

PROJETO DE BANCADA DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DE BAIXO CUSTO

PROJECT OF A LOW-COST POWER ELECTRONICS BENCH

Ramon Ferreira de Andrade Feitosa

rfaf@discente.ifpe.edu.br

Prof. Me. Bemielison Gletson da Silva Bezerra

bemielison.bezerra@pesqueira.ifpe.edu.br

RESUMO

Este trabalho apresenta o projeto de uma bancada didática compacta e de baixo custo, desenvolvida para apoiar aulas práticas de eletrônica de potência no IFPE, Campus Pesqueira. O protótipo permite o estudo de dispositivos semicondutores como tiristores (SCR), triacs e diodos. A metodologia contemplou a revisão e comparação de soluções comerciais, a especificação e o dimensionamento de componentes, bem como o desenvolvimento de firmware para o microcontrolador ESP8266, com a utilização de interrupções e técnicas de temporização. O projeto contribui para suprir uma lacuna no ensino de engenharia, ao disponibilizar um kit didático que alia segurança e aprendizagem baseada em projetos. O custo estimado para a produção de uma unidade da placa foi de R\$ 282,81.

Palavras-chave: Eletrônica de potência. Bancada de ensino. Controle com ESP8266. Aprendizagem baseada em projetos.

ABSTRACT

This work presents the design of a compact and low-cost didactic bench, developed to support practical classes in power electronics at IFPE, Campus Pesqueira. The prototype allows the study of semiconductor devices such as thyristors (SCR), triacs, and diodes. The methodology included the review and comparison of commercial solutions, the specification and sizing of components, as well as the development of firmware for the ESP8266 microcontroller, employing interrupts and timing techniques. The project helps address a gap in engineering education by providing a didactic kit that combines safety and project-based learning. The estimated cost for producing a single unit of the board was R\$ 282.81.

Keywords: Power electronics. Didactic test bench. ESP8266-based control. Project-based learning.

1 INTRODUÇÃO

A globalização do acesso à informação, o avanço tecnológico e científico em ritmo acelerado e as crescentes demandas do mercado de trabalho impõem desafios adicionais à formação do engenheiro contemporâneo. Nesse cenário, as tecnologias emergentes têm reconfigurado a relação entre conhecimento e processos de ensino e aprendizagem, exigindo metodologias pedagógicas que promovam estratégias capazes de potencializar a aquisição de competências, como a incorporação de atividades práticas em laboratório.

Segundo Machado et al. (2011), no contexto dinâmico atual, a eletrônica de potência está presente na maioria das tecnologias do cotidiano, como smartphones, automóveis, computadores e televisores. No setor comercial, sua aplicação se estende à conversão de energia elétrica, ao comando e controle de sistemas eletrônicos, com destaque para indústrias de automação, geração renovável, transmissão e distribuição de energia (Barbi, 2015).

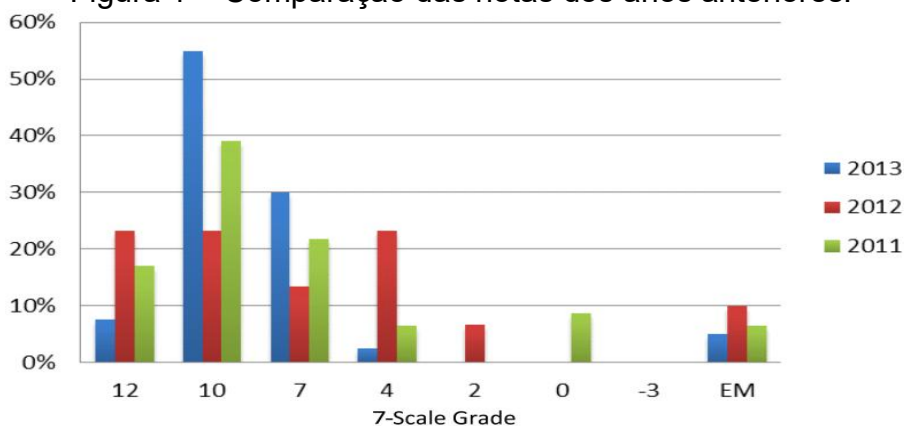
Para a formação de profissionais aptos a enfrentar desafios reais, é necessário que o ensino de engenharia assegure tanto bases conceituais sólidas quanto competências práticas. Ferreira et al. (2005) destacam que a eletrônica de potência demanda forte ênfase em atividades de laboratório, pois o desenvolvimento de aplicações depende da experimentação e da integração multidisciplinar, fatores que aumentam a complexidade do processo de ensino-aprendizagem.

Nesse sentido, Zhang et al. (2016) apresentam evidências das vantagens da aprendizagem baseada em projetos (ABP) no ensino de engenharia. Em uma universidade da Dinamarca, a adoção da ABP associada a atividades laboratoriais resultou em melhora do desempenho médio das turmas em comparação a anos anteriores e ao modelo tradicional, além de maior motivação e adesão dos estudantes às etapas práticas. Em sistemas de potência, Hosseinzadeh (2012) verificou que um curso estruturado com ABP permitiu oferecer conteúdo técnico especializado com modelagem e análise sem prejuízo ao desenvolvimento de competências profissionais.

Ainda segundo Zhang et al. (2016), as avaliações finais foram conduzidas a partir de relatórios técnicos e exames orais. Os relatórios foram analisados com base em critérios de precisão técnica (peso 0,6), clareza das formas de onda e gráficos (0,3) e qualidade da linguagem (0,1). As notas seguiram a escala de sete pontos adotada no sistema educacional dinamarquês, denominada *7-trins-skalaen*, em que 12 corresponde a desempenho excelente e 2 ao mínimo aceitável, sendo consideradas aprovadas as menções 0, 2, 4, 7, 10 e 12 (Dinamarca, 2025).

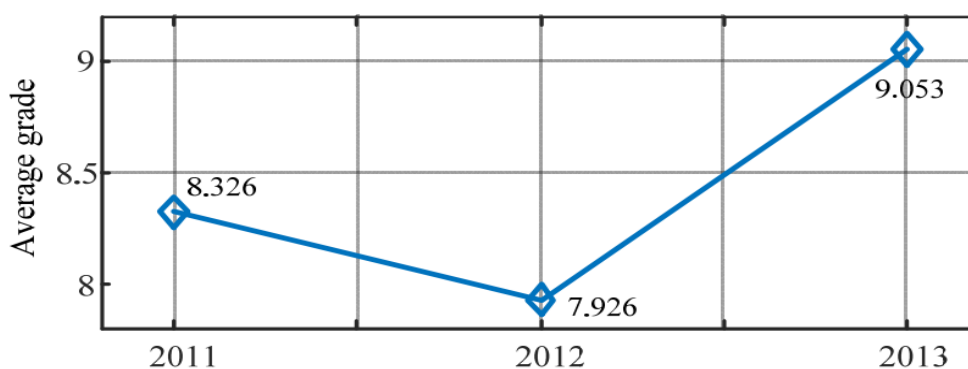
A comparação entre as distribuições de notas de 2011, 2012 e 2013, com os mesmos instrutores e avaliadores, demonstrou que, embora a fração de notas 12 tenha diminuído, 92,5% dos alunos obtiveram nota igual ou superior a 7 em 2013, contra 59,9% em 2012 e 78% em 2011, conforme é visto na figura 1. Além disso, a média de 2013 foi significativamente superior às dos anos anteriores, apresentado na figura 2.

Figura 1 – Comparação das notas dos anos anteriores.



Fonte: Zhang et al. (2016).

Figura 2 – Média das notas de 2011 a 2013



Fonte: Zhang et al. (2016).

Embora haja consenso de que atividades práticas fortaleçam a formação discente, a implementação dessas metodologias exige infraestrutura adequada e recursos financeiros consideráveis, especialmente em laboratórios que utilizam instrumentos e equipamentos especializados (Bitencourt, 2018). Como alternativa, Piussi (2017) propõe o desenvolvimento de kits didáticos de baixo custo para laboratórios de eletrônica de potência, os quais reduzem barreiras financeiras, facilitam a replicação de experimentos, simplificam a manutenção e promovem práticas com maior segurança operacional.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo projetar uma bancada didática compacta e de baixo custo para ampliar e qualificar o ensino prático nas disciplinas de Eletrônica de Potência, Eletrônica Industrial e Aplicações, no Instituto Federal de Pernambuco (IFPE), Campus Pesqueira. A plataforma possibilita experimentos com retificadores monofásicos controlados e não controlados, de meia-onda e de onda completa, permitindo ajustes no ângulo de disparo, aquisição de dados em pontos específicos e variação dos parâmetros de carga, o que possibilita a análise do comportamento elétrico do sistema. Os requisitos de segurança foram contemplados por meio de isolamento galvânico e redução de tensão com transformador isolador, mitigando o risco de choques elétricos durante as atividades. Além disso, foi elaborado um manual de roteiros experimentais para apoiar docentes e discentes na execução dos procedimentos em laboratório.

2 DESENVOLVIMENTO

Este tópico apresenta os fundamentos teóricos dos principais componentes eletrônicos utilizados neste projeto, revisando conceitos sobre sinais senoidais, cálculo da frequência da rede elétrica e a importância desses elementos para o correto funcionamento e dimensionamento dos circuitos. São detalhados os princípios de operação de semicondutores como tiristores, SCRs (Silicon Controlled Rectifier), triacs e optoacopladores, destacando suas aplicações práticas e justificando sua escolha para uma bancada didática de baixo custo.

A base teórica é importante para o desenvolvimento de soluções eficientes, seguras e voltadas ao ensino de eletrônica de potência. Além da fundamentação teórica, esse tópico apresenta as soluções comerciais disponíveis no mercado e relaciona os seus valores de mercado bem como suas características.

2.1. Caracterização de uma onda senoidal

O fornecimento de energia elétrica no Brasil é realizado, predominantemente, por redes de distribuição em corrente alternada, em razão da facilidade de adaptação dos níveis de tensão por meio de transformadores (Pomilio, 2014). Nas ligações monofásicas, as tensões usuais são 127 V ou 220 V, com corrente alternada, isto é, que inverte periodicamente o sentido (NHS, 2023). Idealmente, a rede apresenta forma de onda senoidal, gerada em grande parte pela conversão eletromecânica: alternadores acionados por turbinas produzem tensões e correntes senoidais, posteriormente transmitidas aos consumidores.

Uma forma de onda senoidal pode ser descrita por três grandezas fundamentais: período (T), frequência (f) e amplitude de tensão. O período é o intervalo de tempo necessário para que a onda complete um ciclo e se repita, medido entre dois pontos idênticos e consecutivos do sinal. A frequência é o número de ciclos por segundo (em hertz, Hz) e relaciona-se ao período pela equação 01.

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{60} = 16,66 \text{ ms} \quad (1)$$

pelo Sistema Internacional de Unidades (SI):

T - período, segundos (s);

f - frequência, Hertz (Hz).

A amplitude de tensão corresponde ao valor máximo de pico (V_p) atingido pela senoide, sendo o ponto de equilíbrio mais alto. Usualmente também se empregam a amplitude pico a pico $V_{pp} = 2 * V_p$ e, o valor eficaz (V_{rms}), conforme a equação 02.

$$V_{rms} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

Valor eficaz é o valor em corrente contínua equivalente que produz a mesma potência média em um resistor que a grandeza alternada correspondente (Sadiku, 2017).

Para controlar o conversor proposto, retificador e controle por ângulo de disparo, a senoide da rede não é usada diretamente; ela é amostrada e condicionada para produzir uma referência de fase/frequência segura e compatível com o microcontrolador. O encadeamento adotado é:

- Isolamento e rebaixamento de nível.
Transformador de rebaixamento 220/12 Vrms isola galvanicamente e reduz amplitude.

- Detecção de cruzamento por zero (ZCD).
A referência de fase é extraída detectando-se os instantes em que $v(t)=0$. Isso é feito pela porta digital NAND *Schmitt*: o sinal do trafo cruza o limiar de 0 V e gera uma borda digital e pelo optoacoplador, que fornece isolamento adicional e imunidade a ruído;
- Medição de período e frequência.
Com o microcontrolador, mede-se o intervalo entre bordas ZCD consecutivas para obter o período e estimar a frequência utilizando a equação 1.

2.2 Componentes do circuito de detecção de passagem por zero

Esse circuito é responsável por identificar o momento em que a onda senoidal passa pelo tempo zero, enviando um sinal ao microcontrolador ESP8266 para cálculo do período, iniciando uma rotina de interrupção dentro do microcontrolador.

2.2.1 Retificador de onda completa

O retificador é um tipo de circuito eletrônico projetado para transformar corrente alternada (CA) em corrente contínua (CC). Essa conversão ocorre com o uso de componentes semicondutores, especialmente diodos, que têm a função de permitir o fluxo de corrente apenas em um único sentido (Boylestad, 2014).

Existem diferentes configurações de retificadores, como os de meia-onda, os de onda completa com derivação central e os de ponte completa com diodos. No projeto da bancada de eletrônica de potência utiliza-se um retificador monofásico de onda completa para aquisição do sinal de referência.

2.2.2 Optoacoplador e técnica de *pull-up*

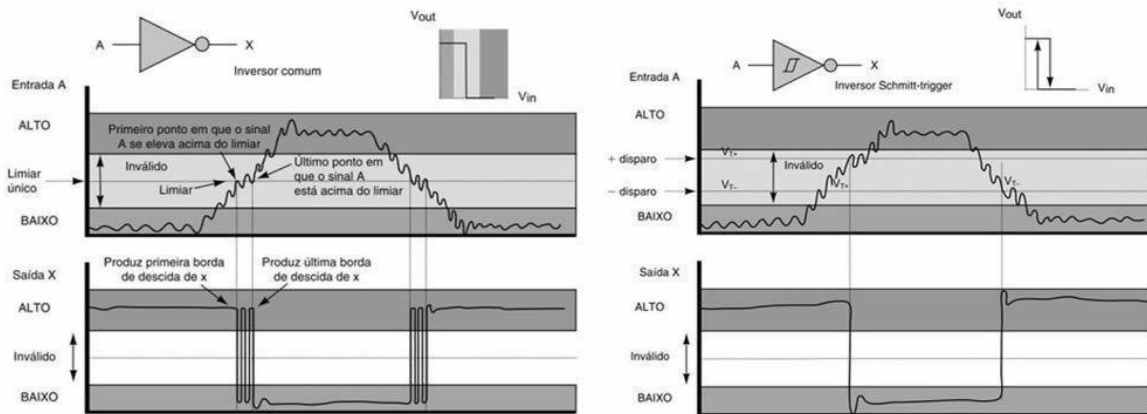
O optoacoplador é um dispositivo que promove a transferência de sinais entre dois circuitos mantendo-os eletricamente isolados, utilizando a luz como meio de comunicação. Ele é constituído por um LED que, ao ser acionado, emite luz direcionada a um fototransistor, que por sua vez conduz quando iluminado (Malvino, 2016). Esse recurso é amplamente usado para evitar interferências elétricas e proteger sistemas sensíveis.

