

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**WINNER ZAVOLSKI QUEIROZ**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA PARA ESTUDO DE  
RETIFICADOR TIRISTORIZADO EM MALHA FECHADA**

**APUCARANA – PR**

**2022**

**WINNER ZAVOLSKI QUEIROZ**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA PARA ESTUDO DE  
RETIFICADOR TIRISTORIZADO EM MALHA FECHADA**

**Development of a closed loop thyristorized rectifier study platform**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Willian Ricardo Bispo Murbak Nunes

Coorientador: Prof. Dr. Rodrigo da Ponte Caun

**APUCARANA – PR**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**WINNER ZAVOLSKI QUEIROZ**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA PARA ESTUDO DE  
RETIFICADOR TIRISTORIZADO EM MALHA FECHADA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentada como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 28/novembro/2022

---

Willian Ricardo Bispo Murbak Nunes  
Doutor  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Rodrigo da Ponte Caun  
Doutor  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Reginaldo Nunes de Souza  
Doutor  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Thales Eugenio Portes de Almeida  
Doutor  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

“A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso”

**APUCARANA – PR**

**2022**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por tudo que proporcionou em minha vida e que ainda irá me conceder. Agradeço também à minha família que me apoiou neste momento muito importante para minha vida.

Em especial agradecer à minha mãe Célia e ao meu pai Joaquim, por tudo que fizeram por mim. Não tenho palavras para expressar meus sentimentos, apenas que os amo.

Ao meu irmão Winston, por todos os momentos juntos e que agora parte para uma nova aventura.

Aos professores Willian Ricardo Bispo Murbak Nunes e Rodrigo da Ponte Caun pelo apoio que me deram, e a todo o corpo de docentes da UTFPR pelos anos em que passamos juntos.

Gostaria de agradecer aos meus amigos, que nesta jornada acadêmica me proporcionaram boas risadas e momentos memoráveis.

A todos, muito obrigado.

*“O sucesso é ir de fracasso em fracasso sem  
perder o entusiasmo.”*

*Autor desconhecido*

## RESUMO

Diferentes topologias de circuitos retificadores utilizando SCR's (do inglês, Silicon Controlled Rectifiers) têm aplicações em processos industriais, tais como acionamento de motores de corrente contínua, geração de plasma, galvanoplastia, entre outros. Neste trabalho é proposto o acionamento dos tiristores utilizando um controle em malha fechada com o intuito de manter a tensão de saída do conversor constante. Além disso, a plataforma desenvolvida é uma ferramenta didática para o ensino e pesquisa nas áreas de sistemas controle e eletrônica de potência. A plataforma projetada é composta por um sensor de corrente, um circuito de condicionamento de sinal para avaliação da resposta do sistema, um circuito de isolamento óptico e um microcontrolador para embarcar algoritmos de controle para operação em malha fechada. No decorrer do trabalho são apresentados os esquemáticos de todos os circuitos propostos, bem como, a modelagem da dinâmica da planta via simulação computacional e o projeto do sistema de controle para a implementação digital.

Palavras-chave: retificadores controlados a tiristor; ferramenta didática; controle digital; sistemas embarcados.

## **ABSTRACT**

Different topologies of Rectifier circuits using SCR's (Silicon Controlled Rectifiers) have applications in industrial processes such as DC motor drive, plasma generation, and electroplating, among others. In this work, it is proposed the triggering of thyristors using a closed loop control in order to maintain the output voltage of the converter constant. In addition, the platform developed is a didactic tool for teaching and research in the areas of control systems and power electronics. The designed platform is composed of a current sensor, a signal conditioning circuit to evaluate the system response, an optical isolation circuit, and a microcontroller to board control algorithms for closed-loop operation. During the work, the schematics of all proposed circuits are presented, as well as the modeling of plant dynamics via computer simulation and the control system design for digital implementation.

**Keywords:** thyristor controlled rectifiers; didactic tool; digital control; embedded systems.

## LISTA DE FIGURAS

<a href="#">Figura 1 - Simbologia do tiristor e camadas pn.</a>	15
<a href="#">Figura 2 - Circuito do tiristor e curva característica.</a>	15
<a href="#">Figura 3 - Curva característica ideal do tiristor.</a>	16
<a href="#">Figura 4 - Curva característica entre a corrente de gatilho e tensão de bloqueio.</a>	17
<a href="#">Figura 5 - Característica de disparo e condução.</a>	17
<a href="#">Figura 6 - (a) Circuito esquemático de retificador de onda completa em ponte, (b) Forma de onda senoidal retificada a partir de um disparo no instante <math>\alpha</math>.</a>	19
<a href="#">Figura 7 - Diagrama de blocos de um sistema em malha fechada.</a>	20
<a href="#">Figura 8 - Diagrama de blocos dos circuitos que compõem a plataforma didática.</a>	22
<a href="#">Figura 9 - Circuito de detecção de passagem por zero.</a>	23
<a href="#">Figura 10 - Circuito de isolamento óptica entre o circuito de controle e potência.</a>	23
<a href="#">Figura 11 - Sensor de corrente ACS712 em série com a carga.</a>	24
<a href="#">Figura 12 - Circuito da ponte retificadora tiristorizada.</a>	25
<a href="#">Figura 13 - Esquema de conexões do Arduino.</a>	26
<a href="#">Figura 14 - Circuito completo da plataforma didática.</a>	27
<a href="#">Figura 15 - (a) <i>Layout</i> para usinagem; (b) disposição dos componentes eletrônicos.</a>	28
<a href="#">Figura 16 - Simulação do circuito retificador controlado.</a>	29
<a href="#">Figura 17 - Resposta ao degrau unitário do sistema em malha aberta.</a>	30
<a href="#">Figura 18 - Resposta ao degrau unitário do sistema em malha fechada.</a>	32
<a href="#">Figura 19 - Fluxograma do código embarcado no microcontrolador para controle e gerenciamento do sistema.</a>	34
<a href="#">Figura 20 - Saída do circuito de sincronismo em vermelho (sinal da rede em azul).</a>	36
<a href="#">Figura 21 - Sinais de disparo gerados pelo Arduino (vermelho e azul claro).</a>	37
<a href="#">Figura 22 - Corrente média de 300mA, ângulo de disparo de 90,72°.</a>	38
<a href="#">Figura 23 - Corrente média de 500mA, ângulo de disparo de 43,2°.</a>	38
<a href="#">Figura 24 - Corrente média de 100mA, ângulo de disparo de 129,6°.</a>	39
<a href="#">Figura 25 - Plataforma finalizada em circuito impresso.</a>	40
<a href="#">Figura 26 - Conexão entre a plataforma didática e o microcontrolador contendo o código de controle embarcado.</a>	41
<a href="#">Figura 27 - Sinal de sincronismo prático.</a>	42
<a href="#">Figura 28 - Pulso gerado no semiciclo positivo.</a>	42
<a href="#">Figura 29 - Pulso gerado no semiciclo negativo.</a>	43
<a href="#">Figura 30 - Saída do sistema com <i>setpoint</i> em 300 mA.</a>	44
<a href="#">Figura 31 - Saída do sistema com <i>setpoint</i> em 500 mA.</a>	44
<a href="#">Figura 32 - Saída do sistema com <i>setpoint</i> em 100 mA.</a>	45



