

## 15º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2024

### DESENVOLVIMENTO DE MÓDULO CONTROLADOR DE SISTEMAS CHAVEADOS PARA O ENSINO PRÁTICO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

LEONARDO ABREU CORDEIRO VIEIRA<sup>1</sup>, PABLO SAMPAIO GOMES NATIVIDADE<sup>2</sup>,  
ELSON AVALLONE<sup>3</sup>, SÍLVIO APARECIDO VERDÉRIO JUNIOR<sup>4</sup>, PAULO CESAR  
MIORALLI<sup>5</sup>, FRANCINE MARTINS MOLINARI<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Graduando em Eng. de Controle e Automação, Bolsista PIBIFISP, IFSP, Campus Catanduva, abreu.leonardo@aluno.ifsp.edu.br

<sup>2</sup>Professor Mestre em Inovação tecnológica, IFSP, Campus Catanduva, pablo.sgn@ifsp.edu.br

<sup>3</sup>Professor Doutor em Processos térmicos, IFSP, Campus Catanduva, elson.avallone@ifsp.edu.br

<sup>4</sup>Professor Doutor em Engenharia mecânica, IFSP, Campus Araraquara, silvioverderio@ifsp.edu.br

<sup>5</sup>Professor Doutor em Engenharia mecânica, IFSP, Campus Catanduva, mioralli@ifsp.edu.br

<sup>6</sup>Mestra em Processos de Ensino, Gestão e Inovação, francine.molinari@ifsp.edu.br

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.04.04.03-7 Conversão e Retificação da Energia Elétrica

**RESUMO:** Conhecer fundamentos de Eletrônica de Potência é de grande valia para a formação de engenheiros de controle e automação, uma vez que essa área abrange temas que lidam com a conversão, controle e distribuição eficiente de energia elétrica. As aulas práticas desempenham um papel fundamental para a construção desse conhecimento, no entanto, muitas vezes os laboratórios acadêmicos não contam com recursos para a interação com alguns dispositivos, como os controladores de potência. Para suprir essa carência, o projeto propõe o desenvolvimento e construção de um módulo de controle monofásico para a abordagem de retificadores controlados e controladores de tensão CA (Corrente Alternada). A metodologia consiste no projeto e construção do módulo controlador, incluindo a seleção dos componentes adequados, o desenvolvimento do circuito de controle e dos circuitos de disparo, a programação do microcontrolador, e o desenvolvimento de uma interface visual. Espera-se que este projeto seja o início de uma série de pesquisas voltadas ao desenvolvimento de outros conversores estáticos, contribuindo didaticamente para as práticas de eletrônica de potência.

**PALAVRAS-CHAVE:** sistemas elétricos de potência; retificadores controlados; tiristores; conversores estáticos.

### DEVELOPMENT OF A CONTROLLER MODULE FOR SWITCHED SYSTEMS FOR PRACTICAL TEACHING OF POWER ELECTRONICS

**ABSTRACT:** Understanding the fundamentals of Power Electronics is highly valuable for the education of control and automation engineers, as this field encompasses topics related to efficient conversion, control, and distribution of electrical energy. Practical classes play a crucial role in building this knowledge; however, academic laboratories often lack resources for interacting with certain devices, such as power controllers. To address this gap, the project proposes the development and construction of a single-phase control module for studying controlled rectifiers and AC (Alternating Current) voltage controllers. The methodology involves designing and building the control module, including selecting appropriate components, developing the control circuit and trigger circuits, programming the microcontroller, and creating a visual interface. It is expected that this project will be the starting point for a series of research efforts aimed at developing other static converters, contributing didactically to power electronics practices.

**KEYWORDS:** electrical power systems; controlled rectifiers; thyristors; static converters.

### INTRODUÇÃO

O termo eletrônica de potência foi adotado desde a década de 60 após a criação do SCR (silicon controlled rectifier – retificador controlado de silício) (Ahmed, 2000), sendo inicialmente aplicada apenas em cenários industriais. Seu progresso e difusão em outros setores se deu de forma muito rápida.

Atualmente encontramos a Eletrônica de potência na maioria das tecnologias que interagimos em nosso cotidiano, como nos smartphones, automóveis, computadores e televisores.