Já a técnica de *pull-up* consiste na utilização de um resistor conectado entre a entrada de um circuito lógico e o nível lógico alto de alimentação, com o objetivo de garantir que essa entrada permaneça em estado definido quando nenhum outro dispositivo estiver aplicando sinal. Essa abordagem evita condições de alta impedância ou estados indefinidos que poderiam gerar leituras incorretas.

2.2.3 Porta lógica “Schmitt Trigger”

Uma porta lógica com características de “Schmitt Trigger” é projetada para detectar com maior precisão transições de sinais analógicos para digitais. Ela incorpora histerese em seu funcionamento, o que significa que o ponto de comutação da entrada ao nível alto é diferente do ponto de retorno ao nível baixo (Floyd, 2016). Isso garante maior imunidade contra ruídos e garante uma resposta mais estável em sinais sujeitos a flutuações ou lentas variações, algo extremamente útil em circuitos de detecção de zero ou leitura de sensores analógicos. A Figura 3 mostra a diferença entre uma porta digital comum e uma porta “Schmitt Trigger”.

Figura 3 – Porta digital comum vs “Schmitt Trigger”.

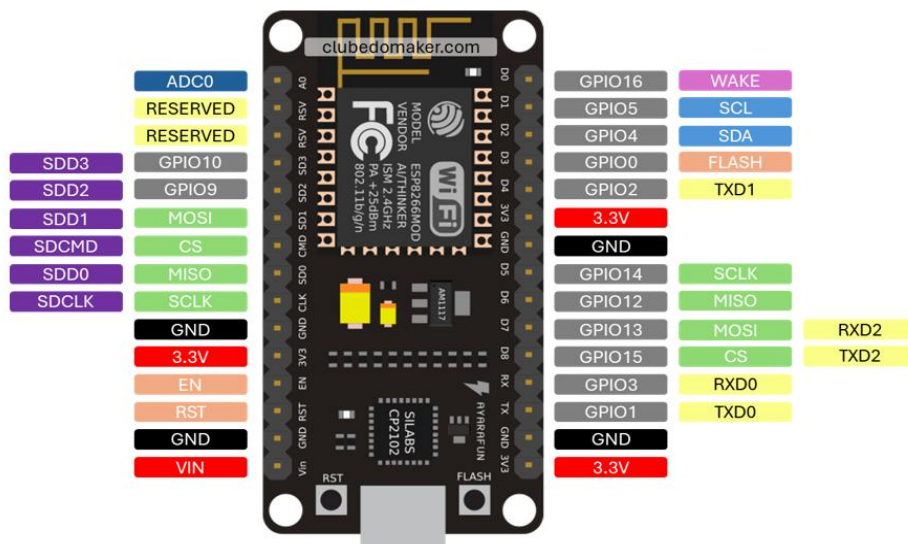


Fonte: Tecnicas (2019).

2.2.4 ESP8266

O ESP8266, mostrado na Figura 4, é um microcontrolador compacto e de baixo custo com conectividade Wi-Fi, ideal para aplicações de Internet das Coisas (IoT). Possui CPU de 32 bits, GPIOs e suporte a diversos protocolos de comunicação (Rocha, 2019). Sua maior capacidade de processamento, em comparação a placas como o Arduino®, torna-o especialmente útil em projetos de automação. Além disso, oferece múltiplas portas digitais com suporte a interrupções, recurso essencial para o controle preciso do instante de disparo de tiristores. Por esses motivos, foi o dispositivo escolhido para este projeto.

Figura 4 – Pinagem ESP8266.



Fonte: Clube do Maker (2024).

Ainda na Figura 4, é possível analisar a pinagem do microcontrolador. O módulo ESP8266 apresenta um total de 17 pinos de entrada/saída digital (GPIO), entretanto, nem todos são programáveis, sendo alguns dedicados a funções internas.

2.3 Circuito de acionamento de tiristores

2.3.1 Tiristores

O tiristor, também chamado Silicon Controlled Rectifier (SCR), é um dispositivo semicondutor de quatro camadas e três junções que atua como um interruptor controlado (Malvino, 2016). Sua condução se inicia quando se aplica um pulso de corrente ao terminal de *gate*, desde que a junção ânodo e cátodo esteja diretamente polarizada. Após ser ativado, o tiristor permanece conduzindo até que a corrente entre seus terminais principais se reduza abaixo de um valor limite conhecido como corrente de manutenção. Esse comportamento torna o tiristor ideal para aplicações em controle de potência CA, como retificadores controlados e reguladores de fase, controlando o ângulo de disparo é possível regular a quantidade de energia fornecida a uma carga.

2.3.2 Circuito *Snubber*

O circuito “*Snubber*” é uma rede de proteção geralmente composta por resistor e capacitor conectados em paralelo ao dispositivo de comutação, como um tiristor. Sua função principal é suprimir picos de tensão gerados por cargas indutivas e limitar a variação abrupta da tensão $\frac{dv}{dt}$ que pode provocar o disparo indesejado do componente (Mohan, 2014). Além de aumentar a confiabilidade do sistema, o *Snubber* reduz a tensão reversa transiente, protegendo o semicondutor contra surtos e melhorando sua durabilidade.

2.4 Circuito de proteção

A proteção contra choques elétricos deve ser uma premissa fundamental em qualquer projeto elétrico ou eletrônico. Com esse objetivo, e visando ampliar a segurança de discentes e docentes durante o uso da bancada de eletrônica de potência, foi implementado um sistema de proteção composto por um transformador de 220 V/12 V na entrada do sinal de referência, destinado à detecção da passagem por zero e à definição do instante de disparo do tiristor.

Para mitigar riscos de correntes de fuga durante o manuseio do kit, foi incorporada proteção por disjuntor diferencial residual (DDR). Considerando as especificidades do projeto, optou-se por um modelo monofásico, curva C, com corrente nominal de 25 A, compatível com a carga prevista e capaz de assegurar maior confiabilidade operacional, instalado a montante do enrolamento primário do transformador.

Na etapa de potência do sistema, foi adicionado um módulo com fusíveis de 10 A, dimensionados para proteção contra surtos decorrentes de eventuais erros de ligação ou de medição, garantindo a integridade do módulo de controle e do microcontrolador.

2.5 Soluções comerciais para bancadas de eletrônica de potência

Há diversos modelos de kits didáticos comercializados atualmente, entre eles estão os dos fabricantes Edibon®, Algetec®, Zilocchi® e Exxer®. Cada qual com suas funcionalidades, módulos adicionais e aplicações diversas. Esses kits serão analisados a seguir, por último contando com um comparativo entre valores comerciais padrão para os mesmos.

2.5.1 Datapool / Datasonic (Edibon®)

A bancada didática comercializada pela Datapool em parceria com a Edibon, mostrada na Figura 5, é um equipamento voltado ao ensino prático de eletrônica de potência, permitindo a análise e experimentação de conversores CC/CC, CC/CA, CA/CC e CA/CA. Com controle computadorizado, ela possibilita medições precisas, simulação de falhas e visualização em tempo real dos fenômenos elétricos, sendo ideal para ambientes acadêmicos e de formação técnica. Entre as desvantagens, destacam-se o alto custo de aquisição, a necessidade de manutenção especializada e a limitação quanto à flexibilidade para modificações nos circuitos, o que pode restringir abordagens mais exploratórias por parte dos alunos.

Controlada por computador para o estudo abrangente da eletrônica de potência. O equipamento oferece módulos específicos para experimentação com retificadores, inversores e conversores utilizando IGBTs, tiristores e diodos, além de possuir diversos sensores para medições precisas. Sua capacidade de integração com software baseado em LabVIEW, interface para aquisição de dados em tempo real, e compatibilidade com lousa eletrônica permitem aplicações práticas completas e demonstrações interativas para turmas inteiras.

Figura 5 – Banca de Eletrônica de Potência Edibon®.

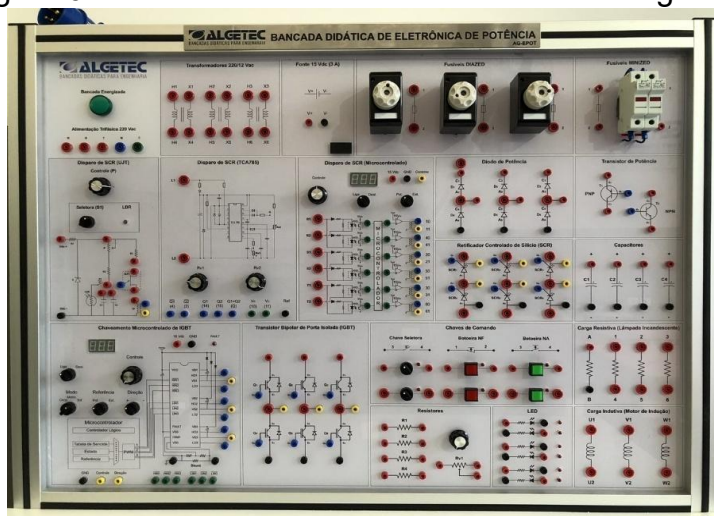


Fonte: (Edibon, 2025).

2.5.2 Bancada de eletrônica de potência Algetec®

A Algetec® disponibiliza uma bancada didática voltada ao ensino prático de eletrônica de potência, apresentada na Figura 6, é composta por módulos intercambiáveis montados em rack metálico. O sistema permite o estudo de diversos circuitos de disparo e controle, incluindo SCR, IGBT, choppers, inversores PWM e cicloconversores. Cada módulo possui componentes como tiristores, diodos, MOSFETs ou IGBTs.

Figura 6 – Bancada de Eletrônica de Potência Algetec®.



Fonte: (Algetec, 2025).

2.5.3 Kit Modular De Lorenzo®

Na Figura 7, vemos o laboratório didático DL DCA-F, da De Lorenzo do Brasil®, é um sistema modular voltado ao ensino completo de eletrônica de potência, permitindo a realização de experimentos com circuitos CA/CC (controlados e não controlados), CC/CC (como buck, boost e chopper), CC/CA, CA/CA, além de aplicações em controle em malha aberta e fechada com aquisição de dados. Composto por módulos intercambiáveis, o equipamento inclui componentes industriais como SCR, IGBT e MOSFET, bem como unidades de disparo, sensores, cargas RLC, software de apoio e controladores PID.

Figura 7 – Kit modular De Lorenzo ®.



Fonte: (De Lorenzo, 2025).

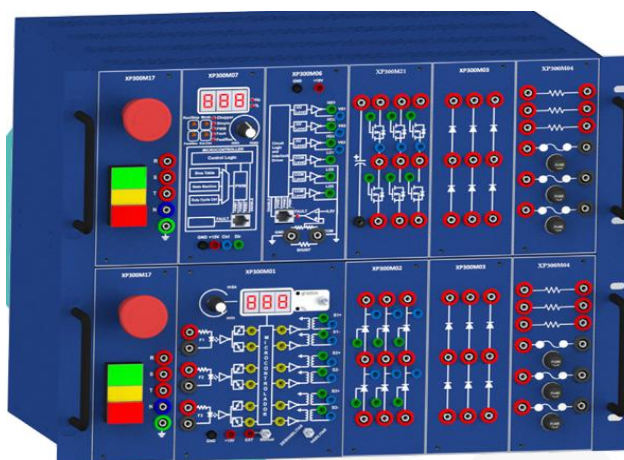
2.5.4 Rack de Eletrônica de Potência – Exxer®

A empresa Exxer® oferece uma linha de bancos didáticos, voltados ao ensino técnico e superior de eletrônica de potência. Sendo um deles a série *ELGER2000*, visto na Figura 8, que são bancos de ensaios completos e modulares destinados ao

ensino prático da eletrônica de potência, especialmente projetados para estudos avançados e experimentos em laboratório.

Os modelos disponíveis são voltados tanto para circuitos CA/CA e CA/CC quanto para CC/CA, permitindo práticas como montagem de retificadores não controlados, controlados, inversores de frequência e controladores de tensão alternada. Os módulos incluem circuitos de disparo de tiristores, retificadores, inversores com IGBTs e drivers, além de um módulo de proteção com porta-fusíveis e resistores shunt. Cada kit é acompanhado de materiais didáticos completos, incluindo guia do aluno, guia do educador, vídeo tutorial e aplicativo de realidade aumentada, além de infraestrutura compatível com software de simulação.

Figura 8 – Exxer® ELGER2000 C31-001.



Fonte: (Exxer, 2025).

2.5.5 Comparativo de valores entre as empresas pesquisadas

Consultando os fabricantes por e-mail e telefone, foi possível construir a Tabela 1, que apresenta a cotação para o ano de 2025 dos fabricantes acima listados e analisados. Essa cotação foi realizada com o valor do dólar comercial cotado em aproximadamente R\$5,59, entre os meses de janeiro e junho de 2025. Não foi considerado o valor a ser pago em frete e tributos, os quais podem variar a depender do regime de compra.

Tabela 1 – Preços comerciais de bancadas de eletrônica de potência.

Fabricante	Modelo/kit	Valor aproximado (R\$)
Edibon®	TECNEL	R\$ 428.735,00
Algetec®	AG-EPOT	R\$ 22.000,00
De Lorenzo®	DLB PEL12	R\$ 486.200,00
Exxer®	ELGER2000	R\$ 28.289,00

Fonte: Autor (2025).

Na comparação entre as quatro bancadas, observam-se perfis complementares. O modelo DLB PEL12, da De Lorenzo, destaca-se como a solução mais pronta para uso: reúne controle por FPGA com interface LabVIEW, medições isoladas e multicanais, ampla oferta de módulos e um simulador de falhas de dimmer, favorecendo práticas imediatas de retificação e controle de tensão em CA. Para

consolidar as informações obtidas sobre os módulos, foi elaborada a Tabela do Anexo 1, no qual se apresenta todas as informações levantadas sobre cada kit didático.

O modelo Tecnel, da Edibon® destaca-se pelo sistema SCADA (sistema de controle e aquisição de dados) em tempo real, e sensores dedicados, cobrindo retificação, chopper e inversores PWM, porém, requer módulos de carga não incluídos, ainda que ofereça modo multiusuário.

O kit educacional da Exxer® apresenta um repertório de atividades bem definido, incluindo retificação mono/trifásica, controle de CA, práticas com UJT (transistor unijunção), chopper step-down e inversores PWM. O modelo acompanha software e cabo, com duas opções de porte, porém, a documentação consultada não especifica a instrumentação nem as cargas.