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
1.1	Problemas de premissa .....	10
1.2	Justificativa .....	11
1.3	Objetivos .....	12
1.3.1	Objetivos gerais .....	12
1.3.2	Objetivos específicos .....	12
1.4	Organização do trabalho .....	12
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>14</b>
2.1	Introdução .....	14
2.2	Tiristor .....	14
2.2.1	Tiristor ideal .....	16
2.2.2	Meios de condução de um tiristor .....	16
2.3	Retificador monofásico controlado com carga resistiva .....	18
2.4	Conceitos básicos de controle em malha fechada .....	20
2.4.1	Ação de controle proporcional-integral .....	20
2.5	Conclusão parcial .....	21
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>22</b>
3.1	Introdução .....	22
3.2	Projeto da plataforma didática .....	22
3.2.1	Circuito de detecção de passagem por zero .....	22
3.2.2	<i>Driver</i> de disparo .....	23
3.2.3	Sensor de corrente .....	23
3.2.4	Chave de potência .....	24
3.2.5	Microcontrolador .....	25
3.2.6	Circuito esquemático completo .....	26
3.2.7	<i>Layout</i> da PCI .....	28
3.3	Modelagem e projeto do sistema de controle .....	28
3.3.1	Projeto do controlador .....	30
3.3.2	Código embarcado no microcontrolador .....	33
3.4	Conclusão parcial .....	35
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>36</b>
4.1	Introdução .....	36
4.2	Resultados simulados .....	36
4.3	Resultados práticos .....	39
4.3.1	Plataforma implementada .....	39
4.3.2	Resultados experimentais .....	40
4.4	Análise comparativa dos resultados .....	44
4.5	Conclusão parcial .....	45
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>46</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>47</b>
	APÊNDICE A - Código para operação em malha aberta .....	<b>48</b>
	APÊNDICE B - Código para operação malha fechada .....	<b>51</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Uma plataforma didática é um meio eficaz e objetivo para adquirir competências práticas em relação a um determinado assunto, buscando despertar a curiosidade e o desejo pelo conhecimento acerca de um tema proposto. Dessa forma, é agregado valor à prática de ensino favorecendo uma melhor experiência para aquele que irá usufruir das experiências oferecidas pela plataforma didática.

Para o desenvolvimento acadêmico é de fundamental importância as atividades práticas em laboratórios, onde busca-se assimilar os conceitos teóricos aprendidos em sala com uma implementação prática. O fato de não haver uma plataforma didática para o ensino de retificadores controlados no campus Apucarana-PR faz com que os discentes não tenham um contato direto com este tipo de circuito. Logo, é importante para o ensino de sistema de controle e eletrônica de potência o desenvolvimento de uma plataforma didática, contribuindo com o meio acadêmico.

Neste contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema didático de ponte retificadora tiristorizada em malha fechada, com a finalidade de proporcionar a compreensão da operação de um tiristor, o funcionamento do circuito de retificação, avaliar o circuito de sincronismo e disparo, e o comportamento do sistema de controle.

A plataforma proposta será composta por sensor e circuito de condicionamento de sinal para a avaliação da resposta do sistema, e também por circuito de disparo que permite a implementação de controle digital por meio de um microcontrolador. Deste modo, os discentes terão experiência entre a teoria e a prática de sistemas de controle e eletrônica de potência.

### 1.1 Problemas de premissa

Uma das preocupações na engenharia elétrica é realizar a conexão entre diferentes sistemas elétricos em alguns casos é necessário a conversão de corrente alternada para corrente contínua. É para este fim que são utilizadas as pontes retificadoras. Dessa forma, uma abordagem interessante é a adoção da operação em malha fechada do sistema em que se busca a estabilidade do valor de corrente de saída desejado.

O objetivo deste trabalho é contribuir com as práticas laboratoriais por meio de uma plataforma didática de um retificador tiristorizado monofásico operando em malha fechada por meio de controlador digital.

## 1.2 Justificativa

Os retificadores controlados com tiristores possuem diversas aplicações, tais como fontes de alimentação reguladas de potência, chaves estáticas, ciclo-conversores, controladores de motores e diferentes tipos de cargas. Neste sentido, é relevante para área de sistemas de controle o desenvolvimento de um sistema em malha fechada para retificadores tiristorizados visando uma plataforma de estudo de diferentes técnicas de controle.

Foi proposta por Brito *et al.* (2010), uma plataforma didática de um retificador trifásico controlado em malha aberta e em malha fechada, com um sistema misto de tiristores e diodos. Para a parte de controle foi utilizado o circuito integrado TCA 785, juntamente com transformadores de pulso para realizar o desacoplamento entre a parte de comando e potência. Esta aplicação desenvolvida por Brito *et al.* (2010), tem o objetivo de contribuir com o estudo prático de retificadores, assim como este trabalho.

O trabalho desenvolvido por Vicente (2009) traz a utilização de chip programável PSoC (do inglês, *Programmable System-on Chip*) que permite manter uma corrente de saída do circuito de um retificador monofásico em uma referência predeterminada, e é utilizado um optoacoplador MOC3011 para o circuito de disparo. Dessa implementação de chip programável, é vista a relação de um controle que será feito computacionalmente e inserido em um componente programável, com o objetivo de realizar o controle em malha fechada por meio de um sistema embarcado.

Outra aplicação de um sistema computadorizado foi desenvolvida por Santos (2007), onde foi implementado uma ponte retificadora por módulos SKKT5708E, uma placa contendo três sensores Hall, um sistema de excitação contendo uma CPU 586, um módulo transformador de tensão TRF10 para fornecer o sistema de sincronismo dos disparos e uma placa de isolamento dos pulsos de disparo. Trazendo uma contribuição para o estudo de pontes retificadoras em paralelo, e também uma contribuição com o desenvolvimento de controle digital.

Este trabalho irá apresentar uma plataforma didática para estudo de sistema de controle e que será relevante para obter conhecimentos práticos a respeito de pontes retificadoras tiristorizadas controladas. Assim, por meio de estudos laboratoriais a plataforma ajudará a conhecer o circuito de disparo de um tiristor, o projeto de um compensador e o princípio de funcionamento de uma retificação controlada.

