar o circuito nas suas especificações, bem como validar se está cadastrado ou não no banco de dados, para a liberação de energia a carga, sem comprometer a segurança do usuário.



Figura 15 - Foto do Leitor NFC RFID-RC522. Fonte: Autoria Própria, 2022.

Foi utilizado como base o código do site ESP32 I/O [19] para validar o seu funcionamento.

Em sua confecção, foram observadas diversas falhas de reconhecimento devido a mau contato com as conexões no protoboard. Não sendo plausível o teste via protoboard, foi efetuado a conexão em placa ilhada e solda para uma conexão mais robusta e permanente.

Seu funcionamento obedece ao fluxograma (Figura 16).

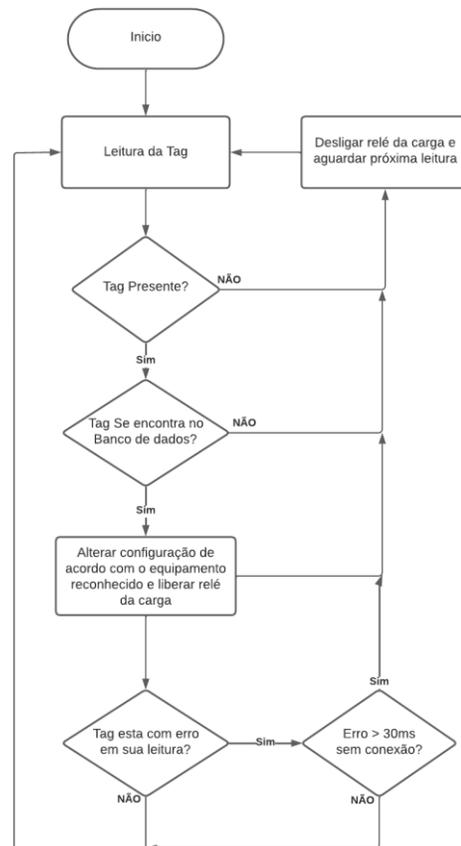


Figura 16 – Esquema de funcionamento do RFID-RC522. Fonte: Autoria Própria, 2022.

ACS712

O ACS712 é utilizado para a medição da corrente no circuito da carga, de modo invasivo, validando se o mesmo está recebendo a corrente correta de acordo com sua especificação.



Figura 17 – Foto do ACS712.
Fonte: Autoria Própria, 2022.

Ao realizar testes, ocorreram problemas em sua calibração, não sendo aceito o cálculo de corrente conforme o objetivo e códigos exemplo. Foram efetuados diversos testes para uma codificação mais precisa, adquirindo amostras e, por sua vez, gerando um deslocamento do erro.

Verificado à necessidade do tempo de boot para o microcontrolador, solicitando aguardar 100ms antes da primeira medição para estabilizar ao inicializar e, por sua vez, efetuando medições entre 2ms para maior variação na amostragem para encontrar o erro absoluto.

$$valor\ médio = \frac{\sum_0^{Amostras} * Leitura}{Amostras} \quad Eq.1$$

Após a aquisição de todos os dados, foi realizado a média para auxiliar na precisão da medição do equipamento. Mesmo com o *offset*, o dispositivo não conseguiu analisar a corrente de forma próxima ao multímetro.

Devido ao caso, validado a possibilidade de erros na ferramenta. Na medição da resistência e tensão foram adquiridos os respectivos valores 7,2Ω e 19.5V. Chegando próximo ao valor 2.55A registrado a função amperímetro, descartando a possibilidade de falha do equipamento de medição.

$$Corrente(A) = \frac{Tensão(V)}{Resistência(\Omega)} \quad Eq.2$$

$$2,71A \cong \frac{19,5V}{7,2\Omega}$$

Em nova análise, foi efetuado o cálculo de tensão da saída do ACS 712, onde ao validar o valor de saída, foi verificado a tensão de 2V sendo 0,5V de diferença no pino do sensor, com uma corrente de 2.5A.

Ao chegar na conclusão de que o dispositivo adquirido ACS712 de 5A estava com calibração incorreta, foi realizado o cálculo de conversão para encontrar o seu valor limite.

$$I\ máx(A) = \frac{I\ referencial(A) * Vm (V)}{V\ referencial(V)} \quad Eq.3$$

$$12.5 = \frac{2.5 * 2.5}{0,5}$$

Por sua vez foi definido a leitura da corrente com base na seguinte fórmula.

$$I(A) = (Leitura - valor\ médio) * \frac{I\ máx(A)}{4096} \quad Eq.4$$

A formula é baseada na linha de código "valor médio = valor médio * 0.004882812" do tutorial de Ezequiel Demetras [17]. Onde foi adicionado o erro para cálculo do valor médio e o novo fator de leitura sendo a corrente máxima dividida pelo limite de leitura do microcontrolador utilizado sendo 12bits (4096).