A Algetec®, por sua vez, oferece o kit AG-EPOT, que lista uma ampla gama de experimentos, como retificação com diodos, retificadores com SCR controlados por microcontrolador, aplicações com IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) e inversores mono/trifásicos, além de material didático completo. Entretanto, a página consultada não detalha os parâmetros de medição nem traz maiores informações sobre o módulo, que, segundo o site do fabricante, possui patente protegida.

Em contraste aos conjuntos comerciais analisados, o modelo projetado prioriza baixo custo e reprodutibilidade sem abrir mão do núcleo didático essencial, o disparo de SCR via microcontrolador ESP8266, práticas de retificadores não controlados e controlados (meia-onda e onda completa) e controle de cargas CA resistivas.

Complementarmente, o projeto já definido incorpora detecção de passagem por zero por meio de transformador 220/12 V para referência e temporização de disparo, proteção por fusíveis de 10 A na etapa de potência e terminais de medição próximos aos pontos de interesse, além de módulo de cargas com grade de resistores e lâmpada incandescente.

Assim, embora as plataformas comerciais ofereçam instrumentação integrada de alto desempenho e catálogos de práticas mais amplos ou padronizados, a bancada proposta atende aos objetivos formativos centrais com arquitetura aberta, componentes acessíveis e ênfase em segurança e observação dos fenômenos, adequada a contextos acadêmicos que demandam custos reduzidos e oferecem possibilidade de manutenção e evolução do kit pelos próprios alunos.

3 METODOLOGIA

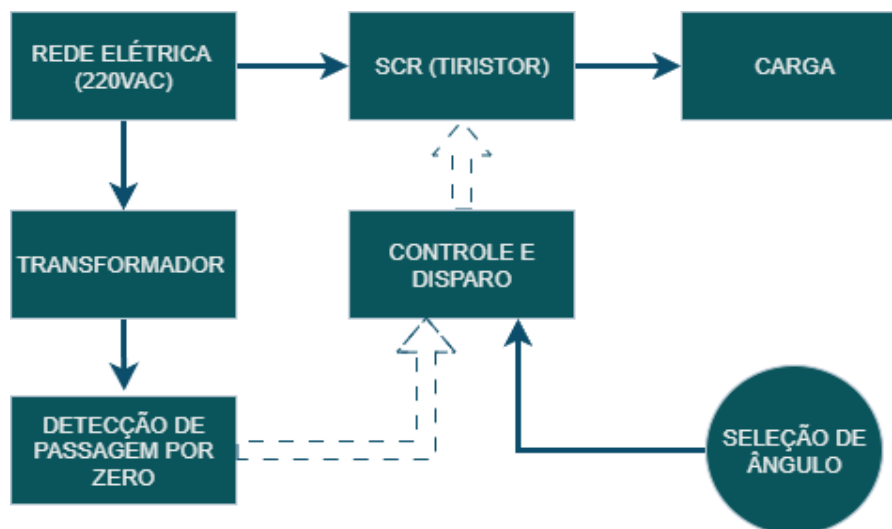
O desenvolvimento do trabalho baseou-se na confrontação entre resultados de simulação e medições experimentais, buscando verificar a correspondência entre o comportamento teórico e o desempenho prático do protótipo. As simulações foram realizadas no MATLAB®/Simulink® em condições idealizadas, enquanto os testes em laboratório utilizaram protoboard e instrumentação dedicada. A confiabilidade da proposta foi aferida pela proximidade entre formas de onda e valores médios de tensão, considerando aceitáveis as diferenças decorrentes de limitações físicas dos componentes, como quedas de tensão em semicondutores, regulação do transformador e ruídos de medição.

3.1 Cálculo de componentes

Na Figura 9 temos o diagrama em blocos do projeto, a seguir será detalhado todos os processos de escolha e cálculo de componentes, bem como características

eletroeletrônicas dos componentes utilizados e seu papel dentro do protótipo desenvolvido.

Figura 9 – Diagrama em blocos de hardware.



Fonte: (Autor, 2025).

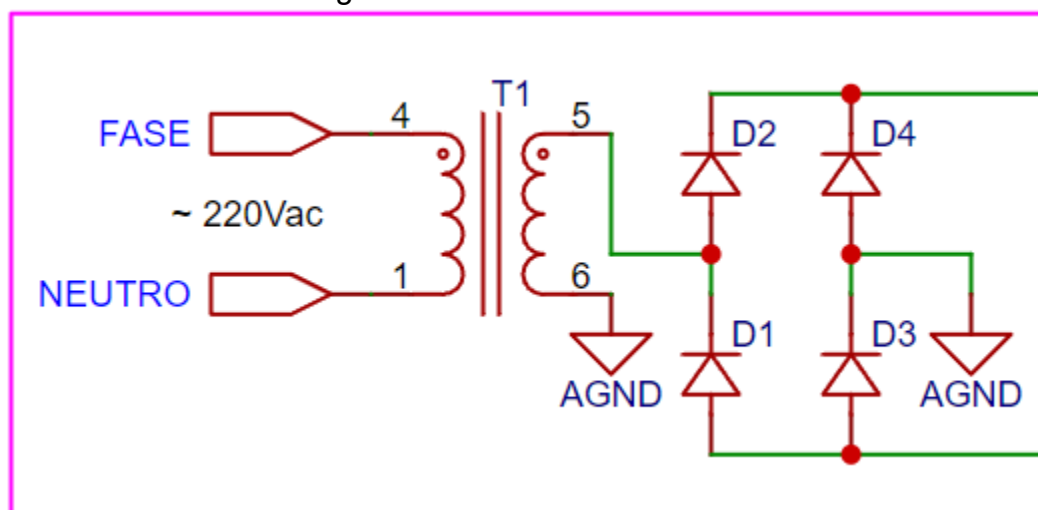
O sistema parte da rede elétrica monofásica de 220 V, que alimenta o estágio de potência com SCR, responsável por modular a tensão média aplicada à carga via controle de fase; em paralelo, um transformador de instrumentação 220/12 V promove isolamento galvânico e redução de nível para a detecção de passagem por zero, cujo sinal é condicionado (divisor/filtro e histerese por optoacoplador e *Schmitt*) e entregue ao módulo de controle e disparo baseado no microcontrolador ESP8266. Nesse módulo, o firmware em C++ usa interrupções e temporizadores para medir o período da rede (60 Hz), sincronizar a fase e mapear o comando de seleção de ângulo, proveniente de um potenciômetro lido no pino ADC do ESP8266, para um atraso α em cada semiciclo. A partir dessa referência, são agendados e aplicados pulsos de gate por um estágio de acoplamento/isolação do gate ao SCR em cada cruzamento por zero, assegurando disparo confiável.

3.1.1 Transformador e retificador de sinal de entrada

Para aumentar a segurança de discentes e docentes no uso do projeto, foi incorporado um transformador que reduz a tensão de 220 V para 12 V, diminuindo os riscos durante os experimentos. O transformador utilizado tem entrada 110/220 V, saída 12+12 V e corrente máxima de 500 mA.

A Figura 10 apresenta o circuito retificador projetado. Optou-se pela ponte monofásica 2W10, cuja corrente média de 2 A e tensão reversa de 700 V garantem margem de segurança e robustez ao projeto, além de baixo custo e ampla disponibilidade.

Figura 10 – Circuito retificador.



Fonte: (Autor, 2025)

No secundário do transformador obtemos uma tensão de saída de 12 V, com frequência de 120 Hz na saída do retificador de onda completa, a equação 03 apresenta o período encontrado nesse ponto do circuito.

Ao analisar o período:

$$T = \frac{1}{f} \rightarrow T = \frac{1}{120} \rightarrow T = 8,33mS \quad (3)$$

Esse cálculo será incorporado pelo ESP8266 para cálculo do momento de chaveamento do SCR.

3.1.2 Optoacopladores

O optoacoplador desempenha um papel fundamental no sistema de controle desenvolvido. Nesse projeto, foram utilizados dois modelos distintos: o 4N35, empregado no circuito de detecção de passagem por zero, e o MOC3021, destinado ao acionamento do tiristor. Essa escolha visa garantir isolamento elétrico entre a rede de potência e os circuitos de controle, proporcionando maior segurança e confiabilidade ao sistema.

3.1.2.1 Circuito de detecção de passagem por zero (4N35)

O optoacoplador, representado na Figura 11, escolhido para o circuito de detecção de passagem por zero foi o 4n35. Ele consiste em um LED infravermelho no lado de entrada e um fototransistor no lado de saída (Motorola, 1995), suas principais características são:

- Tensão de isolamento: 5300 V_{rms} .
- Tensão de entrada: $V_F = 1,2 \sim 1,5 V$.
- Corrente de entrada típica: 10 mA.
- Tensão máxima de saída coletor-emissor: 30 V.
- Corrente máxima de coletor: 100 mA.
- Tempo de resposta típico: 2 μs .

Considerando a tensão eficaz na saída do secundário do transformador de $V_{rms} = 12 V$

Pelo datasheet do 4N35 a queda direta de tensão no LED interno (V_f) é cerca de 1,5 V, para uma corrente (I_f) máxima de 15 mA. Trabalhando com uma corrente $I_f = 10 \text{ mA}$ e analisando a entrada do optoacoplador, pela Lei de Ohm podemos obter a equação 4 (Boylestad, 2014):

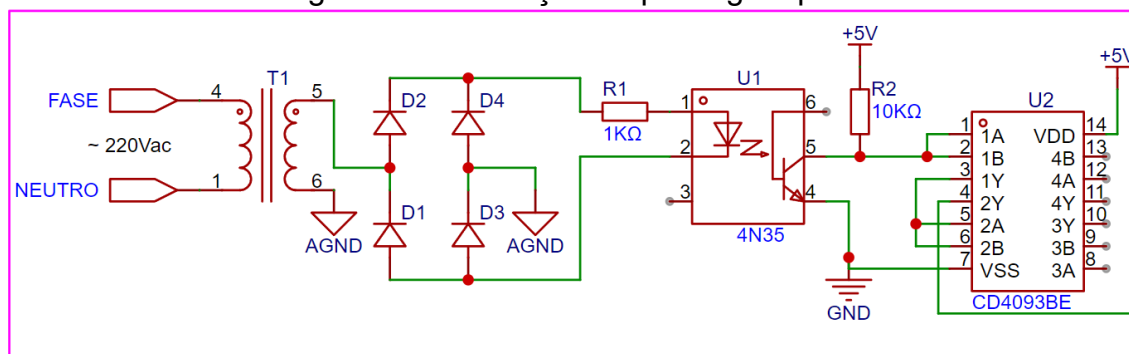
$$R = \frac{V_{rms} - V_f}{I_f} \quad (4)$$

Chamaremos de $R1$ o resistor a ser utilizado em série com o ânodo do 4N35. Agora aplicando em (2) os valores obtidos anteriormente:

$$R1 = \frac{12 - 1,5}{0,01} = 1050 \, \Omega \quad (5)$$

Considerando a padronização comercial e uma margem de segurança, adota-se um resistor de valor comercial de 1 k Ω , o que limita a corrente do LED a um valor seguro, garantindo a operação adequada do optoacoplador e a integridade do circuito. Na Figura 11, temos o circuito de detecção com o optoacoplador completo:

Figura 11 – Detecção de passagem por zero.



Fonte: Autor (2025).

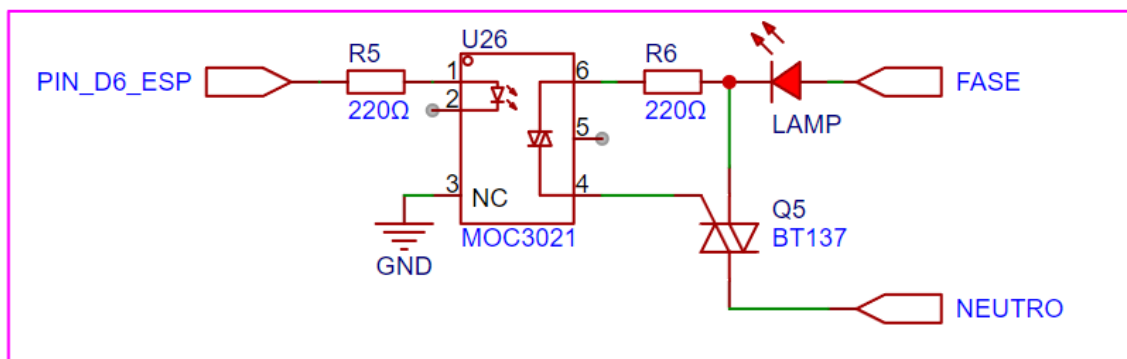
3.1.2.2 Circuito de acionamento (MOC3021)

Para isolar a conexão entre o pino de saída do microcontrolador e o gate do SCR, foi escolhido o optoacoplador MOC3021, por oferecer isolamento galvânico e acionamento confiável em CA, com baixo custo e ampla disponibilidade. Suas principais características incluem:

- Tensão de isolamento: 5300 Vrms;
- Tipo de saída: TRIAC;
- Tensão de acionamento do diodo (LED): 1,2–1,5 V;
- Corrente de acionamento máxima: 15 mA (Texas Instruments, 1995).

A Figura 12 ilustra o bloco de controle CA de carga resistiva.

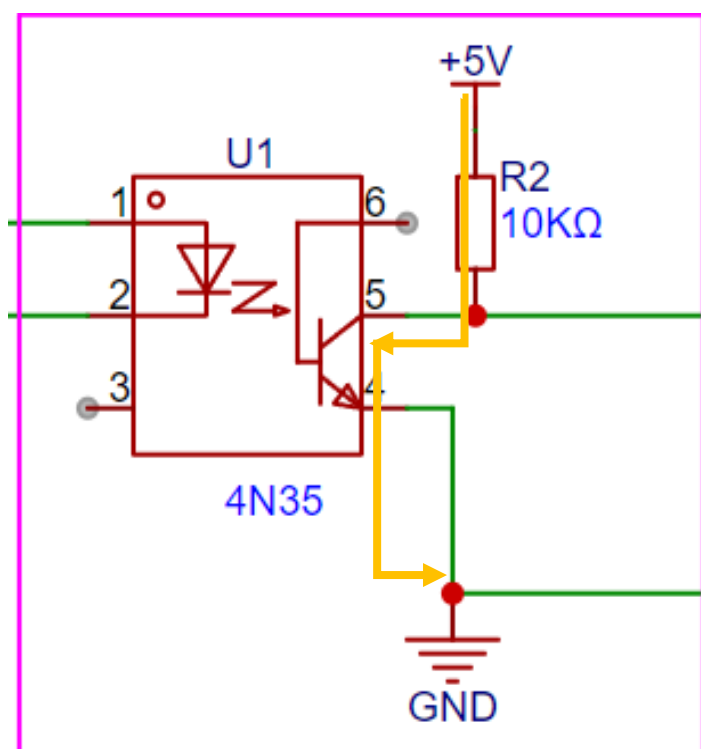
Figura 12 – Controle CA de carga resistiva.