### **1.3 Objetivos**

#### 1.3.1 Objetivos gerais

Este trabalho propõe desenvolver uma plataforma didática, com o objetivo de manter a corrente de saída constante por meio de um sistema de controle em malha fechada e contribuir com o curso de engenharia elétrica do campus Apucarana - PR. O projeto consiste em um retificador controlado utilizando um sistema microcontrolado.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

- Projetar e simular o sistema eletrônico de retificação (especificação do tiristor, circuito de disparo e de sensoriamento de corrente);
- Desenvolver o *layout* da placa de circuito impresso;
- Montar a placa de circuito impresso;
- Testar e avaliar sinais de disparo dos tiristores, sincronismo e sensoriamento;
- Realizar reparos e melhorias na placa de circuito impresso, caso necessário;
- Projetar, simular e validar o sistema de controle;
- Analisar resposta experimental do sistema operando em malha fechada e readequar projeto do sistema de controle, caso necessário.

### **1.4 Organização do trabalho**

Este trabalho está organizado em capítulos, dispostos da seguinte forma:

- **Fundamentação teórica:** apresenta o funcionamento do tiristor e da ponte retificadora monofásica com carga resistiva.
- **Materiais e métodos:** apresenta o circuito projetado, o *layout* para a placa de circuito impresso, a modelagem da ponte retificadora juntamente com o projeto do compensador, bem como os resultados obtidos através de simulação do compensador.
- **Resultados:** apresenta os resultados simulados e práticos da plataforma e a análise comparativa entre os resultados obtidos.
- **Considerações finais:** apresenta a conclusão deste trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Introdução

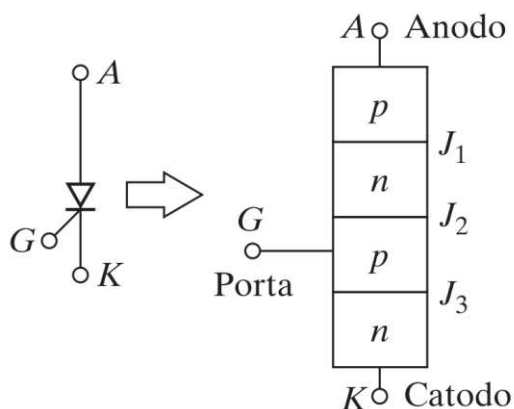
Neste capítulo é apresentado o princípio de funcionamento do tiristor e também da ponte retificadora, buscando estudar a topologia de um retificador monofásico com carga resistiva.

### 2.2 Tiristor

Em sua composição, o tiristor é elaborado de forma a ter quatro camadas semicondutoras de forma arranjadas como *pnpn*, e que conta com três terminais: anodo, catodo e *gate* (gatilho). De forma que, pelo o anodo e catodo há o fluxo de energia do sistema, e no *gate* é feito o disparo para controle de condução (RASHID, 2014). A Figura 1 apresenta a simbologia do tiristor comumente utilizada e as junções de camadas *pn*.

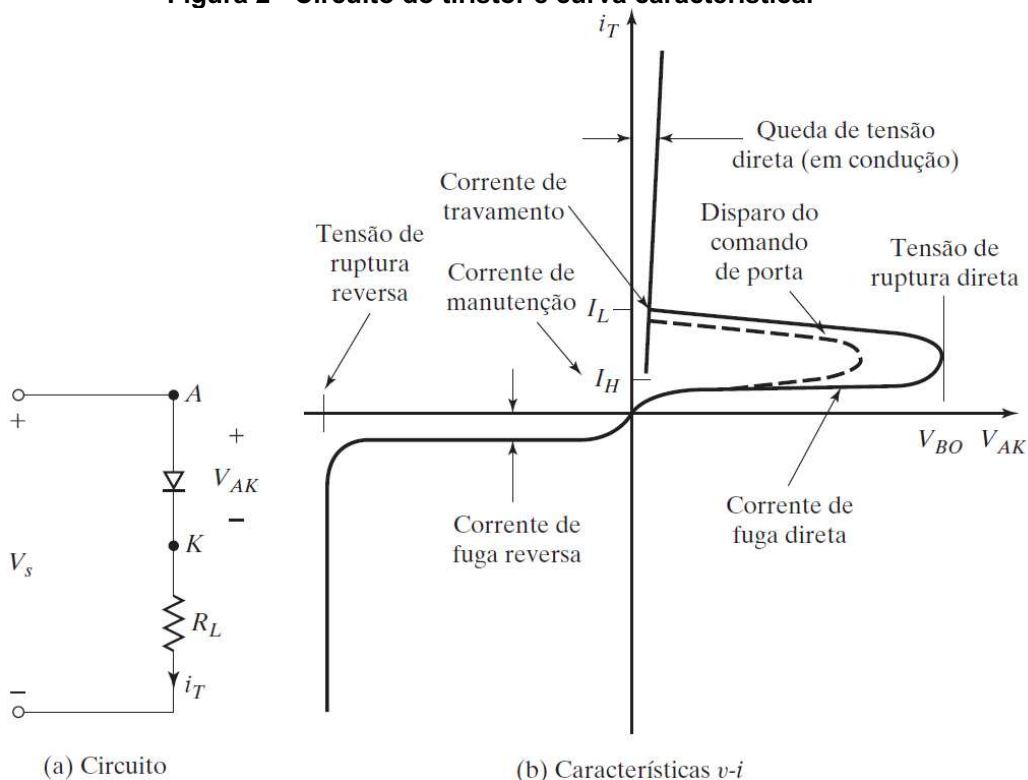
No momento em que a tensão no anodo se torna positiva em comparação ao catodo, as junções  $J_1$  e  $J_3$  estão diretamente polarizadas e  $J_2$  encontra-se reversamente polarizada. Dessa forma, o tiristor se encontra em corte ou estado de bloqueio e uma pequena corrente passa do anodo para o catodo. Conforme aumenta-se a tensão  $V_{AK}$  entre o anodo e o catodo à uma elevada tensão, a junção  $J_2$  acaba por ceder a passagem de portadores de carga pela junção, o que é conhecido como ruptura por avalanche e a resultante é a tensão de ruptura direta  $V_{BO}$  (RASHID, 2014). Estando  $J_1$  e  $J_3$  polarizadas diretamente, haverá um fluxo de portadores através das junções de forma livre, o que dá origem uma grande quantidade de corrente no sentido de anodo-catodo que muda o estado de bloqueio para o estado de condução. Para se manter neste estado, a corrente que flui pelo anodo deve ser elevada o suficiente para se manter acima da corrente de travamento  $I_L$  (corrente mínima no anodo para manter o tiristor em modo de condução imediatamente após o disparo), caso não atenda a essa condição o tiristor irá retornar para a situação onde se encontra inversamente polarizado (RASHID, 1999). A característica estática é demonstrada pela curva característica da Figura 2.

Figura 1 - Simbologia do tiristor e camadas pn.



Fonte: Rashid (2014, p. 379).

Figura 2 - Circuito do tiristor e curva característica.



Fonte: Rashid (2014, p. 380).