O ACS712 segue o seguinte diagrama de funcionamento (Figura 18).

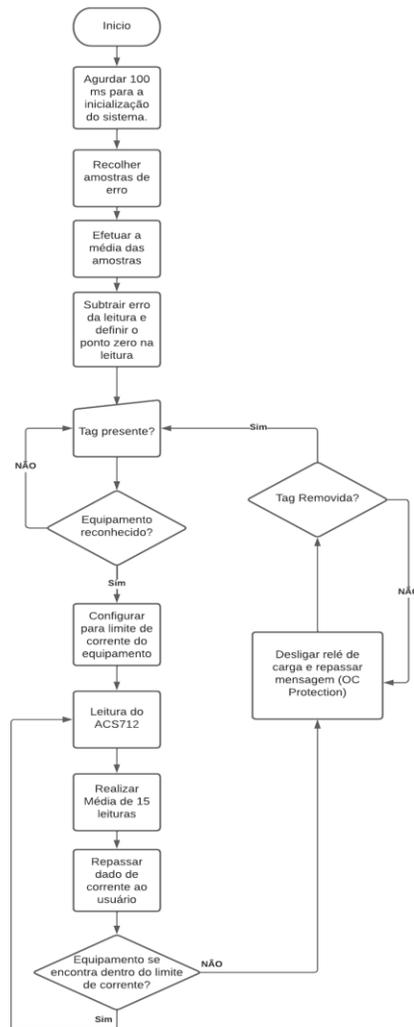


Figura 18 – Esquema de funcionamento do ACS712.
Fonte: Autoria Própria, 2022.

Análise do circuito da fonte chaveada

Para a análise, verifico o uso da fonte ATX de 450W Figura 19, possuindo um sistema de PFC ativo e com circuitos de filtro robustos.



Figura 19 - Fonte ATX 450W com PFC Ativo. Fonte: Autorial Própria, 2022.

Identificado os componentes da fonte, conforme a foto dos componentes do PFC ativo Figura 19 e 20, pode-se verificar em I (marrom) a ponte retificadora em II (azul) o Indutor do circuito PFC, em III o MOSFET responsável pelo chaveamento em IV (Roxo) o circuito de controle do PFC e em V (amarelo) o diodo e VI (verde) o capacitor.

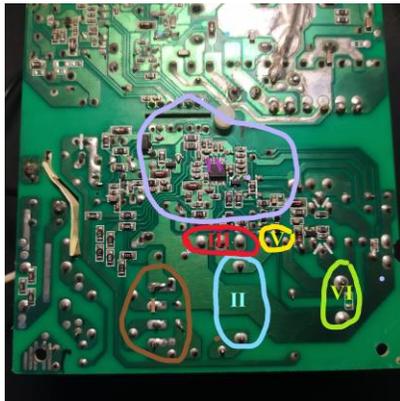


Figura 20 - Componentes do PFC ativo da fonte. Fonte: Autorial Própria, 2022.

Realizado o esquema elétrico (Figura 21), onde foi identificado a divisão entre filtros e a retificação, o circuito do PFC Ativo e o conversor do tipo *Flyback*.

Ao conectar cargas ao capacitor do PFC, o qual a tensão está sendo retificada e filtrada, foi verificado que não houve interferência no circuito original, bem como o funcionamento adequado das demais cargas.

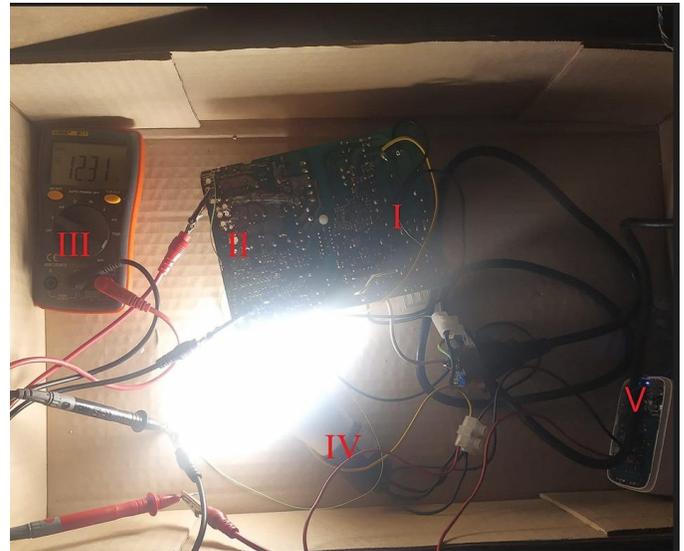


Figura 22 - Componentes do PFC ativo da fonte. Fonte: Autorial Própria, 2022.