Fonte: Autor (2025).

3.1.3 Pull-up e “Schmitt Trigger”

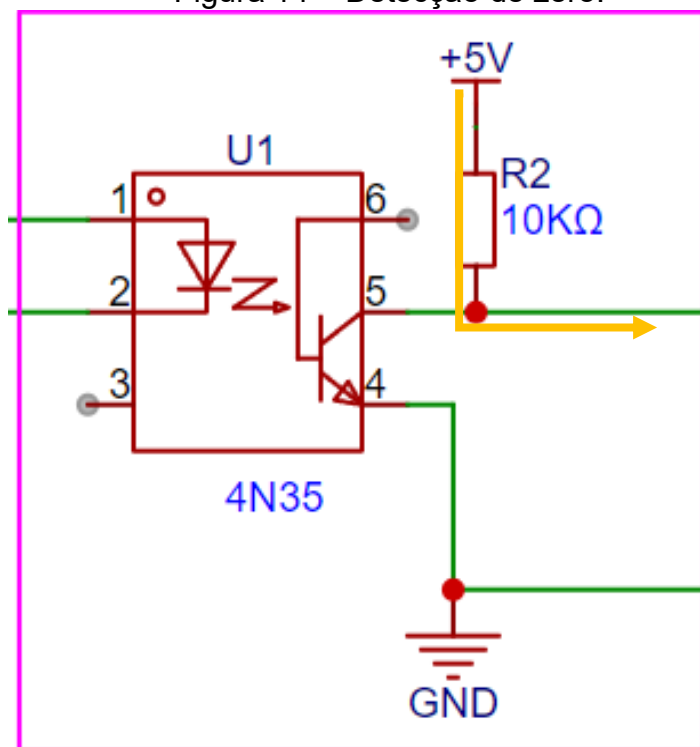
No projeto, a técnica de *pull-up* foi aplicada para assegurar níveis lógicos estáveis nas entradas das portas NAND conectadas ao ESP8266. Na Figura 13 e Figura 14 é possível ver um corte do circuito projetado, para analisar seu funcionamento abaixo.

Figura 13 – 4N35 e *pull-up*.

Fonte: Autor (2025).

Durante os intervalos em que a tensão retificada excede o limiar de condução do LED interno do 4N35, o fototransistor entra em condução, próximo à saturação, estabelecendo a corrente entre VCC (5V) e o GND, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 14 – Detecção de zero.



Fonte: Autor (2025).

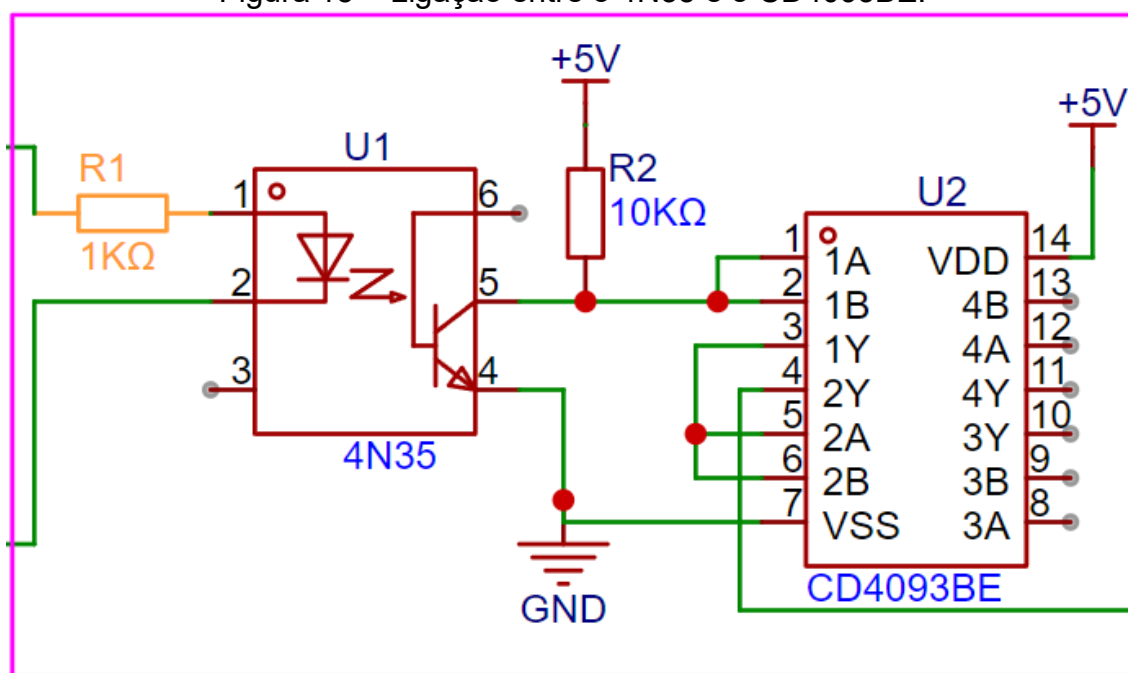
Quando a tensão na saída da ponte retificadora cruza a região próxima de zero e o LED do 4N35 deixa de conduzir, apresentado na Figura 14, o fototransistor passa ao estado de corte. Nessa condição, o resistor de *pull-up* impõe nível alto (5 V) na entrada do CI *Schmitt Trigger*. Em condução, o fototransistor força o nível baixo (0 V) ao descarregar o nó de entrada, produzindo uma forma de onda digital limpa e com rejeição de ruído.

A porta digital *Schmitt Trigger* selecionada é a CD4093BE, um CI CMOS com quatro portas NAND de duas entradas, operando entre 3 V e 15 V. Com as duas entradas de uma mesma porta conectadas em paralelo, o dispositivo passa a atuar como inversor com histerese.

O coletor (pino 5) do 4N35 conecta-se ao nó de entrada da primeira porta (pinos 1 e 2) do CD4093BE por meio de um resistor de pull-up a 5 V, enquanto o emissor (pino 4) é conectado ao GND. O encadeamento de duas portas “Schmitt Trigger” recondiciona o sinal e restabelece a fase original, aprimorando a imunidade a ruídos.

A Figura 15 apresenta o esquema completo do circuito de sincronismo entre o 4N35 e a CD4093BE. A alimentação em corrente contínua é fornecida por uma fonte de 5 V/2 A, suficiente para energizar o CD4093BE e os demais circuitos lógicos da bancada.

Figura 15 – Ligação entre o 4N35 e o CD4093BE.



Fonte: Autor (2025).

O pino 4 do CD4093BE, correspondente à saída da segunda porta NAND com disparo de Schmitt, é interligado ao pino D2 do ESP8266 (GPIO4), empregado como entrada de sincronismo por interrupção externa. A ligação deve incluir adequação de nível lógico (5 V $\rightarrow$ 3,3 V) para atender aos limites do microcontrolador. Os detalhes da rotina de aquisição e processamento do sinal serão apresentados na seção seguinte.

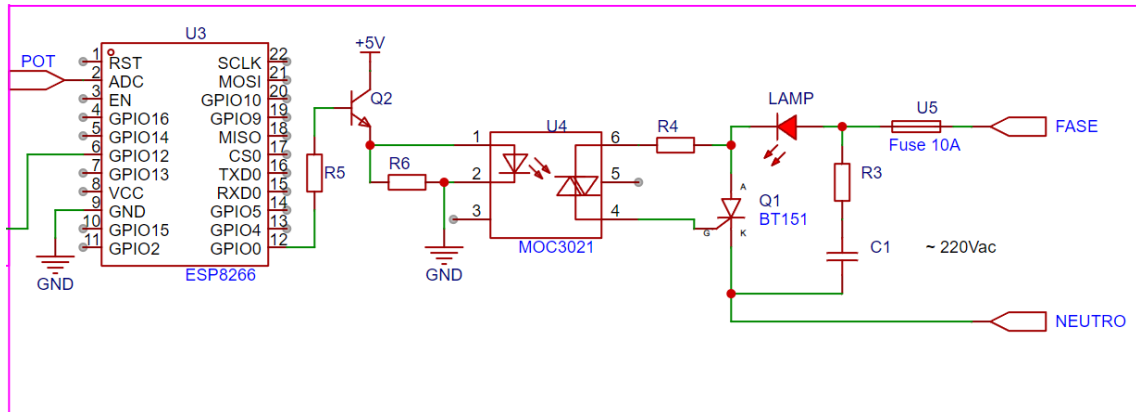
3.1.4 Circuito de controle e potência

O microcontrolador não deve ser conectado diretamente ao gate do SCR. A preservação do isolamento galvânico evita a propagação de surtos de tensão ou corrente provenientes da rede ao ESP8266, mitigando risco de dano.

Nas práticas com retificação de meia-onda controlada por SCR, os GPIOs do ESP8266 fornecem no máximo 12 mA (Pieter, 2017), ao passo que o gate do SCR tipicamente requer uma corrente $I_g \approx 10 \text{ mA}$ e $V_G \leq 1,5 \text{ V}$ (Texas Instruments, 1995). Essa proximidade, somada a tolerâncias e transientes, reduz a margem para acionamento direto e pode sobrecarregar o microcontrolador. Adotou-se, portanto, uma fonte externa de 5 V e um estágio de acionamento com transistor NPN (BC547) em configuração coletor comum, ou seguidor de emissor, o pino GPIO apenas polariza a base, via resistor, e o caminho coletor emissor fornece a corrente de gate. Assim, obtém-se ganho de corrente mantendo a corrente no pino dentro das especificações.

A Figura 16 apresenta o esquema completo de ligação entre o ESP8266, o MOC3021 e o SCR (BT151), incluindo o estágio em coletor comum.

Figura 16 – Circuito de controle de SCRs e etapa de potência.



Fonte: Autor (2025).

Considerando a tensão de saída do emissor como sendo $V_{out} = 1,5 \text{ V}$ a tensão de saída do GPIO do ESP8266 $V_{in} = 3,3 \text{ V}$ e a topologia de seguidor de emissor.

Assumindo:

- $V_{in} = 3,3 \text{ V}$;
- $R5 = ?$;
- $R6 = 220 \Omega$
- $\beta_{min} = 110$ (On Semiconductor, 2004).
- $V_{BE} = 0,70 \text{ V}$ (On Semiconductor, 2004).

Pela análise das correntes na malha única (Malvino, 2016):

$$V_{in} - I_b * R5 - V_{be} - I_e * R6 = 0 \quad (6)$$

$$V_{in} - I_b * R5 - V_{be} - I_b(1 + \beta) = 0;$$

$$I_b = \frac{V_{in} - V_{be}}{R5 + (\beta + 1) * R6} \quad (7)$$

$$V_{out} = I_e * R6 = (\beta + 1) * I_b * R6 \quad (8)$$

$$R5 = (\beta + 1) * R6 * \left(\frac{V_{in} - V_{be}}{V_{out}} - 1 \right) \quad (9)$$

Substituindo na equação 09 os valores assumidos:

$$R5 = (110 + 1) * 220 * \left(\frac{3,3 - 0,7}{1,5} - 1 \right) = 17908 \Omega \quad (10)$$

A equação 10 retorna o valor de $R5$, adotando valores comerciais, selecionou-se $R5 = 18 \text{ k}\Omega$ como resistor de base, assegurando a corrente de excitação especificada no LED do optoacoplador MOC3021.

3.2 Programação ESP8266

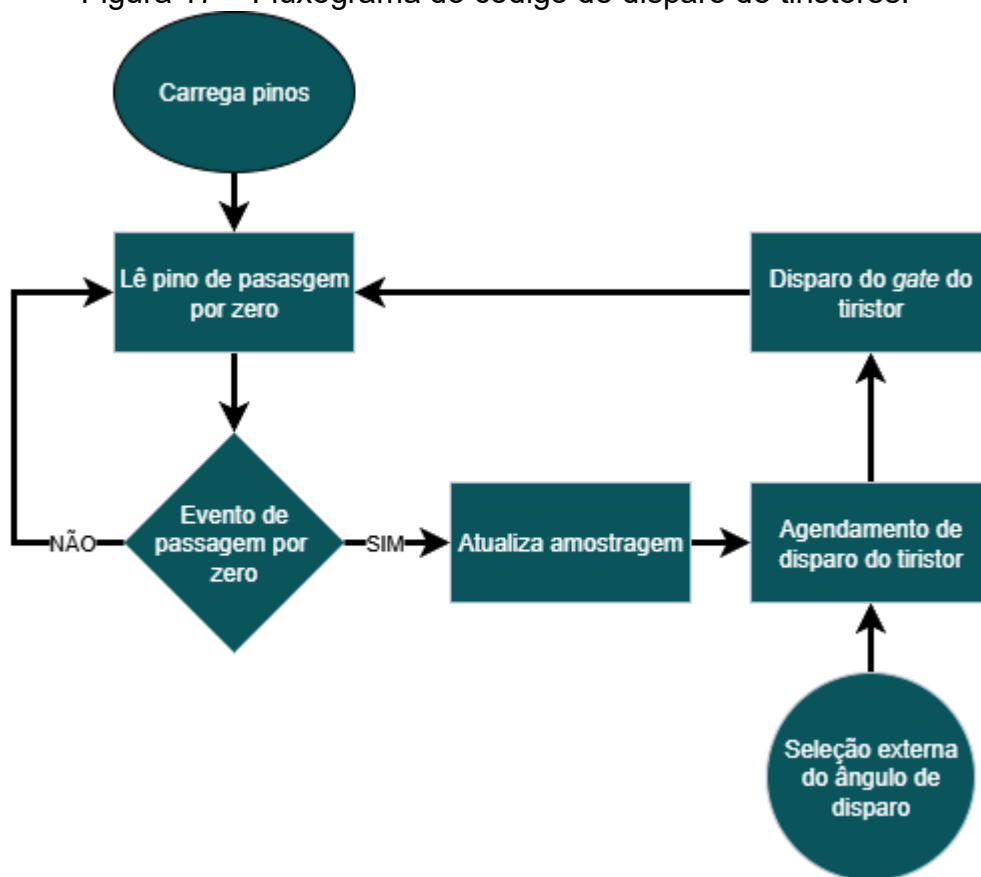
A programação do ESP8266 pode ser realizada em diferentes plataformas; entretanto, é mais comum utilizar o Arduino core (C/C++) no Arduino IDE (ou ambientes compatíveis), aproveitando a orientação a objetos e o ecossistema de bibliotecas (Arduino, 2025).

Neste projeto, adotou-se a linguagem C++ em razão de sua robustez e confiabilidade. O código-fonte integral utilizado nos experimentos, responsável pelo disparo dos SCRs, está disponível publicamente no GitHub, arquivo *gate.ino*,

acessível em: <https://github.com/RamonFAF/TCC---RAMON-FERREIRA/blob/main/gate.ino>.