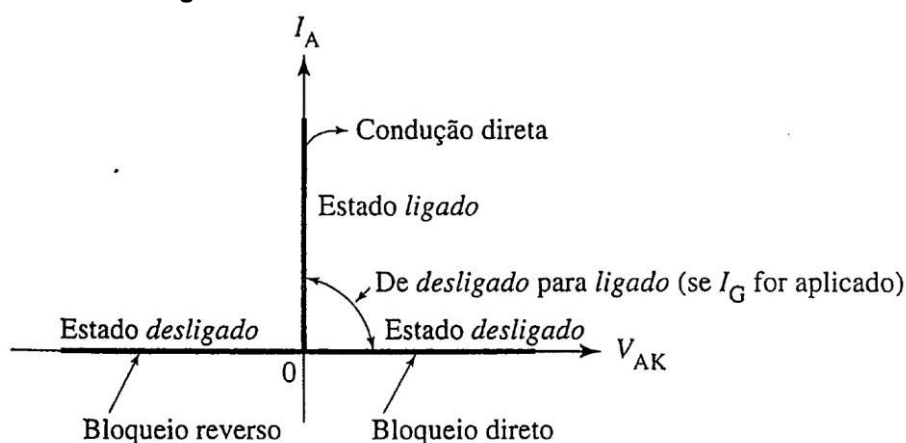
A partir do momento em que o tiristor passa a conduzir, seu comportamento é semelhante a um diodo e o componente não permite o controle devido à falta da camada de depleção na junção  $J_2$  e o alto fluxo de portadores. Porém, reduzindo a corrente de anodo abaixo da corrente de manutenção ( $I_H$ ), surgirá uma região de depleção na junção  $J_2$  devido a redução de portadores e o tiristor entrará em bloqueio.

A corrente de manutenção é menor do que a corrente de travamento e é compreendida como o valor mínimo de corrente que se deve ter no anodo para manter o componente no estado ligado (RASHID, 2014).

### 2.2.1 Tiristor ideal

Para um tiristor ideal, pode-se representar uma curva característica ideal como mostrada na Figura 3. É observado os seguintes estados: condução direta, bloqueio direto e bloqueio reverso. Se a corrente na porta for aplicada, o componente passa do bloqueio direto para a condução direta, se assemelhando a um diodo em condução.

**Figura 3 - Curva característica ideal do tiristor.**



Fonte: Ahmed (2000, p.99).

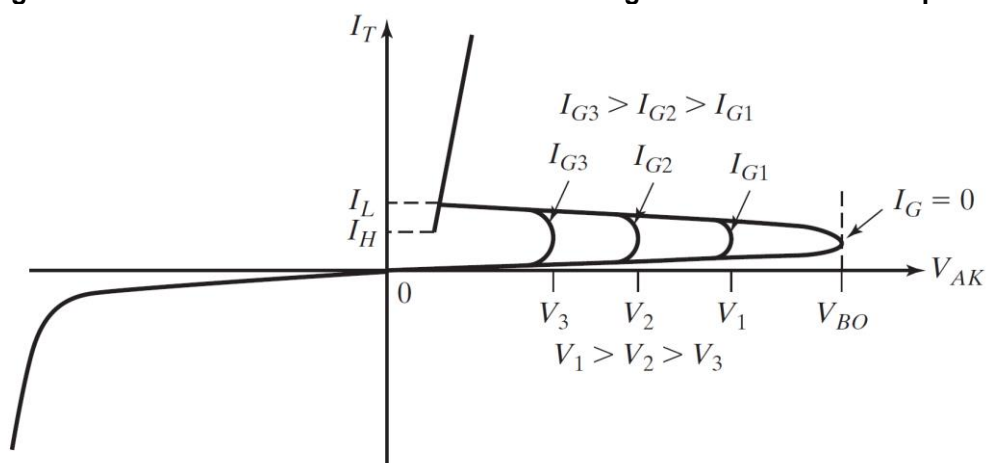
### 2.2.2 Meios de condução de um tiristor

O disparo de um tiristor pode ser feito de algumas maneiras, são elas: disparo por aumento de temperatura; disparo por luminosidade; disparo por sobretensão; disparo por tensão e disparo por corrente de gatilho.

A técnica utilizada neste trabalho para efetuar a condução do tiristor é o disparo por corrente de gatilho. Considerando o tiristor diretamente polarizado e uma tensão positiva entre o *gate* e o anodo, o tiristor entrará em modo de condução, conseqüentemente conforme a corrente de acionamento se eleva, a tensão de bloqueio diminui. A Figura 4 apresenta a relação entre a corrente de gatilho e a tensão de bloqueio.



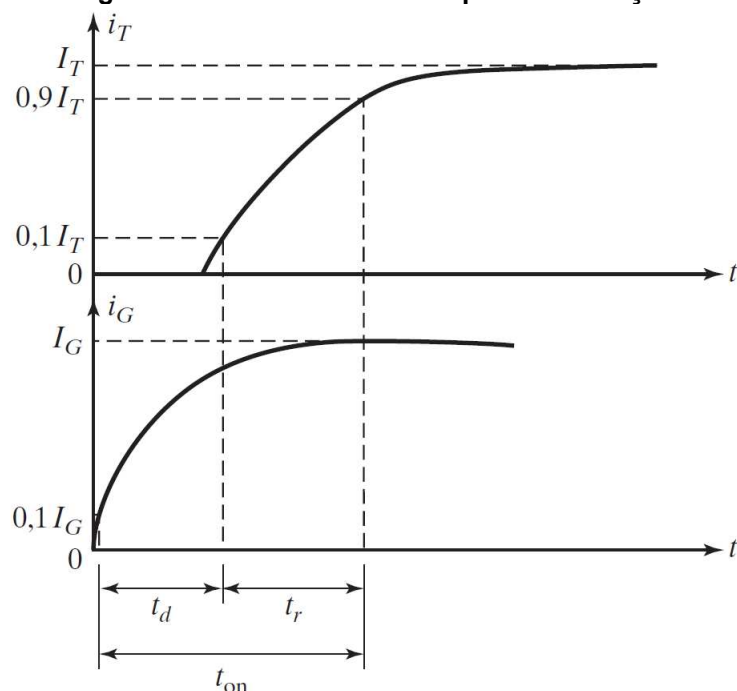
Figura 4 - Curva característica entre a corrente de gatilho e tensão de bloqueio.



Fonte: Rashid (2014, p. 384).

Quando aplicado uma corrente de disparo no *gate* do tiristor ocorre um atraso de tempo definido como tempo de disparo ( $t_{on}$ ), que se dá no momento em que há a presença do sinal de gatilho e efetivamente a condução do tiristor (RASHID, 1999). A Figura 5 ilustra o atraso de tempo entre o disparo e a condução.

Figura 5 - Característica de disparo e condução.



Fonte: Rashid (2014, p. 384).