Segundo Barbi (2006), a eletrônica de potência pode ser definida como uma ciência dedicada ao estudo dos conversores estáticos (chaves estáticas), que têm a função de fazer o controle eletrônico do fluxo de energia elétrica. A eletrônica de potência envolve potência, eletrônica e controle (Rashid, 2014). Esse projeto aborda duas aplicações dentre esses conversores: A retificação controlada, processo que além de converter tensão e corrente alternadas em contínuas ainda manipula a potência transferida para a carga e o controlador de tensão CA, que converte uma fonte de tensão CA fixa em uma fonte de tensão CA variável (Ahmed, 2000).

Para a atuação precisa do chaveamento desses conversores é necessário fazer a leitura dos sinais de entrada, definir o tipo de controlador e dimensionar os circuitos para disparo das chaves estáticas. O controle do disparo é essencial para regular a potência entregue à carga, otimizar a eficiência energética e manter a qualidade da tensão de saída.

## MATERIAL E MÉTODOS

Foi realizada uma revisão bibliográfica para definir os componentes eletrônicos e estratégias de controle para o disparo de tiristores. Consultaram-se autores renomados em eletrônica de potência, conversores estáticos e técnicas de controle.

Para o disparo dos tiristores, utilizou-se o Detector de Passagem por Zero (ZCD), que sincroniza o controle ao detectar quando a tensão muda de polaridade. No Brasil, com frequência de 60Hz, o período é de 16,66ms como representado na Equação 1. Com isso, permite que o controlador relacione o ângulo de disparo com o tempo como demonstrado na Equação 2. A Figura 1 ilustra um exemplo de disparo em 90°.

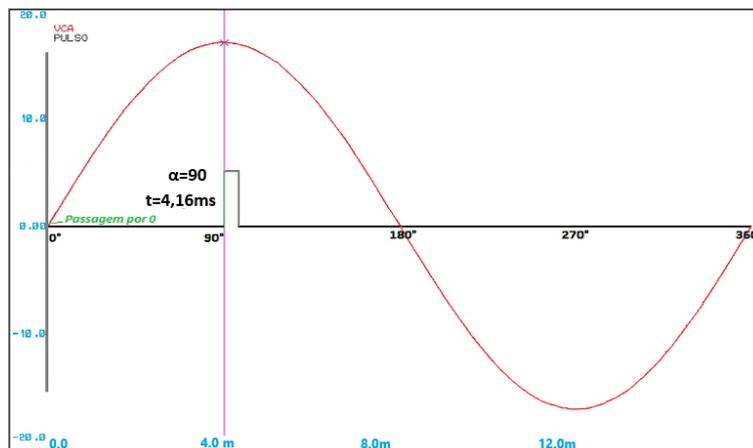


FIGURA 1. Demonstração de disparo.

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

em que,  
 $T$  - período, s;  
 $f$  - frequência, Hz.

$$\alpha = \frac{180 \cdot t}{8,33} \quad (2)$$

em que,  
 $\alpha$  - ângulo, graus;  
 $t$  - tempo, s.

Cada estágio do projeto foi previamente simulado em *software* especializado, que oferece recursos de captura esquemática, modelagem e design de placas de circuito impresso. Com essas ferramentas, foram desenvolvidos os algoritmos para o controle do módulo. Optou-se pelo

microcontrolador ESP32 da Espressif Systems© devido à sua integração com módulos Wi-Fi e Bluetooth, o que facilita a interação com a interface desenvolvida.

O fluxograma da Figura 2 descreve o funcionamento do sistema de controle desenvolvido para o projeto. O processo se inicia com a seleção do tipo de controlador. A seguir, é necessário escolher o ângulo de disparo para o controlador selecionado. Então, o microcontrolador converte o valor em tempo, permitindo calcular com precisão o atraso necessário para o acionamento dos tiristores. Em seguida, é realizada a leitura do sinal do Detector de Passagem por Zero (ZCD), o que permite a sincronização do disparo com o ciclo da alimentação de corrente alternada (CA). Uma vez que o sinal é lido, o sistema aciona um pulso no pino de saída do microcontrolador ESP32, ativando o tiristor conforme o tempo de atraso calculado.