Na Figura 17 é apresentado o fluxograma de funcionamento do código desenvolvido, no qual, após a configuração dos pinos, a entrada de passagem por zero é monitorada continuamente; ocorrendo o evento, a rotina de interrupção atualiza as variáveis de amostragem (registro temporal e período da rede) e, com base no ângulo de disparo selecionado externamente, calcula-se o atraso dentro do semiciclo. Em seguida, o algoritmo agenda o comando e aplica o pulso de gate ao tiristor no instante previsto, retornando então ao monitoramento da passagem por zero para manter o sincronismo com a rede.

Figura 17 – Fluxograma do código de disparo de tiristores.



Fonte: Autor (2025).

3.2.1 Bibliotecas utilizadas

A biblioteca *Ticker* permite agendar *callbacks* para execução em intervalos predeterminados, de forma não bloqueante, substituindo o uso de *delay()* no fluxo principal. É possível configurar o número de repetições com *repeats=0*, o *callback* roda indefinidamente e ela funciona como uma *thread*, sem utilizar interrupções de temporizadores de hardware, operando a partir de *micros()* ou *millis()*. Por isso, é adequada para criar pulsos de gate temporizados sem travar o microcontrolador nem prejudicar outras tarefas do *loop* (Arduino, 2025).

3.2.2 Rotina de interrupção

Interrupção, em microcontroladores, é um mecanismo de desvio imediato do fluxo normal do programa quando ocorre um evento externo, como uma mudança em um pino ou interno, como um *timer* que “estoura”. Quando o evento dispara, a CPU salva o contexto, consulta a tabela de vetores de interrupção e executa a ISR (*Interrupt Service Routine*), uma função curta e sem parâmetros ou retorno dedicada a tratar aquele evento. Ao terminar a ISR, a CPU restaura o contexto e volta exatamente de onde parou no *loop* principal (Arduino, 2025). O ESP8266 é capaz de utilizar interrupções em qualquer um de seus pinos GPIO, exceto no GPIO16 (Clube do Maker, 2025).

Na linguagem do Arduino® se utiliza a função `attachInterrupt()` para se trabalhar com interrupções. A sintaxe recomendada por Arduino (2025) é a seguinte: `attachInterrupt(digital PinTo Interrupt(pin), ISR, mode)` no qual:

- *pin*: entrada conectada ao detector de passagem por zero.
- *ISR*: função sem parâmetros e sem retorno, executada no evento, deve ser curta, sem chamadas bloqueantes, alterando apenas variáveis marcadas como *volatilidade*.
- *mode*: define quando a interrupção deve ser acionada. Quatro constantes são predefinidas como valores válidos:
 - **LOW** acionar a interrupção quando o estado do pino for LOW;
 - **CHANGE** acionar a interrupção quando o sempre estado do pino mudar;
 - **RISING** acionar a interrupção quando o estado do pino for de LOW para HIGH apenas;
 - **FALLING** acionar a interrupção quando o estado do pino for de HIGH para LOW apenas.

Em C/C++, uma variável *volatile* é aquela cujo valor pode mudar a qualquer momento por causas externas, como as interrupções, instruindo o compilador a não otimizar acessos e sempre ler ou gravar diretamente na memória.

No código projetado, a rotina de interrupção (ISR) `zcISR()` é explicitamente alocada em RAM por meio do atributo `ICACHE_RAM_ATTR`, em vez de residir na FLASH. Isso é relevante em ISRs porque a execução a partir da FLASH pode ficar indisponível ou apresentar maior latência durante certas operações internas, introduzindo atrasos ou até travamentos. A `zcISR()` é acionada a cada passagem por zero da rede (detecção na borda de subida), calcula o período com base no intervalo entre eventos consecutivos e sinaliza que uma nova medição está disponível. Esse mecanismo é fundamental para sincronizar o disparo do SCR com a posição instantânea da forma de onda.

3.2.3 Disparo do gate

A função de disparo do gate é implementada colocando o pino do gate em nível alto (HIGH), mantendo por um tempo determinado, informado na variável `GATE_PULSE_US`, que para esse projeto foi definido em 100µs. Passados esses 100 µs, a função coloca o pino em nível baixo (LOW).

3.2.4 Função de Inicialização (setup)

A função `setup()` é executada uma única vez no início do *sketch*, imediatamente após a energização ou um *reset*, e é utilizada para inicializar variáveis, configurar o modo dos pinos (INPUT/OUTPUT), iniciar bibliotecas e demais recursos necessários (Arduino, 2025).

Nessa rotina, configuram-se os pinos do ESP8266 como entrada ou saída. O resistor de *pull-up* interno é habilitado por meio de `INPUT_PULLUP`, proporcionando nível lógico estável sem componentes externos e implicando lógica ativa em nível baixo, quando acionado, o pino é referenciado ao GND. Essa configuração reduz a suscetibilidade a flutuações e facilita a leitura de teclas e sensores, desde que acompanhada de técnicas complementares de mitigação de ruído.

No `setup()` também foram definidas as interrupções para detecção da passagem por zero e para o botão, empregando o modo de detecção `CHANGE` e rotinas de serviço de interrupção (ISRs) curtas e não bloqueantes, que apenas registram *timestamps*, atualizam *flags volatile* e retornam prontamente. Além disso, garante-se que o hardware e a interface estejam prontos antes do *loop* principal: as saídas são inicializadas em estado determinístico, por exemplo, com o pulso de *gate* desabilitado, as *flags* são limpas e os temporizadores de referência são sincronizados via `micros()` e `millis()`, assegurando operação consistente e reproduzível.

3.2.5 Loop principal

A função `loop()` implementa o ciclo de controle de fase sincronizado com a rede. No código projetado, a cada amostra válida, sinalizada pela variável `sampleReady` com valor `true`, o código calcula o atraso temporal, variável `delayUs`, a partir do potenciômetro (`POT_PIN`) e agenda, via a biblioteca `Ticker`, o instante exato para o disparo do SCR por meio da função `fireGate()`.

Logo no início, utiliza-se um bloco atômico com `noInterrupts()` e `interrupts()` para copiar o valor da variável `period` para a variável local `p` e baixar a *flag* `sampleReady`, marcando-a como `false`. Essa prática evita que os dois fluxos de execução acessem e alterem os mesmos dados sem coordenação, o que geraria estados inconsistentes. Assim, a ISR que atualiza a variável `period` e `sampleReady` não interfere nesse trecho, garantindo que o cálculo subsequente seja feito sobre um conjunto consistente de dados temporais.

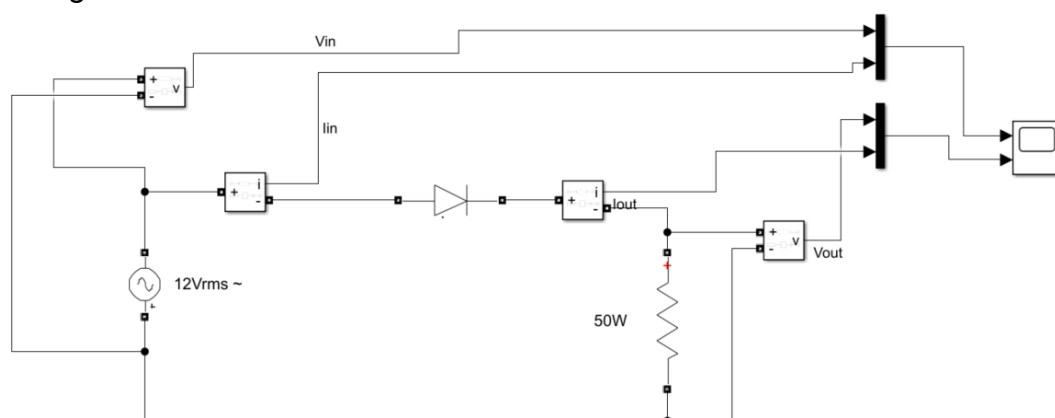
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Simulação via Matlab®

Para validar o projeto, realizaram-se simulações no MATLAB® utilizando a ferramenta *Simulink*, visando reproduzir e comparar as formas de onda características de cada topologia retificadora. As simulações adotaram condições nominais e idealizadas dos componentes, com carga puramente resistiva de 50 W.

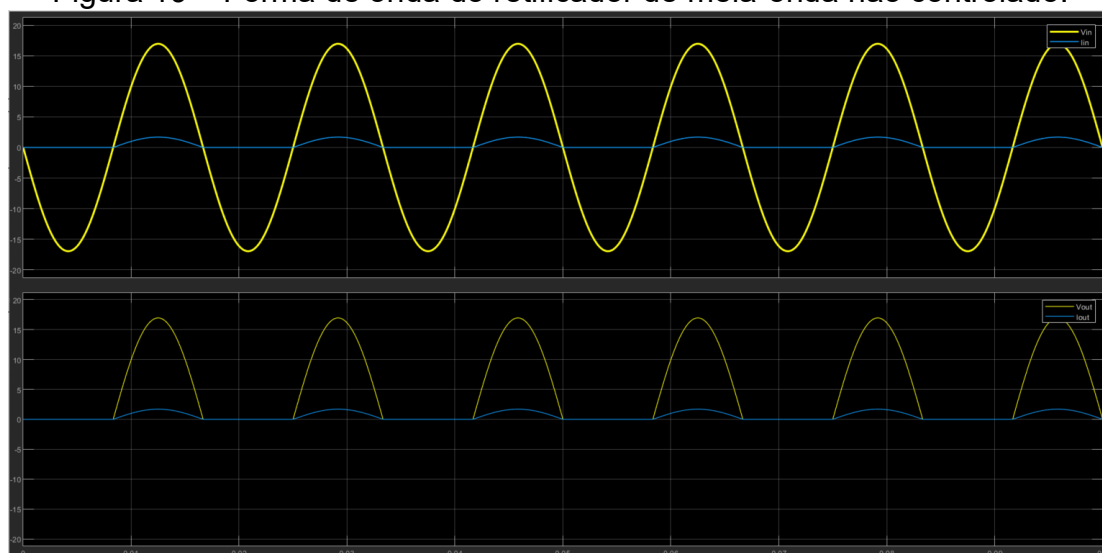
Na Figura 18 é apresentado o circuito montado no Simulink®, representando um o retificador de meia-onda não controlado.

Figura 18 – Circuito simulado do retificador de meia-onda não controlado.



Fonte: Autor (2025).

Figura 19 – Forma de onda do retificador de meia-onda não controlado.

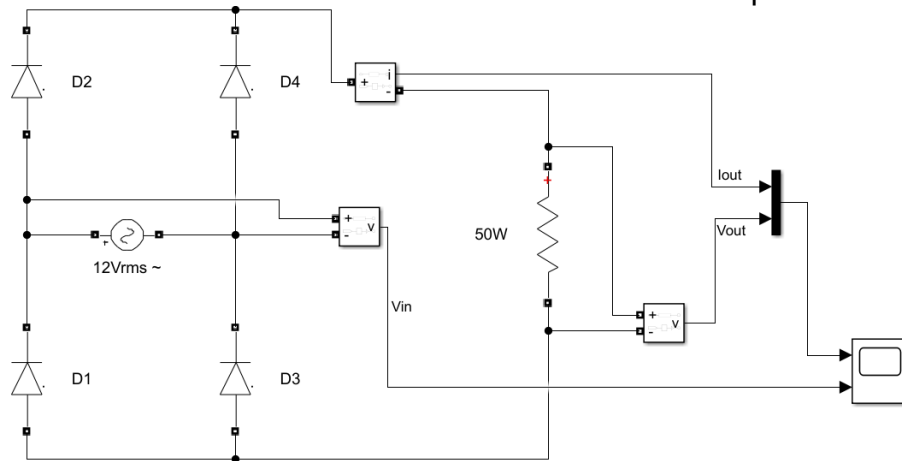


Fonte: Autor (2025).

Na figura 19 observam-se, no topo, V_{in} e I_{in} , e, abaixo, V_{out} e I_{out} . De acordo com o esperado para um retificador monofásico não controlado de meia-onda com carga resistiva, o diodo conduz apenas nos semiciclos positivos: V_{out} acompanha V_{in} e, nos negativos, V_{out} e I_{out} anulam-se. A corrente na carga permanece em fase com a tensão, reproduzindo a meia-onda retificada, enquanto a corrente de entrada é pulsante e nula durante o bloqueio do diodo. O valor médio de saída é positivo e o *ripple* ocorre na frequência da rede, confirmando o comportamento teórico.

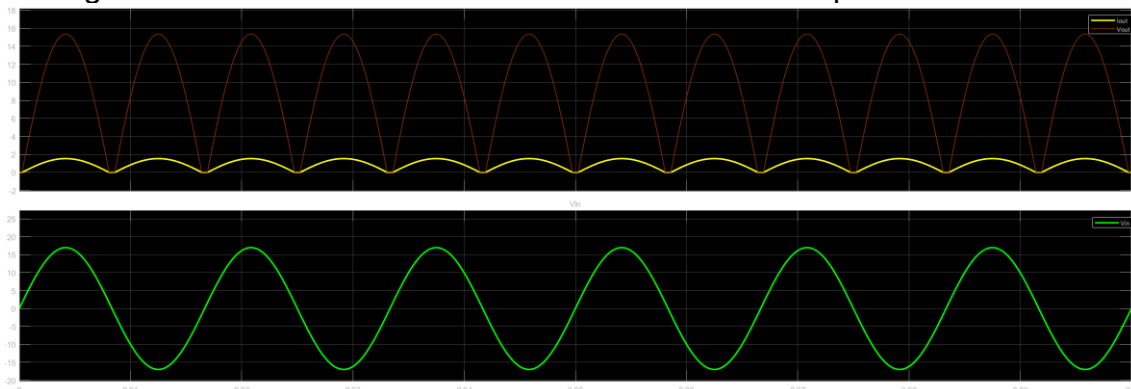
Na Figura 20 é apresentado o circuito retificador de onda completa não controlado e na Figura 21 a forma de onda na saída para essa topologia.

Figura 20 – Circuito simulado do retificador de onda completa não controlado.



Fonte: Autor (2025).

Figura 21 – Forma de onda do retificador de onda completa não controlado .



Fonte: Autor (2025).

Na figura 23 é apresentado, de cima para baixo, as formas de V_{out} e I_{out} , o sinal de gatilho aplicado ao gate e a senoide de entrada V_{in} . O tiristor é acionado em $\alpha=90^\circ$ (*ângulo de disparo*), definido pelo bloco de PWM, para encontrar α é necessário ter o valor da frequência do sinal de referência, assim, pela equação (1) temos:

$$T = \frac{1}{f} \rightarrow f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,01666} \approx 60Hz \quad (11)$$

$$\alpha = t * \omega \quad (12)$$

O tempo de disparo (t) pode ser calculado pela equação 13, aplicando a frequência encontrada na equação 11 e escolhendo o ângulo $\alpha = 90^\circ$, ω é a frequência angular da rede, no código para o microcontrolador ele é medido a partir da última passagem por zero.