O tempo de disparo ( $t_{on}$ ) é o intervalo de tempo entre a corrente de condução que alcança 90% de regime permanente ( $0,9I_T$ ) e a corrente de disparo que se encontra em 10% de regime permanente ( $0,1I_G$ ) (RASHID, 1999). Note que  $t_{on}$  é a

composição do tempo de atraso ( $t_d$ ) e o tempo de subida ( $t_r$ ). O tempo de atraso ( $t_d$ ) é o intervalo compreendido entre o instante do sinal de gatilho e o instante em que efetivamente ocorre alteração na corrente do tiristor. O tempo de subida ( $t_r$ ) é o intervalo entre 10% a 90% da corrente de condução.

De acordo com Rashid (2014, p. 384-385), há algumas condições a serem consideradas no circuito de acionamento para que o projeto seja bem desenvolvido:

1. O sinal de acionamento deve ser removido após o tiristor ser ligado. Um sinal contínuo de acionamento aumentaria a perda de potência na junção da porta.
2. Enquanto o tiristor estiver inversamente polarizado, não deve haver sinal de acionamento; caso contrário, o tiristor pode falhar por conta de um aumento da corrente de fuga.
3. A largura do pulso de acionamento  $t_G$  deve ser maior do que o tempo necessário para a corrente de anodo subir até o valor da corrente de travamento  $I_L$ . Na prática, normalmente utiliza-se uma largura de pulso  $t_G$  maior do que o tempo de entrada em condução  $t_{on}$  do tiristor. (RASHID, 2014, p. 384-385)

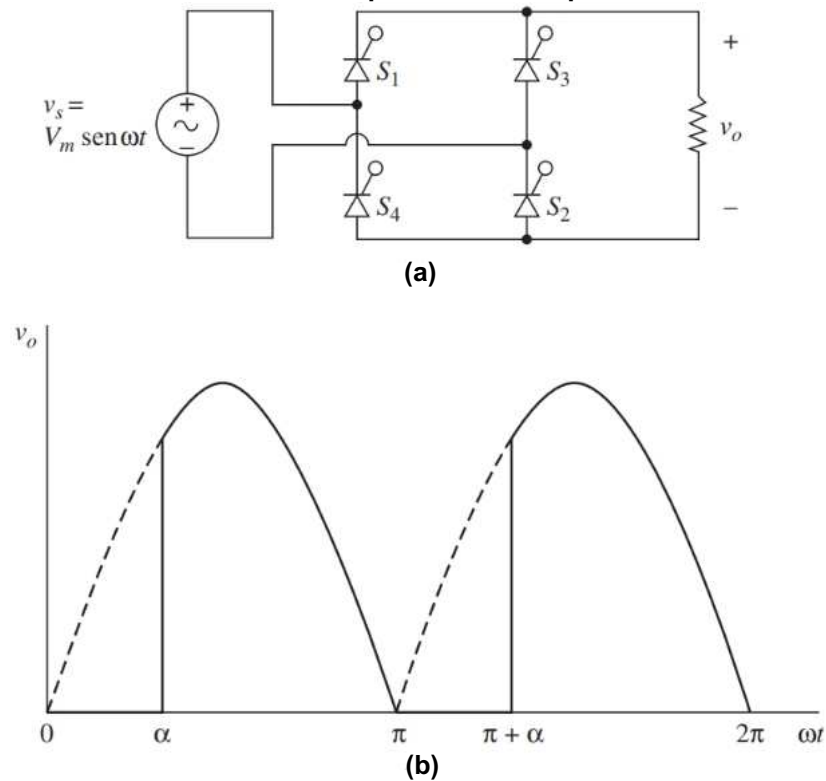
### 2.3 Retificador monofásico controlado com carga resistiva

Observando a forma de onda da tensão de saída ( $v_o$ ) (Figura 6) do conversor monofásico controlado com carga resistiva é possível determinar a componente média desta onda como sendo:

$$V_{m\acute{e}dia} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m \sin t \, dt = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha), \quad (1)$$

em que  $V_{m\acute{e}dia}$  é a tensão média da carga,  $V_m$  é a tensão máxima de entrada,  $\omega$  é a frequência angular,  $t$  é a variável de tempo e  $\alpha$  o ângulo de disparo (HART, 2012).

Figura 6 - (a) Circuito esquemático de retificador de onda completa em ponte, (b) Forma de onda senoidal retificada a partir de um disparo no instante  $\alpha$ .



Fonte: Adaptado de Hart (2012, p. 132).

A corrente média na carga será dado pela relação:

$$I_0 = \frac{V_0}{R} = \frac{V_m}{\pi R} (1 + \cos \alpha), \quad (2)$$

em que  $I_0$  é a corrente média na carga,  $V_0$  é a tensão na carga e  $R$  é a resistência da carga (HART, 2012).

Pode-se determinar a corrente RMS na carga a partir da expressão de potência ( $P = I_{rms}^2 R$ ), no qual se obtém que (HART, 2012):

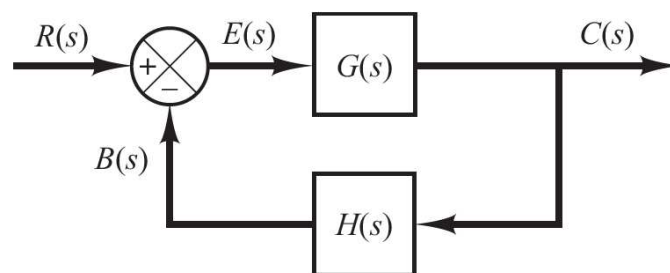
$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \left( \frac{V_m}{R} \sin t \right)^2 dt} = \frac{V_m}{R} \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{4\pi}}. \quad (3)$$

Com uma carga puramente resistiva,  $S_1$  e  $S_2$  estarão em condução de  $\alpha$  a  $\pi$ ,  $S_3$  e  $S_4$  estão em condução de  $\alpha + \pi$  a  $2\pi$ .

## 2.4 Conceitos básicos de controle em malha fechada

Para realizar o controle de um circuito em malha fechada é preciso que se monitore uma grandeza física na saída do sistema através de um sensor. Esse conceito de controle é fundamentado em obter o valor de saída da planta e comparar com um valor de referência que irá gerar um erro, e a partir desse erro regular o valor de saída para o valor desejado. O diagrama de blocos do sistema em malha fechada é representado na Figura 7.

**Figura 7 - Diagrama de blocos de um sistema em malha fechada.**



Fonte: Ogata (2010, p 16).

Para que o sistema alcance a estabilidade é utilizado um controlador que fará com que o valor de referência desejado e o valor medido na saída do sistema seja o mais próximo possível.