Na Figura 22, pode-se observar a conexão em I, onde foi realizada uma conexão direta ao capacitor do sistema do PFC para validar o seu funcionamento nos demais equipamentos, mesmo os que não possuem PFC ativo.

Na conexão em II, foi realizada para ativar o circuito da fonte, visto que esta fonte provém de um sistema de proteção que desativa o circuito caso não tenha o feedback correto.

Em III, pode-se identificar a tensão de saída da fonte ATX, garantindo que está funcionando de acordo com o esperado e não gerando variações na tensão.

Em IV, pode-se ver a uma lâmpada LED conectada ao circuito do PFC.

Em V, pode-se verificar um carregador USB em funcionamento ao mesmo tempo que a lâmpada.

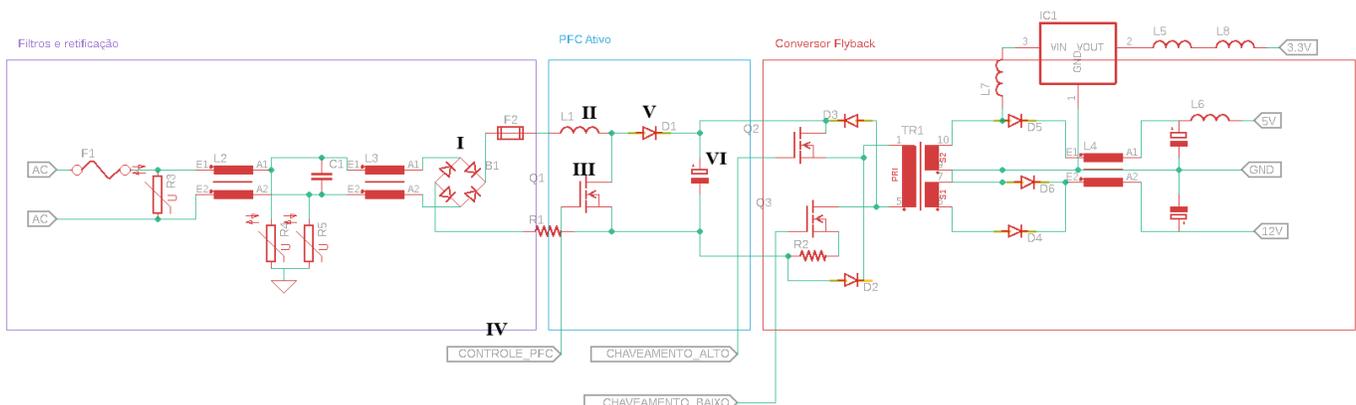


Figura 21 - Esquema elétrico da fonte ATX. Fonte: Autorial Própria Eagle, 2022

VI. RESULTADOS

Em testes com o circuito de PFC, não resultou em nenhuma anomalia no sistema, funcionando de acordo com o esperado.

Na Tabela a lista de equipamentos testados e seus devidos resultados.

Tabela 6 - Equipamento x Teste.

Equipamento	Teste
Lâmpada LED 16W	Iluminação padrão, sem problemas aparentes. Ao cortar o fornecimento de energia, aparenta demorar um pouco para desligar
Monitor 19 polegadas.	Funcionamento normal, acesso ao menu de opções e controle OK
Impressora Bivolt	Impressora não ligou em primeira tentativa, no entanto, ao checar novamente as conexões o equipamento, funcionou com acesso as funções e início dos motores. Não foi possível checar a impressão devido à ausência de tinta no cartucho.
Carregadores USB.	Testado carregador USB, possui o mesmo comportamento, fornecendo adequadamente as tensões esperadas e efetuado teste com carregamento de <i>Power Bank</i> exigindo 1 A, sem redução de tensão ou falha no fornecimento.
Ferro de solda de temperatura ajustável com leitura digital	O ferro de solda não funcionou e queimou a resistência sem ligar o circuito, ao testar em tomada 127V o mesmo funcionou normalmente. Seu controle é feito a partir de um TRIAC, o qual não pode atuar em corrente CC devido à ausência da corrente reversa para o seu acionamento.