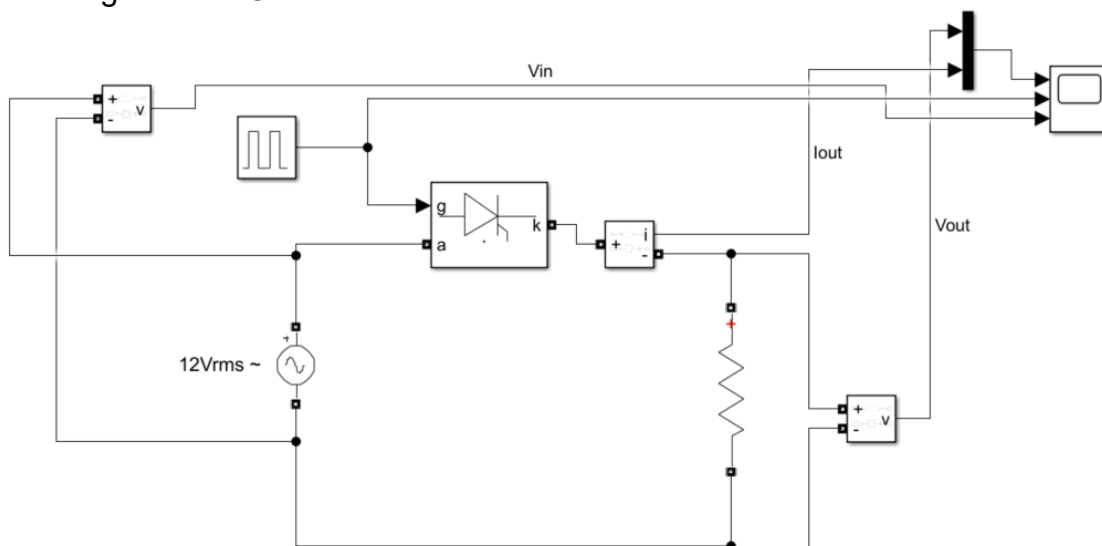
$$\omega = 2 * \pi * f \quad (13)$$

Aplicando a equação 13 e a equação 11 na equação 12, podemos escrever t como:

$$t = \frac{\alpha}{\omega} = \frac{90}{2 * \pi * 60} = 0,004167s \text{ (} f \text{ em radianos)}. \quad (14)$$

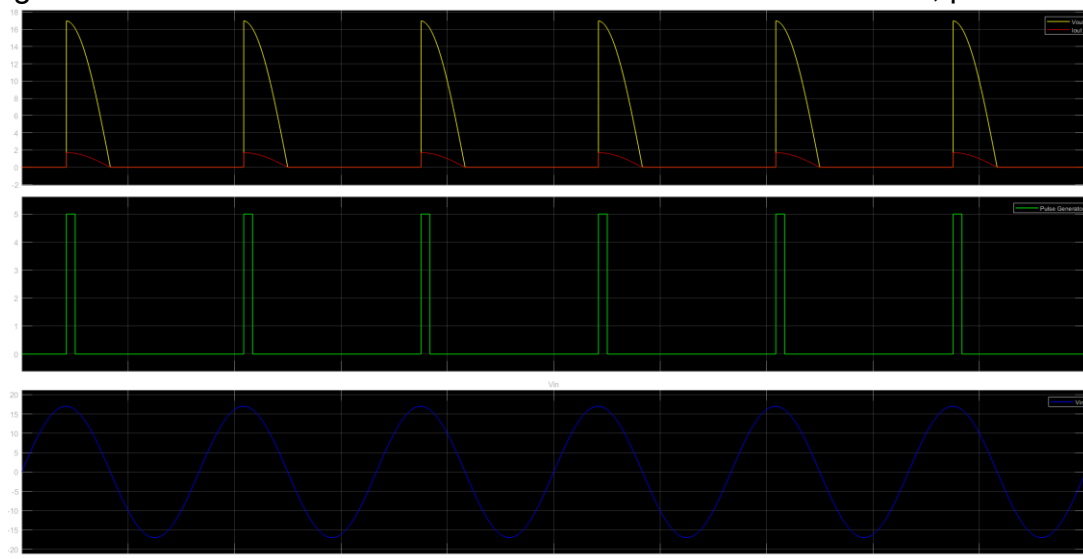
A partir de α , o dispositivo entra em condução no tempo $t=0,004167$ segundos e V_{out} reproduz a porção positiva de V_{in} até o próximo cruzamento por zero (ou até a corrente cair abaixo da corrente de manutenção), enquanto i_{out} permanece em fase para carga resistiva. A variação de α regula o tempo de condução e, por conseguinte, o valor médio na carga, em conformidade com o modelo do retificador monofásico controlado de meia-onda. Na Figura 22, temos o circuito simulado do retificador de meia-onda controlado, simulado utilizando o Simulink®.

Figura 22 – Circuito simulado do retificador de meia-onda controlado.



Fonte: Autor (2025).

Figura 23 – Forma de onda do retificador de meia-onda controlado, para $\alpha=90^\circ$.

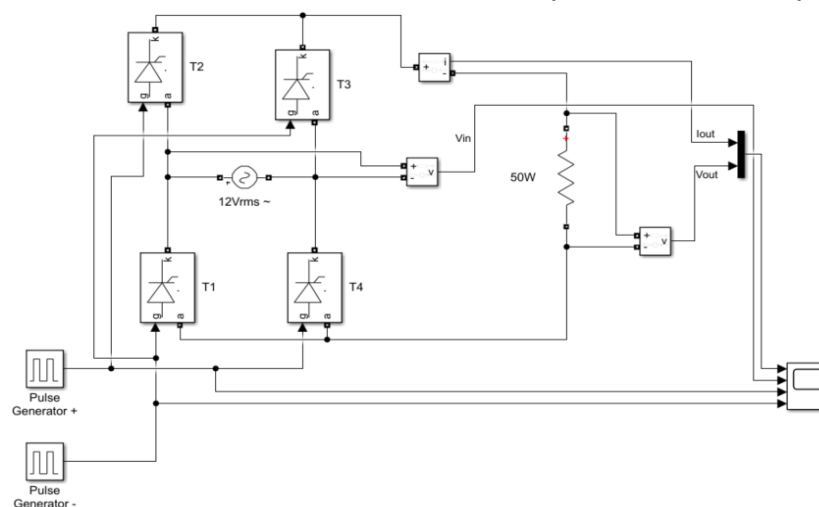


Fonte: Autor (2025).

Por fim, a Figura 24 apresenta o esquema elétrico simulado do retificador monofásico controlado de onda completa. Na simulação adotou-se $\alpha=90^\circ$. A Figura 25 exibe as formas de tensão de entrada (V_{in}), tensão de saída (V_{out}), corrente de saída (i_{out}), bem como os sinais de comando dos tiristores. Observa-se que, em cada semiciclo, a condução se inicia em $\omega \cdot t = \alpha$ e cessa no cruzamento por zero, produzindo

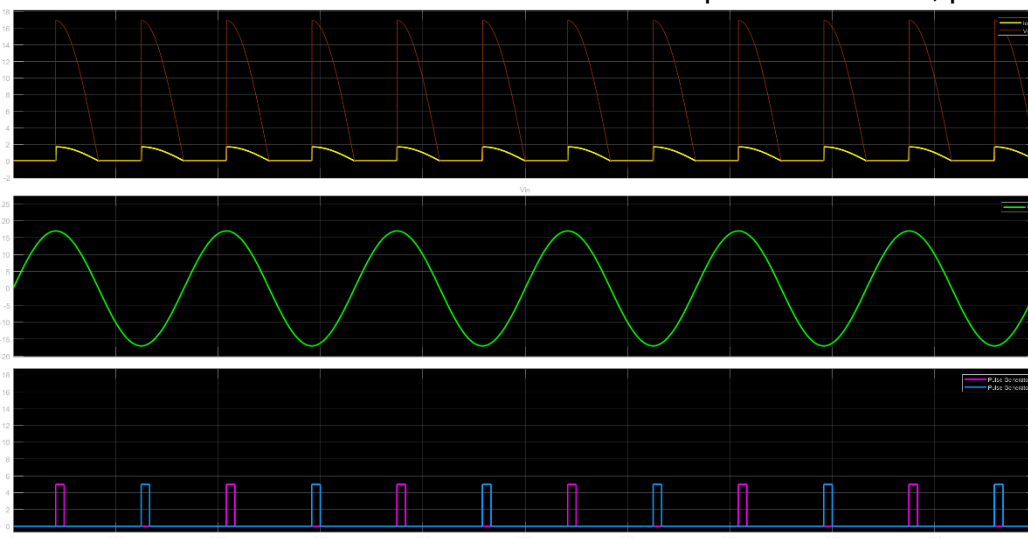
dois pulsos positivos por período; para carga resistiva, i_{out} permanece em fase com V_{out} .

Figura 24 – Circuito do retificador de onda completa controlado, para $\alpha=90^\circ$.



Fonte: Autor (2025).

Figura 25 – Forma de onda do retificador de onda completa controlado, para $\alpha=90^\circ$.



Fonte: Autor (2025).

4.2 Validação experimental de formas de onda

Nos ensaios práticos realizados em laboratório, os circuitos montados em protoboard foram monitorados com um osciloscópio. As formas de onda obtidas reproduziram aquelas previstas nas simulações, corroborando o controle adequado do ângulo de disparo e a precisão no ajuste da potência entregue à carga. As oscilações e variações observadas estiveram de acordo com o comportamento esperado, validando o funcionamento dos circuitos de disparo.

Para obter as formas de onda e analisar o comportamento dos retificadores projetados, bem como dos pulsos enviados pelo ESP8266, utilizou-se o osciloscópio modelo DSOX1204A, ilustrado na Figura 26, da fabricante Keysight®. O equipamento

dispõe de quatro canais analógicos e apresenta largura de banda entre 70 e 200MHz (Keysight, 2025).

Figura 26 – Osciloscópio DSOX1204A.



Fonte: Keysight (2025).

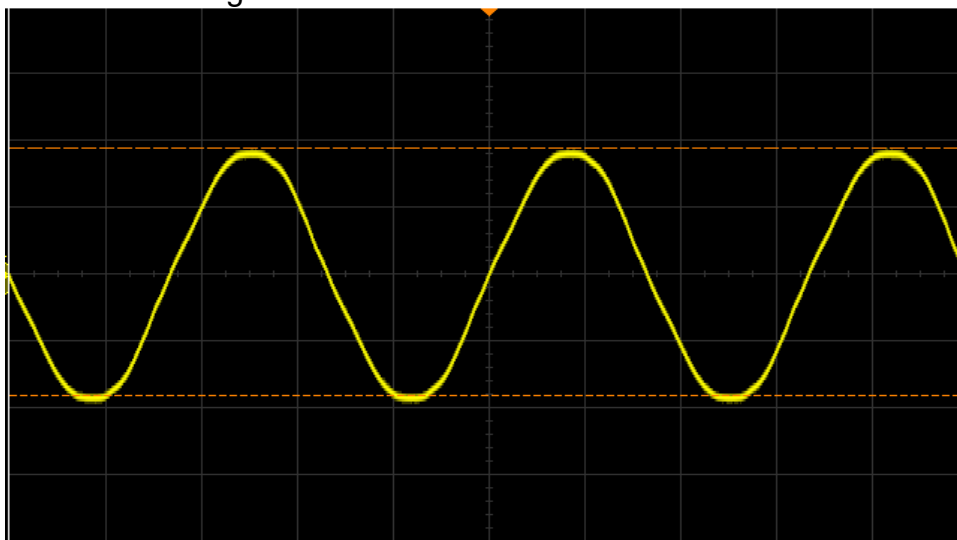
Como discutido previamente, o ângulo de disparo α varia de 0° a 180° , intervalo correspondente ao semiciclo positivo da senoide de entrada. Para ajustar α , emprega-se um potenciômetro de 10 k Ω alimentado em 3,3 V, cujo cursor é lido no pino A0 do ESP8266 pelo conversor A/D (analógico/digital) de 10 bits (leituras de 0 a 1023).

Após a detecção de passagem por zero, o ESP8266 amostra o potenciômetro e converte a leitura em um atraso temporal t dentro do semiciclo, sendo a leitura mínima $\alpha=0^\circ$ e $t=0$, leitura máxima $\rightarrow \alpha=180^\circ$ e $t=T/2$. Decorrido o tempo t , aplica-se um pulso de 3,3 V e 100 μ s no pino D6, comandando o *gate* do tiristor.

Um resistor de 220 Ω em série no circuito de disparo limita a tensão no *gate* e protege o dispositivo.

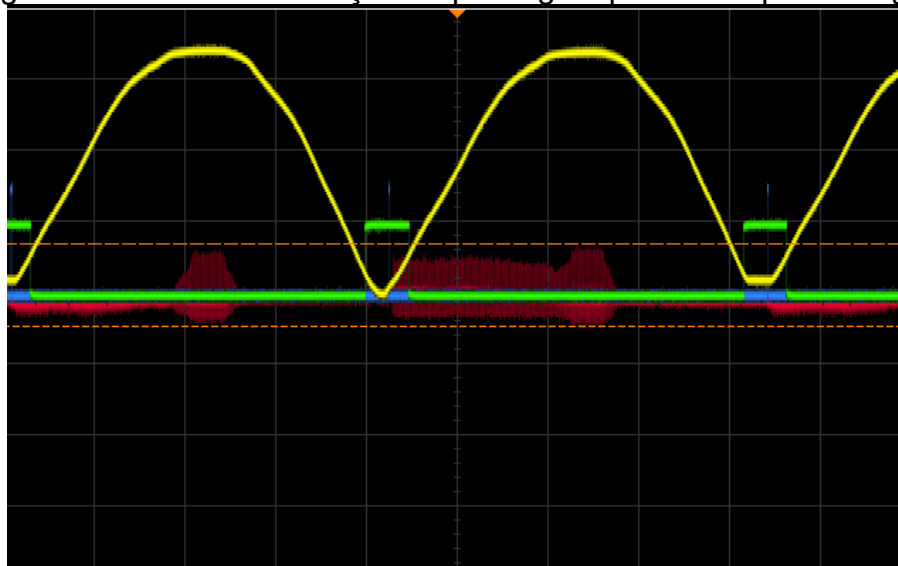
A Figura 27 apresenta-se a tensão do primário do transformador, mostrada em amarelo e lida pelo canal 1, ainda em regime senoidal não retificada. Enquanto a Figura 28, canal verde, mostra o sinal de detecção de passagem por zero, com cruzamentos bem definidos na linha de referência, confirmando o sincronismo com a rede.