Posteriormente, o sistema exibe os parâmetros operacionais, como tensão, corrente e potência, em uma interface visual, permitindo ao usuário monitorar o funcionamento em tempo real. Em cada ciclo, o sistema verifica se o usuário deseja interromper o funcionamento. Se a resposta for positiva, o sistema encerra o processo. Caso contrário, o ciclo continua, com a exibição dos parâmetros na interface e o ajuste do disparo conforme necessário. Este fluxo cíclico garante a precisão e o controle contínuo durante o ensaio, proporcionando ao operador informações essenciais para o monitoramento do circuito.

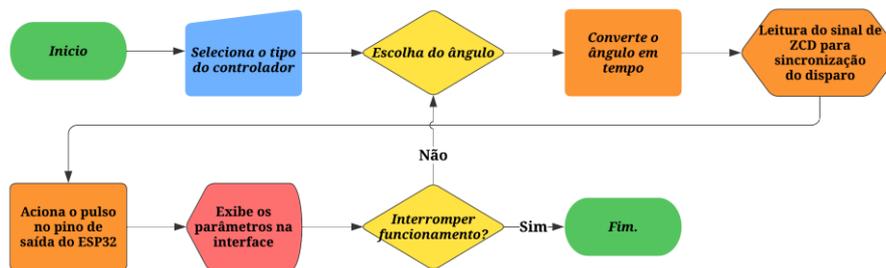


FIGURA 2: Fluxograma de funcionamento.

Para a interação entre o estudante e o controlador, foi desenvolvido um dashboard que pode ser acessado em um computador ou smartphone, permitindo a análise de dados operacionais e a inserção de informações pelo usuário. Esse ambiente interativo facilita o teste dos controladores e a visualização de parâmetros importantes do sistema controlado. O dashboard, mostrado na Figura 3, foi criado com a ferramenta Adafruit IO da Adafruit Industries, que oferece uma interface intuitiva e fácil de usar.



FIGURA 3. Dashboard no adafruit IO.

Inicialmente, a Figura 4 ilustra o detector de passagem por zero, utilizado para simular o circuito. Durante os testes, observou-se a necessidade de aprimorar o sinal de saída do circuito. O problema do pulso foi resolvido ao integrar o CI 4093, que, com suas portas NAND e entradas Schmitt-trigger, melhora o condicionamento do sinal. Esse CI detecta quando a tensão alternada (CA) cruza o ponto zero, gerando pulsos digitais limpos e estáveis, e suas entradas Schmitt-trigger eliminam ruídos e flutuações.

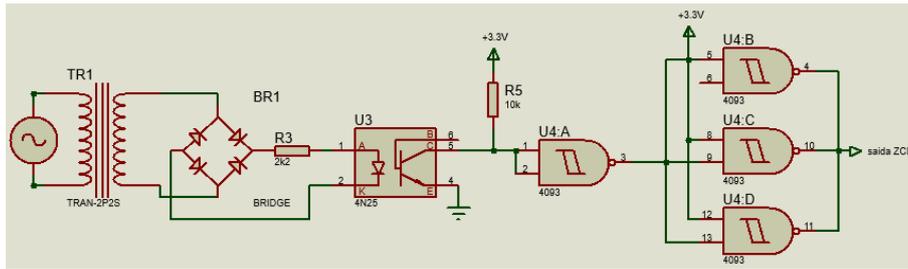


FIGURA 4. Circuito Detector de Passagem por Zero.

O dimensionamento dos resistores utilizados nos optoacopladores e nos *gates* dos tiristores foi realizado com base nas especificações técnicas fornecidas nos datasheets dos componentes. A partir dessas informações, foram identificados os valores de corrente e tensão adequados para garantir o acionamento correto e seguro dos dispositivos. Os resistores foram então calculados de acordo com a Lei de Ohm, de modo a limitar a corrente nos *gates* dos tiristores e nos LEDs internos dos optoacopladores, assegurando o funcionamento eficaz do circuito sem comprometer a integridade dos componentes.

O projeto incluirá três tipos de circuitos: Um para o controlador CA e dois para retificadores controlados (meia onda e onda completa). O processo começa com a detecção do cruzamento por zero da tensão de entrada, momento em que o circuito espera até que o ângulo de disparo definido seja alcançado. Uma vez atingido esse ângulo, um pulso é enviado ao *gate* do tiristor, permitindo que ele conduza e alimente a carga durante o restante do semiciclo. Ao finalizar o semiciclo, o tiristor naturalmente interrompe a condução quando a corrente cai a zero, reiniciando o ciclo de controle para o próximo semiciclo. A Figura 5 ilustra os 3 circuitos projetados.