Fonte: Autoria Própria, 2022.

Com base no teste, pode-se observar uma alta taxa de compatibilidade e possibilidade de modificação sem grandes alterações, sendo possível a redução de componentes de filtro e remoção da ponte retificadora, alocando a em uma central.

A instalação com a conexão direta ao circuito de PFC Ativo somente é funcional em circuitos que necessitam previamente da retificação para a corrente contínua na ponte retificadora e utilizem circuitos do tipo LLC ou *flyback* para a sua conversão. Impossibilitando a instalação de equipamentos como motores e fontes lineares.

Ao instalar o circuito com o auxílio de uma tomada, foi verificado faíscas e por sua vez a estabilização. Para contornar este problema é recomendado efetuar um sistema de controle com a comunicação da carga para o controle do fornecimento e liberação da carga de forma mais suave.

Analisando o custo de componentes do circuito no fornecedor Mouser Eletrônicos [18], pode-se estimar uma tabela de custo dos componentes para o circuito e comparar com o circuito de uma fonte padrão.

Na Tabela 7 e 8, pode-se verificar o custo de cada componente de uma fonte de 50W e de uma fonte de 450W.

Tabela 7 - Listagem de componente x Preço.

Circuito PFC Ativo 450W	Valor (US\$)
2x Indutor de filtro	6,92
MOSFET 400V 23A	3,68
Ponte retificadora 10A	0,92
Capacitor eletrolítico de alumínio 220uF 400V	5,74
CCM PFC controller with high voltage startup	2,96
Capacitor de filme 0,47uF	1,29
Total	21,51

Fonte: Autoria Própria, 2022.

Tabela 8 - Listagem de componente x preço

Circuito PFC Ativo 50W	Valor (US\$)
2x Indutor de filtro	4,34
MOSFET 400V 5.5A	1,82
Ponte retificadora 3A	0,48
Capacitor eletrolítico de alumínio 100uF 400V	1,33
CCM PFC controller with high voltage startup	2,96
Capacitor de filme 0,33uF	1,04
Total:	11,97

Fonte: Autoria Própria, 2022.

Analisando a rentabilidade em W/US\$, conforme a Tabela 9.

Tabela 9 - Listagem de componente x Rentabilidade.

PFC Ativo	Rentabilidade (W/US\$)
Circuito PFC Ativo 450W	20,92
PFC Ativo 50W	4,17

Fonte: Autoria Própria, 2022.

Conforme os dados da tabela 9, na relação de custo da fonte de 50W com a fonte de 450W pode ser verificada na equação 5 uma diferença em porcentagem do custo, sendo mais benéfico a fonte de 450W com 80% maior rentabilidade por Watt.

$$\% \text{ Rentabilidade} = 1 - \frac{\text{Fonte } 50W}{\text{Fonte } 450W} \quad \text{Eq.5}$$

$$80\% \sim 1 - \frac{4,17}{20,92}$$

O uso de relés desenvolvido no sistema de controle não é indicado para o uso de corrente contínua devido à ausência da corrente reversa. O componente adequado seria um MOSFET de potência.

VII. CONCLUSÕES

Com base nos resultados é concluído que, ao utilizar uma central para o fornecimento de energia retificada seguiu de acordo com o objetivo do artigo. Propondo um método de reduzir custos de produção para fontes chaveadas, que são comumente utilizadas para o fornecimento de energia adequada ao equipamento eletroeletrônico.

O uso do circuito PFC possui diversos benefícios, que incluem tensão de entrada universal, variando de 85V a 264V de 50Hz ou 60Hz, tensão de saída fixa próxima aos 400V e menor complexidade do circuito de chaveamento.

Agregando todos os componentes e montando um dispositivo fixo, reduziria problemas como peso, tamanho e custo. Verificando as tabelas 7 e 8, nota-se uma redução teórica aproximada de 80% do valor do circuito.

Como possíveis melhorias para o projeto, podem ser incluídas um sistema de controle remoto, com comunicação com as cargas, de forma a disponibilizar seu acesso inteligente de um equipamento central. Adicionar sistema UPS (Fonte de Alimentação Ininterrupta), dispensando a necessidade da geração da onda senoidal.