### 2.4.1 Ação de controle proporcional-integral

A combinação entre a ação de controle proporcional e a de controle integral é denominada de ação de controle proporcional-integral. A ação integral tem como principal função a de garantir o erro nulo em regime permanente, porém, se utilizada isoladamente tende a levar a instabilidade do sistema. Para contornar este problema, utiliza-se a ação proporcional em conjunto com a ação integral combinando as características de cada ação. Para um controlador do tipo PI, o sinal de controle é definido por:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt,$$

onde  $u(t)$  é o valor de saída do controlador;  $K_p$  é o ganho proporcional;  $e(t)$  é o sinal de erro (referência) e  $T_i$  é o tempo integrativo (OGATA, 2010).

Para a função de transferência do controlador temos:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) = K_p + \frac{K_i}{s}$$

## 2.5 Conclusão parcial

Ao longo desse capítulo foi exposto as características do tiristor, seu funcionamento e meios de condução. Além disto, foi apresentada a topologia e o equacionamento da ponte retificadora controlada monofásica com carga resistiva.

Para o próximo capítulo serão apresentados o circuito implementado e a escolha dos componentes eletrônicos. Também será apresentada a modelagem da ponte retificadora e sua carga, bem como, o projeto do compensador que será implementado e os resultados obtidos através de simulação.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

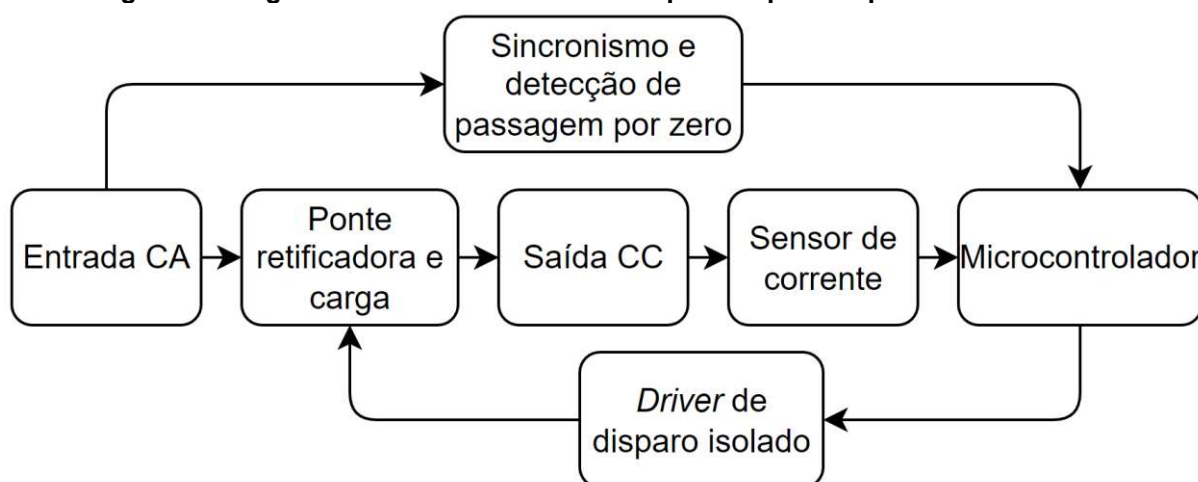
#### 3.1 Introdução

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento da placa de circuito impresso, bem como, a definição dos componentes eletrônicos que compõem o circuito implementado. Além disto, discorre-se sobre a modelagem dinâmica e o projeto do sistema de controle para o retificador monofásico.

#### 3.2 Projeto da plataforma didática

Os circuitos que compõem a plataforma didática são: a ponte retificadora controlada; o sensor de corrente; circuito de sincronismo e detecção de passagem por zero; driver de disparo isolado; microcontrolador. A Figura 8 ilustra a conexão entre os circuitos da plataforma didática.

**Figura 8 - Diagrama de blocos dos circuitos que compõem a plataforma didática.**



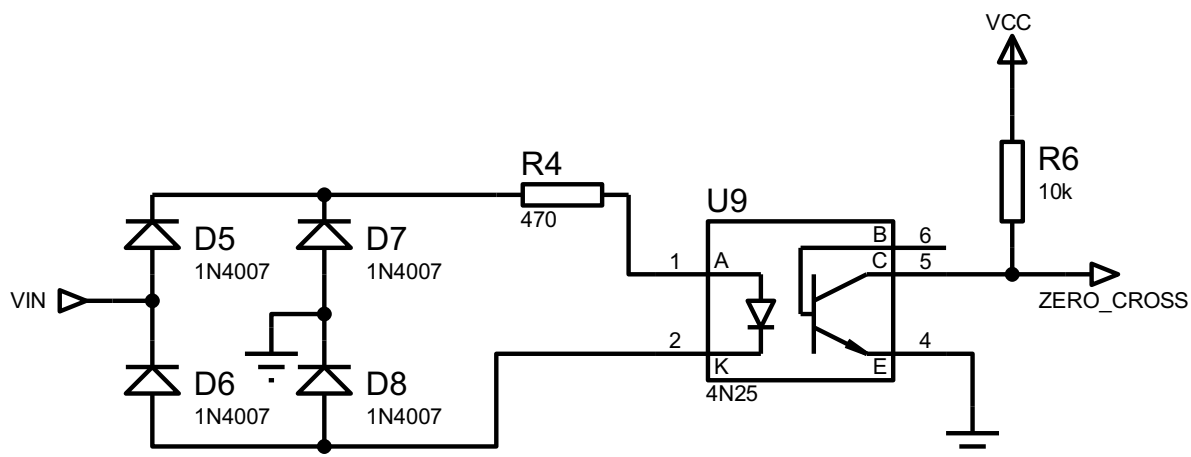
Fonte: Autoria própria (2022).

##### 3.2.1 Circuito de detecção de passagem por zero

Para realizar o disparo correto dos tiristores é necessário que haja um circuito de detecção da passagem pela amplitude zero do sinal senoidal da rede elétrica, para que os pulsos de disparos sejam sincronizados com a rede elétrica. Para realizar esta detecção de passagem por zero foi utilizado o fototransistor 4N25 em conjunto com

um retificador de onda completa por meio de diodos. O circuito de detecção de passagem por zero é apresentado na Figura 9.

**Figura 9 - Circuito de detecção de passagem por zero.**

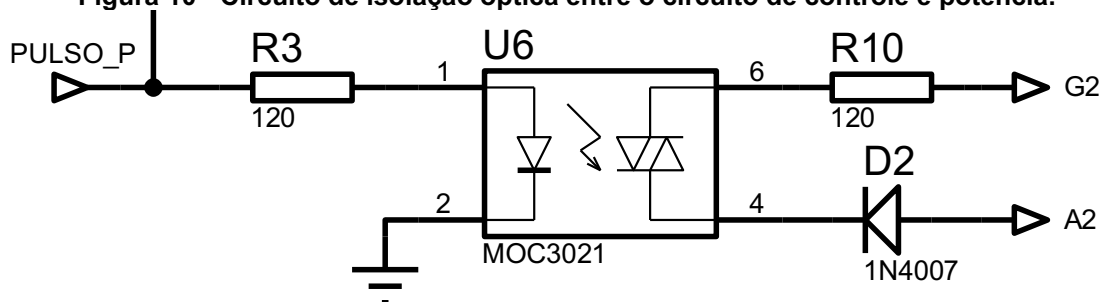


Fonte: Autoria própria (2022).