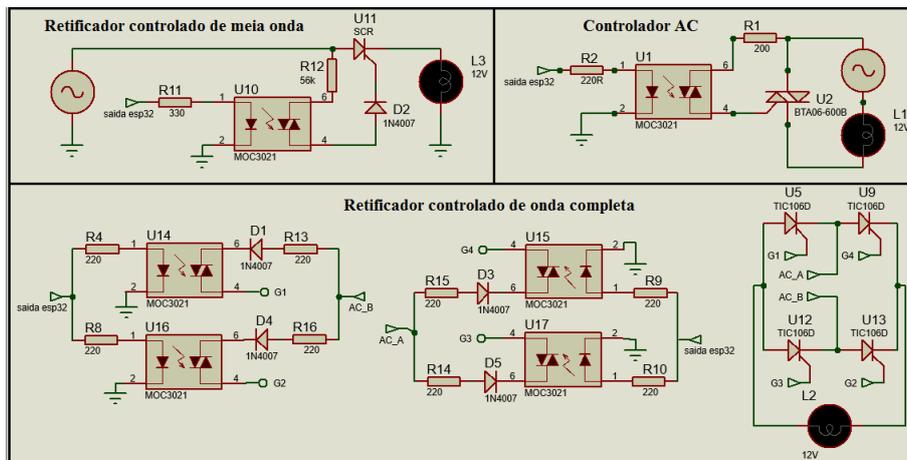


FIGURA 5. Circuitos desenvolvidos no simulador.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi realizada uma pesquisa de preços dos componentes eletrônicos utilizados no módulo didático, e os valores estão apresentados na Tabela 1. O custo total do projeto inclui itens como microcontroladores, tiristores e outros componentes, resultando em um valor acessível. O baixo custo dos materiais torna o projeto viável economicamente, sem comprometer a qualidade, e oferece uma solução eficaz para o ensino prático de eletrônica de potência.

TABELA 1. Componentes e preços.

Descrição	Modelo	Preço (R\$)
Transformador	12V - 1A	40,00
Ponte retificadora	1000V - 2A	1,42
Optoacoplador	4n25 e MOC3020	3,00

NAND	4093	3,6
TRIAC	BT137	5,00
SCR	TIC106D	8,00
Diodo	1n4007	0,50
Resistores	-	De 0,10 até 3,00
Microcontrolador	ESP32	32,50

Nos testes práticos realizados em laboratório, os circuitos montados em protoboard foram observados através de um osciloscópio, que mostrou formas de onda consistentes com as simulações. Confirmaram o controle adequado do ângulo de disparo, demonstrando a precisão do sistema no ajuste da potência entregue à carga. As oscilações e variações observadas seguiram o comportamento esperado, validando o funcionamento dos circuitos de disparo, conforme a Figura 6 ilustra as formas de onda do controlador AC, retificador de meia onda e retificador de onda completa, respectivamente:

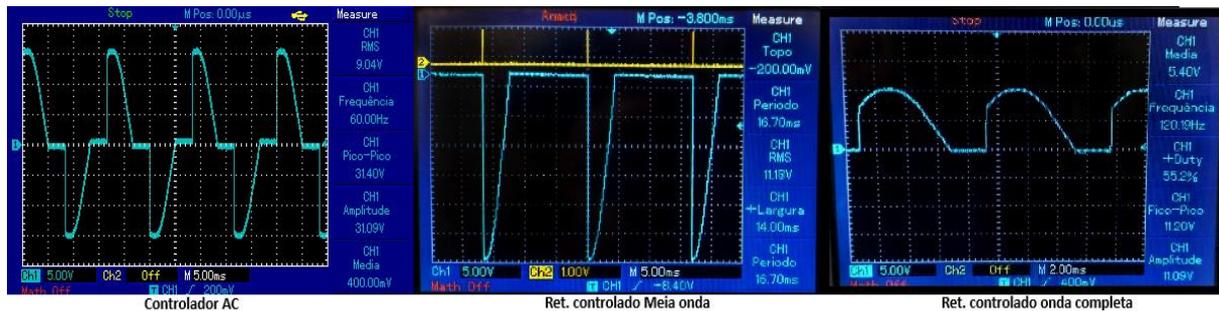


FIGURA 6: Formas de onda dos circuitos em protoboard.