REFERÊNCIAS

- [1] FINDER Disponível em: <<https://www.findernet.com/pt/brasil/news/mercado-brasileiro-de-automacao-residencial/>> Acesso em Abril de 2022.
- [2] MURATORI, José Roberto Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/cont/a/os-desafios-do-mercado-da-automacao-residencial_8192> Acesso em Abril de 2022.
- [3] INTEL, Intel Introduces New ATX PSU Specifications. Disponível em: <https://www.intel.com/content/www/us/en/newsroom/news/intel-introduces-new-atx-psu-specifications.html?cid=em&source=elo&campid=smg_WW_bracbu_EMPR_EN_2022_0323_MSI_Partner_C-MKA-22955_T-MKA-30017&content=smg_WW_bracbu_EMPR_EN_2022_0323_MSI_Partner_C-MKA-22955_T-MKA-30017&elq_cid=1381787&em_id=78669&elqrid=c3f73fbcac8c467ca3a29a36a8431b18&elqcampid=49965&erpm_id=3531034#gs.dy344r>
- [4] LINUSTECHTIPS. This is NOT a normal power supply... - ATX 12VO Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=heyGtgdfN7A>> Acesso em abril de 2022.
- [5] FAGUNDES, Eduardo. Disponível em: <<http://datacenterro.adshow.com.br/blog/uso-de-corrente-continua-nos-data-center-e-mais-eficiente-que-corrente-alternada/>> Acesso em Abril de 2022.
- [6] O'shea, Paul. Disponível em: <<https://www.powerelectronicnews.com/48-v-the-new-standard-for-high-density-power-efficient-data-centers/>> Acesso em Abril de 2022.
- [7] B2HOME Disponível em: <<https://www.b2home.com.br/asa-inteligente-automacao-residencial/>> Acesso em Abril de 2022.
- [8] MONOLITHICPOWER. Disponível em: <<https://www.monolithicpower.com/en/switching-power-supply>> Acesso em Abril de 2022.
- [9] TOSHIBA. Power Factor Correction (PFC) Circuits Disponível em: <<https://toshiba.semicon-storage.com/info/docget.jsp?did=68570>> Acesso em abril de 2022
- [10] SILVERSTONETEK. Disponível em: <https://www.silverstonetek.com/techtalk_cont.php?tid=wh_pfc&area=usa> Acesso em Abril de 2022
- [11] NUVATION. Disponível em: <<https://www.nuvation.com/resources/article/power-supply-design-basics-passive-pfc-design>> Acesso em Abril de 2022
- [12] NUVATION. Disponível em: <<https://www.nuvation.com/resources/article/power-supply-design-basics-active-power-factor-correction>> Acesso em Abril de 2022
- [13] ELECTRONICS COACH. Disponível em: <<https://electronicscoach.com/chopper-circuit.html>> Acesso em Abril de 2022
- [14] ELETROGATE Disponível em: <<https://blog.eletrogate.com/nodemcu-esp12-usando-arduino-ide-2/#:~:text=202210%20min-,Porque%20programar%20NodeMCU%20com%20Arduino%20IDE%20%3F,Nem%20precisa%20pressionar%20os%20botões%20!>>> Acesso em Abril de 2022
- [15] FONSECA, Gabriel. MACHADO, Gustavo. MACHADO, Thiago. Disponível em: <<https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel878/redes1-2018-1/trabalhos-vf/nfc/>> Acesso em Abril de 2022
- [16] GreatScott. Disponível em: <<https://youtu.be/S0j4xOuRzD4>> Acesso em Abril de 2022
- [17] DEMETRAS, Ezequiel. Disponível em: <<https://portal.vidadesilicio.com.br/acs712-medindo-corrente-eletrica-alternada-continua/>> Acesso em Abril de 2022
- [18] MOUSER ELETRONICS. Disponível em: <<https://br.mouser.com/>> Acesso em Abril de 2022
- [19] ESP32 I/O. Disponível em: <<https://esp32io.com/tutorials/esp32-rfid-nfc>> Acesso em Abril de 2022
- [20] RFID GTA UFRJ Disponível em: <https://www.gta.ufrj.br/grad/12_1/rfid/links/funcionamento.html> Acesso em Abril de 2022
- [21] IoT Circuit HUB Disponível em: <<https://iotcircuitHub.com/home-automation-using-nodemcu-and-blynk/>> Acesso em Abril de 2022

APÊNDICE

Repositório disponível em: <<https://github.com/Grupo05-EEL/TCC---GRUPO-05-EEL>>