Figura 27 – Sinal de onda não retificado.



Fonte: Autor (2025).

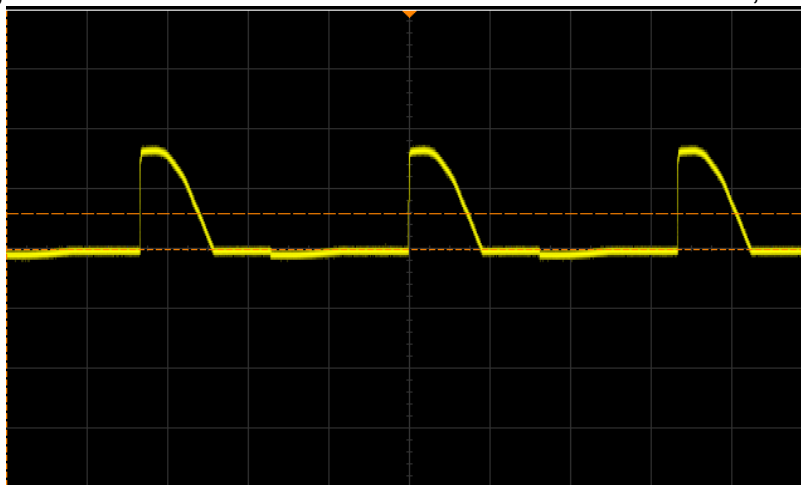
Figura 28 – Sinal de detecção de passagem por zero e pulso de gatilho.



Fonte: Autor (2025).

Na Figura 29, no canal amarelo apresenta-se a tensão na carga do retificador monofásico controlado de meia-onda com $\alpha=90^\circ$. Observa-se ausência de condução até o instante de disparo; a partir daí, a forma acompanha a porção positiva de V_{in} até a vizinhança do cruzamento por zero, quando o SCR se desliga ao atingir a corrente de manutenção. O valor eficaz indicado ($\approx 5,16\text{ V}$) e o pico ($\approx 14,7\text{ V}$) são compatíveis com a operação em $\alpha=90^\circ$, evidenciando a redução do valor eficaz e a meia-onda recortada. Pequenos níveis residuais entre pulsos decorrem de ruído/offset de medição e da queda em condução do dispositivo.

Figura 29 – Circuito retificador controlado de meia-onda, $\alpha=90^\circ$.

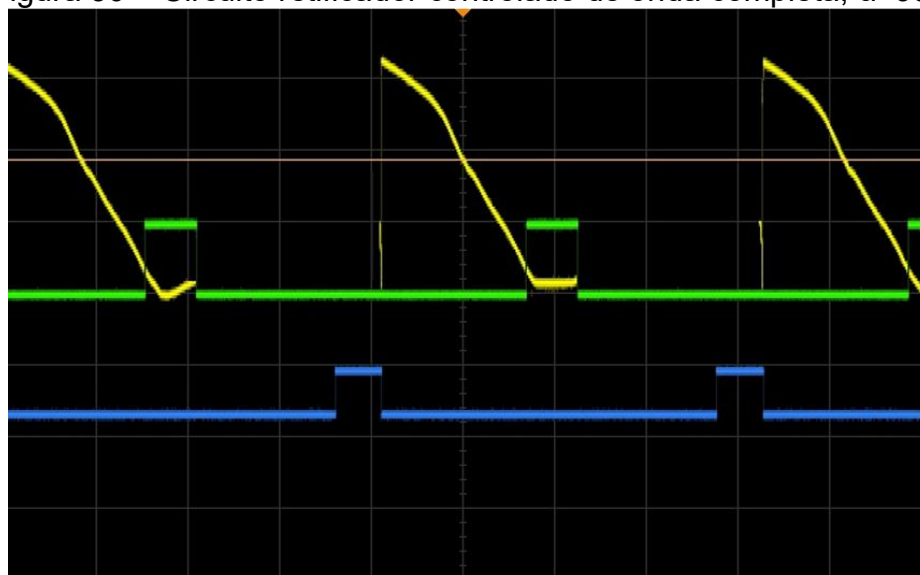


Fonte: Autor (2025).

Na Figura 30 apresentam-se, respectivamente, V_{out} (canal amarelo), o sinal de detecção de passagem por zero (canal verde) e os comandos de gate (canal azul) de um retificador monofásico controlado de onda completa, operando com ângulo de disparo $\alpha=90^\circ$. Em cada semiciclo, o par de SCRs correspondente é acionado em $\omega t=\alpha$; a partir desse instante, V_{out} segue o trecho positivo de V_{in} até o zero,

produzindo dois pulsos por período. A coincidência temporal entre o sinal de detecção e os comandos evidencia o sincronismo e a operação com α fixo.

Figura 30 – Circuito retificador controlado de onda completa, $\alpha=90^\circ$.

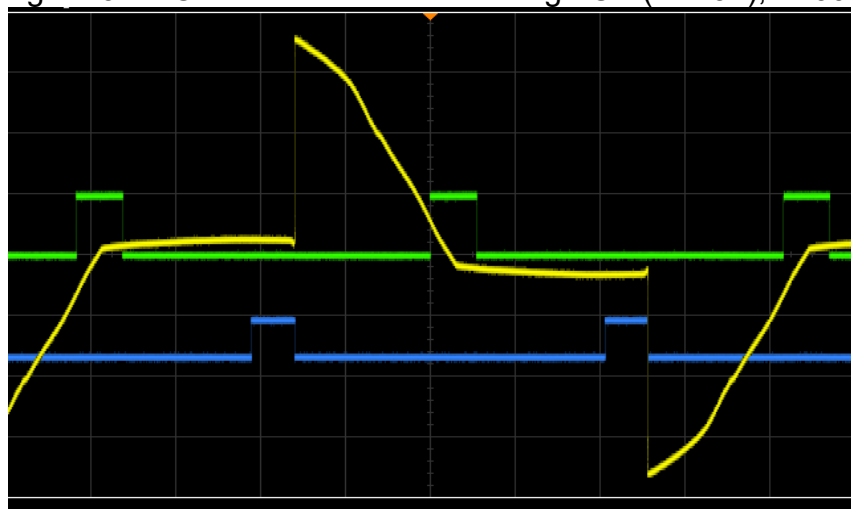


Fonte: Autor (2025).

Na Figura 31 apresentam-se V_{load} (canal amarelo), a detecção de passagem por zero (canal verde) e o comando de gate (canal azul) do controlador de carga em CA com TRIAC BT137 operando com $\alpha=90^\circ$. Em cada semiciclo, o disparo ocorre em $\omega t=\alpha$, a partir desse instante o TRIAC conduz até o zero da corrente. nos trechos de nível quase constante e arredondamento das bordas, efeitos compatíveis com a impedância série da fonte e com o *Snubber* RC do triac. Pequenos níveis residuais entre as janelas de condução são atribuíveis a offset instrumental e ruído de medição.

O alinhamento temporal entre o pulso de gate e a detecção de passagem por zero corrobora a operação com ângulo de disparo constante, α fixo.

Figura 31 – Circuito de controle de carga CA (BT137), $\alpha=90^\circ$.



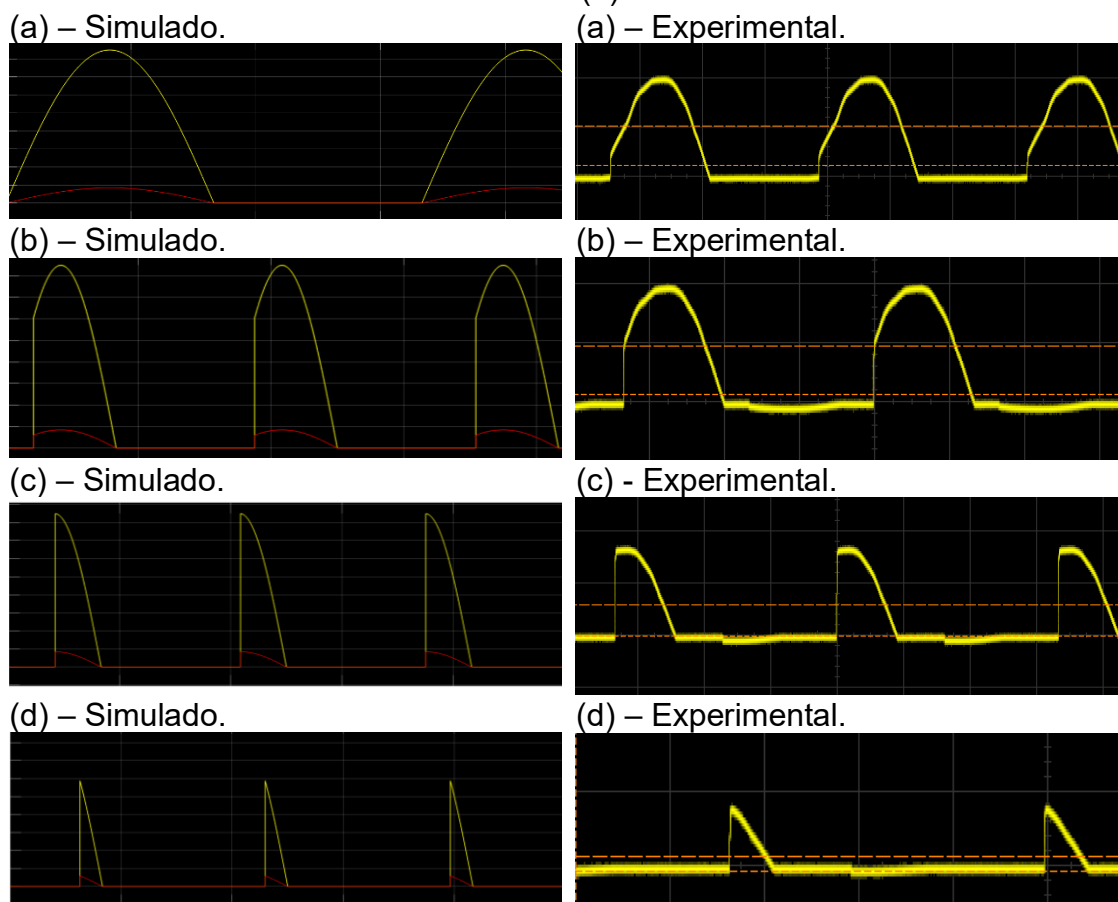
Fonte: Autor (2025).

4.3 Controle de tensão média

Como parte da validação experimental, realizou-se a medição da tensão média na carga, na topologia meia-onda controlada, variando-se o ângulo de disparo α , mantendo $RL=10\ \Omega$ como condição de referência.

A Figura 32 apresenta as formas de onda de V_{out} para quatro valores de α . Observa-se que o aumento de α reduz o intervalo de condução e, conseqüentemente, a componente média da tensão.

Figura 32 – Validação das formas de onda de V_{out} para (a) $\alpha=0^\circ$, (b) $\alpha=45^\circ$, (c) $\alpha=90^\circ$ e (d) $\alpha=135^\circ$.



Fonte: Autor (2025).

É possível observar que as formas de onda estão muito próximas.

Para o retificador de meia-onda controlada por SCR, disparo de α , $0 \leq \alpha \leq \pi$:

$$V_{med} = \frac{1}{2\pi} * \int_0^\pi V_p * \text{sen}(\theta) * d\theta = \frac{V_p}{2\pi} * (1 + \cos(\alpha)) \quad (15)$$

Aplicando-se a equação 15 aos ângulos (a) $\alpha = 0^\circ$, (b) $\alpha = 45^\circ$, (c) $\alpha = 90^\circ$ e (d) $\alpha = 135^\circ$, obteve-se a Tabela 2.

Tabela 2 – Valores encontrados para a tensão média.

Ângulo α	Resultado simulação V_{med} (V)	Resultados Experimentais V_{med} (V)
0°	5,402	5,443
45°	4,610	3,993
90°	2,700	2,880

135°	0,7902	0,635
------	--------	-------

Fonte: Autor (2025).

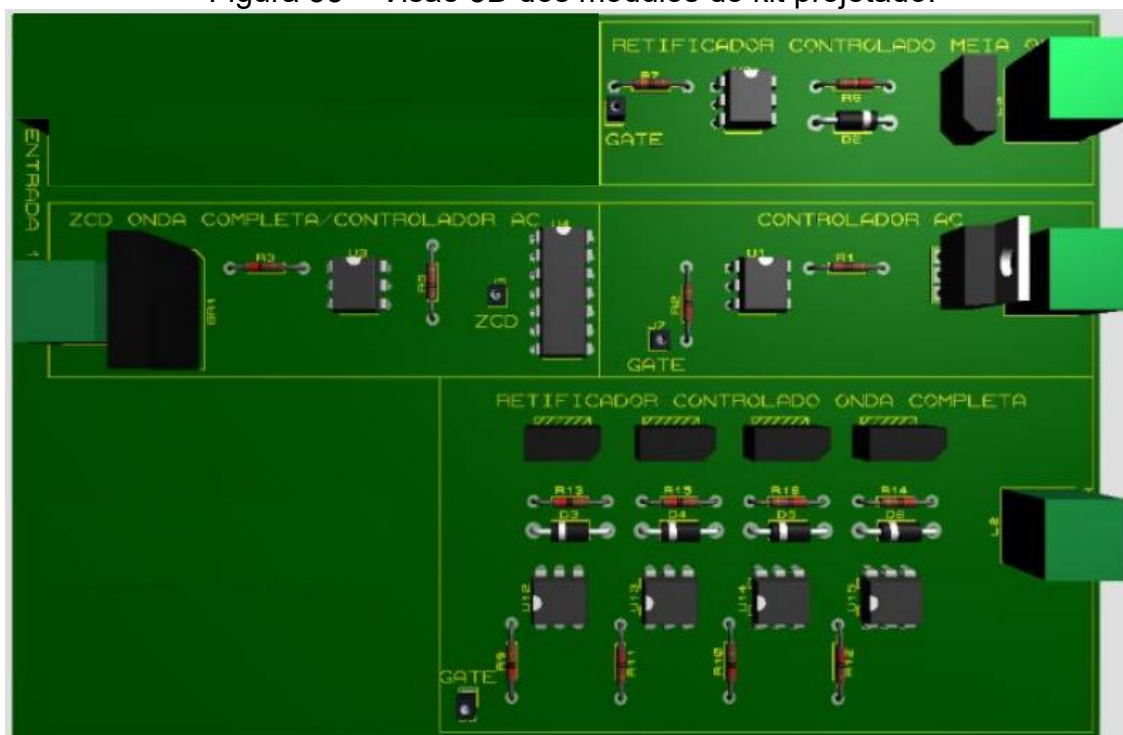
Os desvios entre simulação e experimento decorrem de não idealidades do arranjo real, como regulação do transformador, queda direta e impedâncias série do tiristor.