### 3.2.2 Driver de disparo

Para realizar a isolação entre o circuito de controle e o de potência, utilizou-se o circuito integrado MOC3021, que efetua o acoplamento óptico entre o sinal de controle proveniente do microcontrolador e o sinal de disparo do tiristor do retificador a partir de uma saída TRIAC. O MOC3021 possui uma tensão de isolação de 7500 V e sua aplicação é facilitada com a utilização de alguns resistores e um diodo, vide Figura 10, a qual apresenta o circuito proposto para a plataforma didática.

**Figura 10 - Circuito de isolação óptica entre o circuito de controle e potência.**



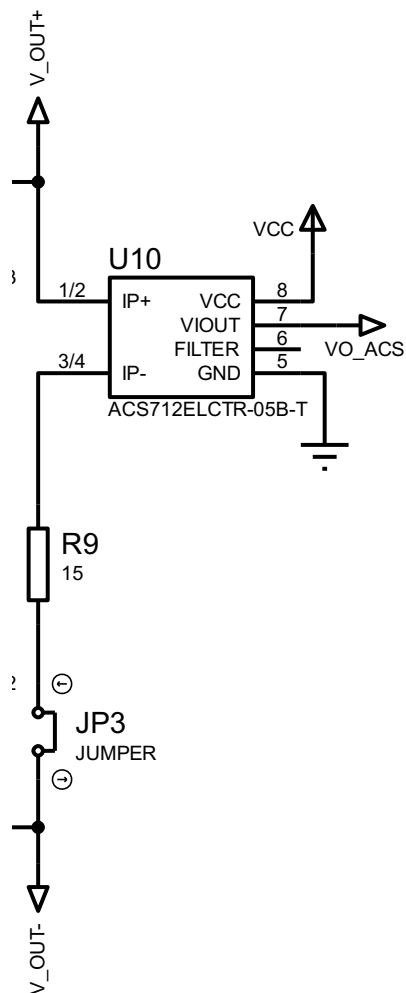
Fonte: Autoria própria (2022).

### 3.2.3 Sensor de corrente

A fim de realizar a medição da corrente de saída foi utilizado o sensor de corrente ACS712-05B, que tem a capacidade de medir tanto corrente alternada

quanto contínua na faixa de -5 a +5 A. O sensor é baseado no efeito *Hall* e converte a corrente medida em uma tensão de saída proporcional de 185mV/A (ALLEGRO, 2012). A Figura 11 apresenta o esquema de ligação do sensor com a carga resistiva R9.

**Figura 11 - Sensor de corrente ACS712 em série com a carga.**



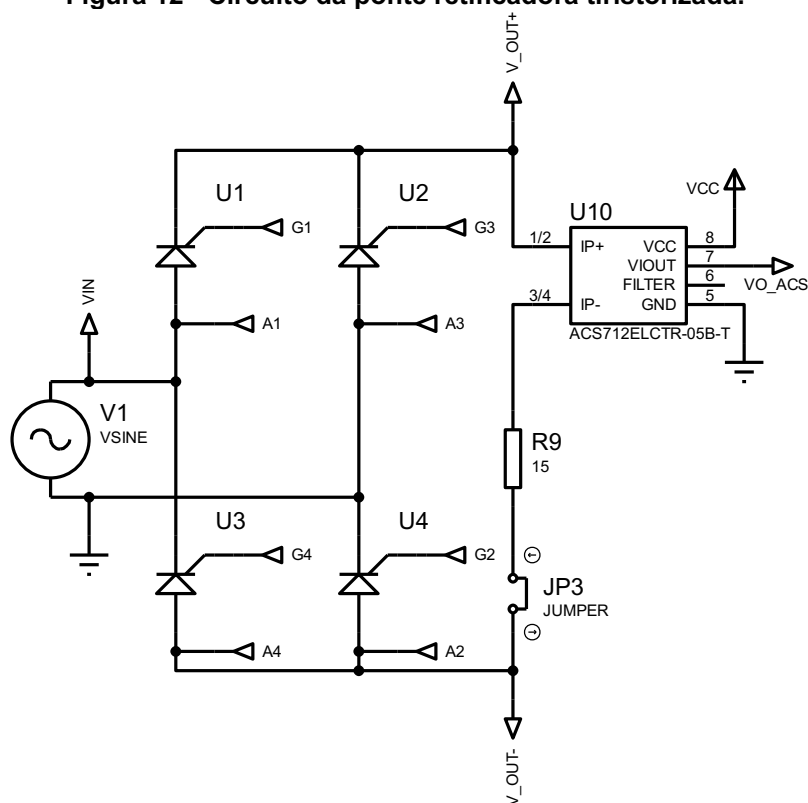
**Fonte: Autoria própria (2022).**

### 3.2.4 Chave de potência

A chave escolhida para o circuito é o tiristor C106A que suporta uma corrente direta eficaz máxima de 4 A, uma corrente média máxima de 2.55 A e sua tensão repetitiva direta e reversa é de 100V. Na Figura 12 é apresentado o circuito da ponte retificadora.