Paralelamente aos testes práticos, foi desenvolvido o layout da placa de circuito impresso (PCB) para os três circuitos. A visualização em 3D do projeto da PCB, como mostrado na Figura 7, apresenta a disposição dos componentes, assegurando uma montagem eficiente e organizada. O design da placa foi otimizado para garantir uma implementação compacta e prática, com foco na separação adequada dos componentes de potência e controle.

O desenvolvimento da PCB sugere que o projeto pode ser replicado em maior escala para aplicações educacionais. A estrutura projetada oferece suporte à estabilidade do sistema e à integração de componentes de forma organizada, facilitando a produção e a montagem final.

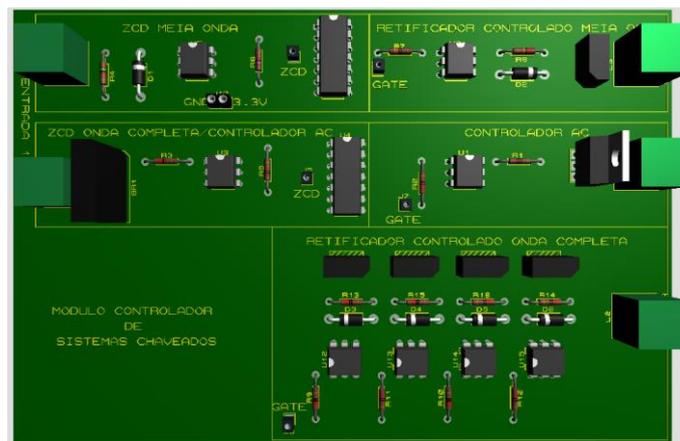


FIGURA 7: PCB em 3D.

## CONCLUSÕES

Este estudo desenvolve um módulo controlador para sistemas chaveados, com o objetivo de aprimorar o ensino prático de Eletrônica de Potência. O projeto envolveu a seleção de componentes, construção de circuitos de controle e disparo, programação do microcontrolador e desenvolvimento de

uma interface visual. Os resultados indicam que o módulo atende aos objetivos propostos, mostrando grande potencial como ferramenta didática para o ensino de conceitos avançados na área. A flexibilidade do sistema permite adaptações para novas aplicações e pesquisas futuras, fortalecendo o aprendizado prático de diversas áreas da engenharia e tecnologia. Com isso, o projeto contribui significativamente para a melhoria dos recursos didáticos disponíveis, ampliando o acesso ao conhecimento em eletrônica de potência e controle de sistemas chaveados. O módulo facilita a integração de teoria e prática, proporcionando uma experiência de aprendizado mais interativa e dinâmica. Espera-se que este trabalho inspire novas iniciativas voltadas ao desenvolvimento de soluções didáticas inovadoras para o ensino em áreas tecnológicas.

### CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

L.A.C.V coleta dos dados, análise de dados, construção dos circuitos, desenvolvimento da programação e escrita. P.S.G.N ideia do projeto, orientação, obtenção de financiamento, disponibilização do laboratório e revisão do manuscrito. E.A, S.A.V.J, P.C.M. e F.M.M orientação e revisão do manuscrito.

### AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao PIBIFSP pela bolsa de iniciação científica.

### REFERÊNCIAS

AHMED, Ashfaq. **Eletrônica de potência**. 1. ed. São Paulo: Pearson, 2000. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 29 ago. 2023.

ALMEIDA, José Luiz Antunes de. **Dispositivos semicondutores: tiristores: controle de potência em CC e CA**. 13 ed., rev. ampl. São Paulo: Érica, 2013. 192 p.

BARBI, Ivo. **Eletrônica de Potência: Conversores e Aplicações**. Editora da UFSC, 2006.

BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 11. ed. São Paulo: Pearson, 2013. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 29 ago. 2023.

RASHID, M. H. **Eletrônica de potência: dispositivos, circuitos e aplicações**. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2014. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 29 ago. 2023.

ESP32-DevKitC V4 Getting Started Guide. **This guide shows how to start using the ESP32-DevKitC V4 development board**. Disponível em: < <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/hw-reference/esp32/get-started-devkitc.html>>. Acesso em: 29 de ago. de 2023.

Adafruit Industries. **Adafruit IO**. Disponível em: <https://io.adafruit.com> Acesso em: 10 dez. 2023.