4.4 Protótipo e PCI 3D Simulado

Em paralelo aos ensaios práticos, elaborou-se no software Easy EDA® o layout da placa de circuito impresso referente aos quatro circuitos. A visualização tridimensional do projeto, ilustrada na Figura 33, permitiu verificar o posicionamento e o encaixe dos componentes, favorecendo uma montagem eficiente.

O desenho da placa foi otimizado para compactidade e reprodutibilidade, com segregação entre as seções de potência e de controle, dimensionamento de trilhas conforme as correntes previstas e organização de conectores e pontos de teste. Essa abordagem sustenta a estabilidade do sistema e facilita a fabricação e a montagem, indicando viabilidade de replicação em escala para aplicações educacionais.

Figura 33 – Visão 3D dos módulos do kit projetado.



Fonte: Autor (2025).

Para estimar o custo de fabricação da PCI, realizou-se uma cotação no site PCBWay.com para uma placa de 80 mm × 10 mm, 1,6 mm de espessura, 1 camada e lote mínimo de 5 unidades. O valor informado foi US \$5,00 pela fabricação, acrescido de US\$ 27,76 de frete para o Brasil, totalizando US\$ 32,76, aproximadamente US\$ 6,55 por unidade. Considerando a taxa de câmbio adotada neste trabalho de aproximadamente R\$ 5,59/US\$, o custo estimado é de R\$ 176,99 no total, ou R\$ 35,40 por unidade. Ressalta-se que esses montantes são indicativos e podem variar

com câmbio, opções de acabamento, serigrafia, espessura de cobre, prazos logísticos e a eventual incidência de tributos de importação.

4.5 Custos finais

Realizou-se um levantamento de preços dos componentes empregados no módulo didático projetado, os resultados estão sintetizados na Tabela 3. O custo agregado, abrangendo microcontroladores, tiristores e demais elementos do conjunto, revela um valor total acessível, alinhado aos objetivos do projeto.

Essa estrutura de custos sustenta a viabilidade econômica da bancada sem comprometer a qualidade, configurando uma solução efetiva para o ensino prático de eletrônica de potência.

Tabela 3 – Custo de componentes do kit.

Item	Quantidade	Preço Unitário
Transformador 110/220 V 12+12 V	1	R\$ 28,98
Ponte retificadora	1	R\$ 6,58
Optoacoplador 4n35	1	R\$ 3,60
Resistor 3,3 k Ω	1	R\$ 0,08
Resistor 10 k Ω	1	R\$ 0,08
CD4093BE	1	R\$ 2,61
ESP8266	1	R\$ 29,88
Potenciômetro Linear de 10K	1	R\$ 2,16
Optoacoplador MOC3021	6	R\$ 2,79
SCR BT151	1	R\$ 3,78
Resistor 220 Ω	8	R\$ 0,08
Resistor 18 k Ω	1	R\$ 0,08
Resistor 160 Ω	1	R\$ 0,08
Fusível de Vidro 5x20 – 10 A 250 V	1	R\$ 0,28
Porta Fusível 5x20 - AS-06	1	R\$ 0,81
Transistor NPN - BC547	1	R\$ 0,36
Diodo 1N4007	4	R\$ 0,23
Lâmpada 12 V	1	R\$ 5,00
Borne 2 polos - KF-301 2T	4	R\$ 0,79

Fonte: Baú da Eletrônica (2025)

Somando o custo de fabricação da PCI, R\$ 176,99, ao custo dos componentes, R\$ 105,82, o custo aproximado do projeto foi de R\$ 282,81.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por se tratar de um trabalho inicial, este projeto realizou uma revisão das pesquisas existentes sobre a aplicação do ensino com práticas nos cursos de Engenharia Elétrica, com especial ênfase na disciplina de eletrônica de potência. Também foi conduzida uma pesquisa de mercado, com análise das soluções comercializadas que atendem às demandas para a aplicação das práticas básicas da disciplina em questão.

Uma revisão teórica rigorosa foi realizada para dar fundamentação e embasamento ao projeto e aos módulos projetados. Os circuitos projetados foram

simulados no Matlab®, servindo como base para validar o circuito montado em protoboard, o qual apresentou resultados condizentes com as simulações.

Este trabalho contribuiu para o entendimento de estratégias de ensino em engenharia, destacando a importância das atividades laboratoriais para a aprendizagem significativa, ao reproduzir, medir e interpretar fenômenos reais, os estudantes consolidam os conceitos discutidos em sala. Nesse contexto, projetou-se uma solução didática focada em retificação controlada por tiristor, com ênfase no disparo via microcontrolador e no controle de potência aplicada à carga.

A análise de mercado evidenciou limitações nas opções comerciais consultadas, em geral, os equipamentos apresentam custo elevado e menor transparência e participação do aluno na montagem e exploração do circuito, restringindo-se muitas vezes à conexão de cabos ou a arranjos pouco intuitivos. Diante desse cenário, a placa de circuito impressa (PCI) proposta foi concebida para mitigar tais deficiências, privilegiando baixo custo, acesso direto aos pontos de teste e organização didática do circuito, sem abrir mão da segurança.

Do ponto de vista técnico, foram projetados os módulos necessários, definidos os componentes adequados e realizados experimentos compatíveis com o retificador controlado por tiristor. As medições mostraram, de modo predominante, resultados satisfatórios e coerentes com a teoria. As divergências observadas podem ser atribuídas à não idealidade dos componentes (perdas) e à desconsideração, nos cálculos iniciais, da impedância do transformador, fatores que impactam os valores de corrente medidos.

Por fim, como continuidade deste projeto, propõe-se o refinamento do design da PCI e a ampliação do repertório experimental, visando obter novas formas de onda e cenários de análise. Recomenda-se, ainda, a implementação de malha fechada para controle da tensão média na carga e o desenvolvimento de um circuito de disparo de gate apropriado para a operação em onda completa. Complementarmente, a inclusão de grandezas como fator de potência e fator de deslocamento pode aprofundar a interpretação dos resultados e fortalecer a integração entre teoria e prática.

6 REFERÊNCIAS

ALGETEC – SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS EM EDUCAÇÃO. AG-EPOT02: bancada didática de eletrônica de potência, versão básica. Salvador: Algetec, 29 jul. 2025.

ARDUINO. Arduino – Home. [S.l.]: [s.n.], [s.d.]. Disponível em: <https://www.arduino.cc/>.

BARBI, Ivo. Eletrônica de potência. 8. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2015.

BAÚ DA ELETRÔNICA. Maker. [S.l.]: Baú da Eletrônica, [s.d.]. Disponível em: <https://www.baudaeletronica.com.br/maker>. Acesso em: 25 jul. 2025.

BITENCOURT, I. A. B. de. Projeto e implementação de um conversor flyback para uma bancada didática de eletrônica de potência e controle digital de sistemas. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Controle e Automação) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos. 11. ed. São Paulo: Pearson, 2017.

CLUBE DO MAKER. ESP8266 pinout. [S.l.]: Clube do Maker, [s.d.]. Disponível em: <https://clubedomaker.com/esp8266-pinout>. Acesso em: 22 mai. 2025.

DE LORENZO, S.p.A. DLB PEL12: laboratorio integrato di elettronica di potenza e azionamenti elettrici con FPGA. Versão 2. [S.l.]: De Lorenzo, [s.d.].

DINAMARCA. Børne- og Undervisningsministeriet. 7-trins-skalaen. København: Børne- og Undervisningsministeriet, [s.d.]. Disponível em: <https://www.uvm.dk/uddannelsessystemet/7-trins-skalaen>. Acesso em: 1 ago. 2025.

EDIBON. Computer controlled teaching unit for the study of power electronics (with IGBTs): TECNEL. Móstoles: Edibon, 2024.

EXXER. Catálogo comercial (v1_2023). Santa Rita do Sapucaí: Exxer, 2023.

FERREIRA, A. A. et al. Integrated platform for power electronics applications fast evaluation and teaching purposes. In: POWER ELECTRONICS EDUCATION WORKSHOP (PEEW), 2005, Recife. Anais [...]. Recife: [s.n.], 2005. p. 81–86.

FLOYD, Thomas L. Fundamentos da eletrônica digital. 10. ed. São Paulo: Pearson, 2016.

HOSSEINZADEH, Nasser; HESAMZADEH, Mohammad Reza. Application of project-based learning (PBL) to the teaching of electrical power systems engineering. IEEE Transactions on Education, v. 55, n. 4, p. 495–501, nov. 2012. Disponível em: <https://squ.elsevierpure.com/en/publications/application-of-project-based-learning-pbl-to-the-teaching-of-elec>. Acesso em: 9 mai. 2025.

Instituto Federal de Pernambuco. Campus Pesqueira. Curso Bacharelado em Engenharia Elétrica. 15 de agosto de 2025.

KEYSIGHT TECHNOLOGIES. Osciloscópio DSOX1204A – 70/100/200 MHz, 4 canais analógicos. [S.l.]: Keysight, [s.d.]. Disponível em: <https://www.keysight.com/br/pt/support/DSOX1204A/oscilloscope-70-100-200-mhz-4-analog-channels.html>. Acesso em: 4 mar. 2025.

MACHADO, Patrícia César Ferreira; CARMO, Marlon José do; OLIVEIRA, Ângelo Rocha; FARIA, Arilson Lima de. Educação em eletrônica de potência: a problemática entre teoria e prática e a carência de recursos laboratoriais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA – COBENGE, 2011, Blumenau, SC. Anais [...]. Blumenau: ABENGE, 2011.

MALVINO, Albert Paul; BATES, David J. Eletrônica: princípios e aplicações. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.

MOHAN, Ned; UNDELAND, Tore M.; ROBBINS, William P. Eletrônica de potência: conversores, aplicações e design. 3. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

MOTOROLA. Optoelectronics device data: 4N35, 4N36, 4N37. [S.l.]: Motorola, 1995.

NHS. Conheça os diferentes tipos de redes elétricas: monofásica, bifásica e trifásica. [S.l.]: NHS, [s.d.]. Disponível em: <https://nhs.com.br/blog/conheca-os-diferentes-tipos-de-redes-eletricas-monofasica-bifasica-e-trifasica/>. Acesso em: 23 abr. 2025.

ON SEMICONDUCTOR. BC546B, BC547A, B, C, BC548B, C — amplifier transistors: NPN silicon. Rev. 4, maio 2004. 6 p. (Data sheet BC546/D). [S.l.]: ON Semiconductor, 2004.

PCBWAY. PCB prototype the easy way. [S.l.]: PCBWay, [s.d.]. Disponível em: <https://www.pcbway.com/>. Acesso em: 12 jul. 2025.

PIETER, P. A beginner's guide to the ESP8266. [S.l.]: [s.n.], 2017.

PIUSSI, Alexandre Dellamora. Projeto e implementação de um conversor CC-CC elevador de tensão para uma bancada didática de eletrônica de potência e controle digital de sistemas. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Controle e Automação) — Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Santa Maria, 2017.

POMILIO, José Antenor. Eletrônica de potência. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Departamento de Sistemas e Energia, fev. 1998. (Publicação FEEC, 01/98). Revisado em jul. 2014.

ROCHA, Renato Aloij; GIACOMINI, Silvio. Programação com ESP8266: Internet das Coisas na Prática. São Paulo: Novatec, 2019.

SADIKU, Matthew N. O.; ALEXANDER, Charles K. Fundamentos de circuitos elétricos. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

TEC DICAS. Circuito gerador de clock com “Schmitt Trigger”. [S.l.]: Tec Dicas, [s.d.]. Disponível em: <https://tecdicas.com/circuito-gerador-de-clock-com-schmitt-trigger/>. Acesso em: 6 jun. 2025.

TEXAS INSTRUMENTS. MOC3020 thru MOC3023 optocouplers/optoisolators. Dallas: Texas Instruments, 1995.

ZHANG, Zhe; HANSEN, Claus Thorp; ANDERSEN, Michael A. E. Teaching power electronics with a design-oriented and project-based learning method at the Technical University of Denmark. IEEE Transactions on Education, v. 59, n. 1, p. 32–38, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/TE.2015.2426674>.

ANEXO 1 – Comparação direta de bancadas de sistema de potência comercializadas.

Critério	De Lorenzo DLB PEL12	Edibon TECNEL	Exxer	AG-EPOT
Foco declarado	Laboratório integrado de eletrônica de potência e SCADA para acionamentos com conversores CA/CC, controle digital por FPGA	Unidade didática com SCADA para potências (retificação, potência CA/CC, CC/CC, CA/CA)	“Dock station” para práticas de eletrônica de potência (retificação, potência CA, chopper, inversor PWM)	Bancada didática para a
Controle/Software	FPGA + NI Linux Real-Time; interface LabVIEW	SCADA + LabVIEW + NI DAQ 250 kS/s	Software e cabo para programação	Não informado na página
Medições	Entradas isoladas V/I no controlador; até 9 sinais simultâneos; vantagens vs uso de osciloscópio	Sensores no painel (4 V, 2 I) e aquisição por NI DAQ	Não especificado na folha além dos experimentos	Não informado na página
Conteúdo/cargas	Lista extensa de módulos incluídos (inclui carga RLC, transformador 3 kVA, medidores, etc.)	Módulos de semicondutores e drivers incluídos; cargas requeridas à parte	Não lista módulos/cargas incluídos; apenas os experimentos atendidos	Não informado na página
Experimentos listados	Retificação mono/trifásica (não/semi-controlada/controlada), controladores CA, simulador de falhas de dimmer	Retificação mono/trifásica, chopper, inversores mono/trifásicos (PWM), reguladores CA	Retificação mono e trifásica (3 e 6 pulsos), controladores CA, SCR com UJT e TCA785, UJT, chopper, step-down, inversor PWM	Diodos; retificação mono/trifásica; atenuação de ripple; retificação controlada; CA, SCR com UJT e TCA785; por microcontrolador (mono/trifásico); entre outras.

Normas/Segurança	“Totalmente segura” com Declara conformidade sistemas CE/CEI (EN 61010-1, EN 61439-1, EN 60335-1) mecânico/eléctrico/electr 61439-1, EN 60335-1) ônico/software; padrões de qualidade	Não informado	Não informado
Uso simultâneo	Opções Mini/ESN para Declara configuração até 30 alunos ideal para 4 estudantes visualizando/operando em rede	Não informado	Não informado
Dimensões/Peso	Não especificado no PDF 490×330×310 mm; ~40 kg 200×480×300 mm (15 kg) ou 200×960×300 mm (30 kg)	Não informado	Não informado

Fonte: Autor (2025).