**Figura 12 - Circuito da ponte retificadora tiristorizada.**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

### 3.2.5 Microcontrolador

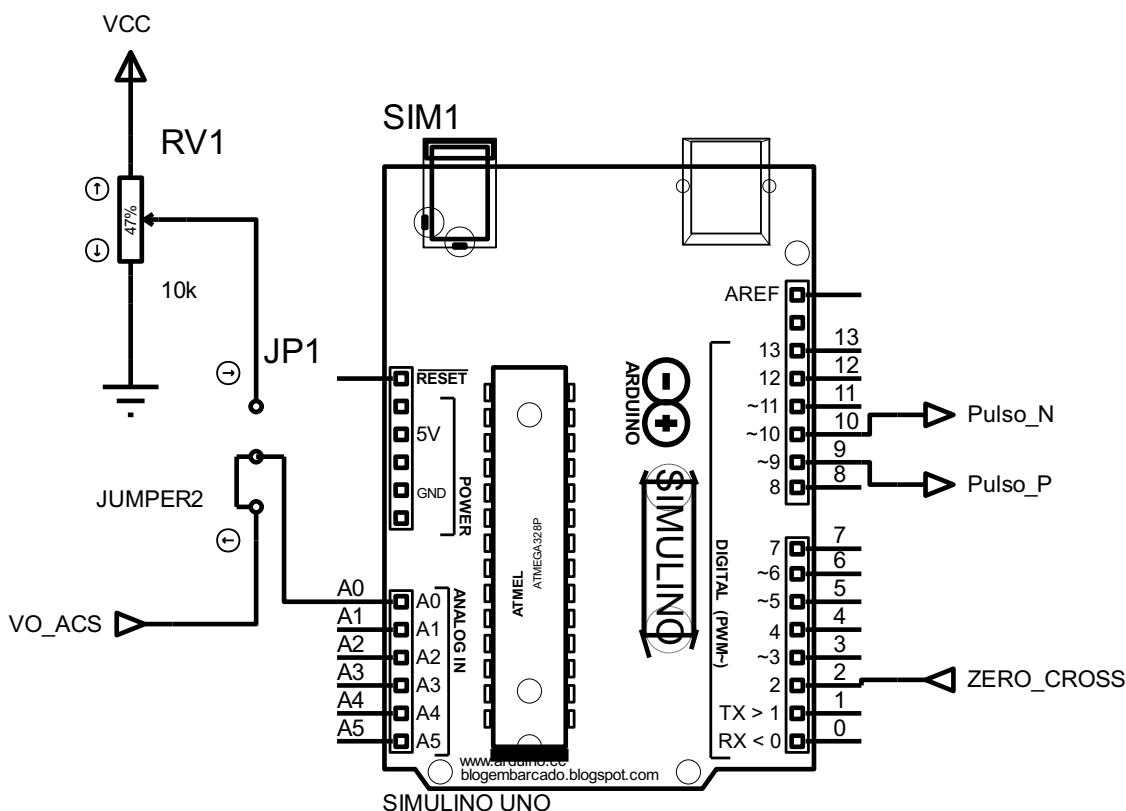
O microcontrolador adotado para embarcar os códigos de controle do sistema foi o ATmega328P em uma plataforma Arduino Uno. Algumas de suas especificações são (ARDUINO, 2021):

- 23 entradas e saídas;
- tensão de operação de 5V;
- velocidade de *clock* de 16 MHz;
- resolução do conversor analógico para digital de 10 bits;
- um *timer* 16 bits e dois *timers* de 8 bits.

Além disso, esta plataforma foi escolhida por ser *open source* e por possuir uma grande disponibilidade de bibliotecas, facilitando a elaboração de códigos para o microcontrolador na linguagem C++.

Os identificadores das conexões entre o Arduino UNO e os demais circuitos da plataforma didática estão representados na Figura 13.

Figura 13 - Esquema de conexões do Arduino.



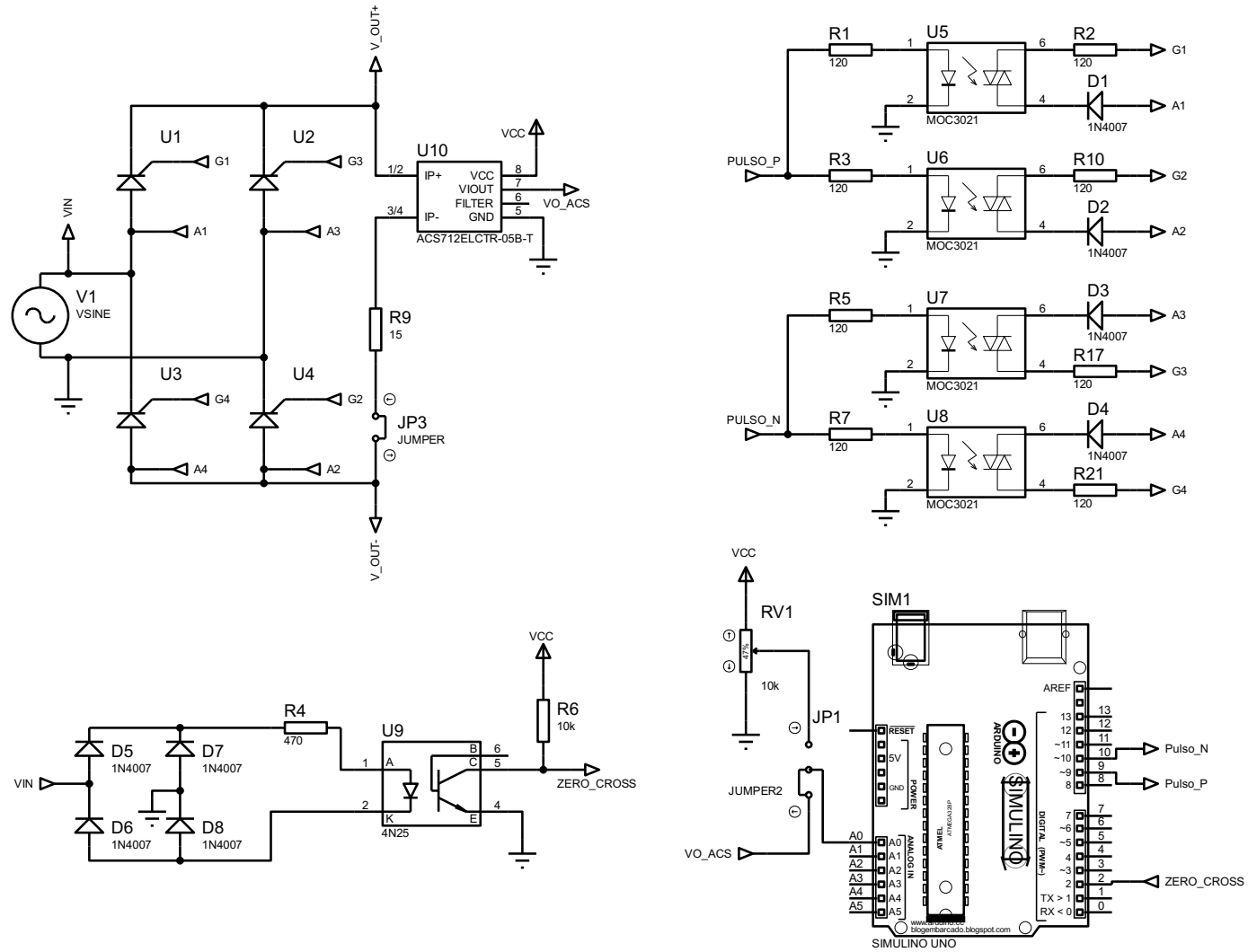
Fonte: Autoria própria (2022).

Os pinos 9 e 10 tem como função gerar os pulsos para os semiciclos positivo e negativo, respectivamente. O pino A0 recebe o sinal do sensor de corrente para realizar o controle em malha fechada ou do potenciômetro para controle em malha aberta. O pino 2 tem a função de realizar o sincronismo com a rede, ou seja, recebe o sinal do detector de passagem por zero.

### 3.2.6 Circuito esquemático completo

Por fim, o circuito completo da plataforma didática é apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Circuito completo da plataforma didática.

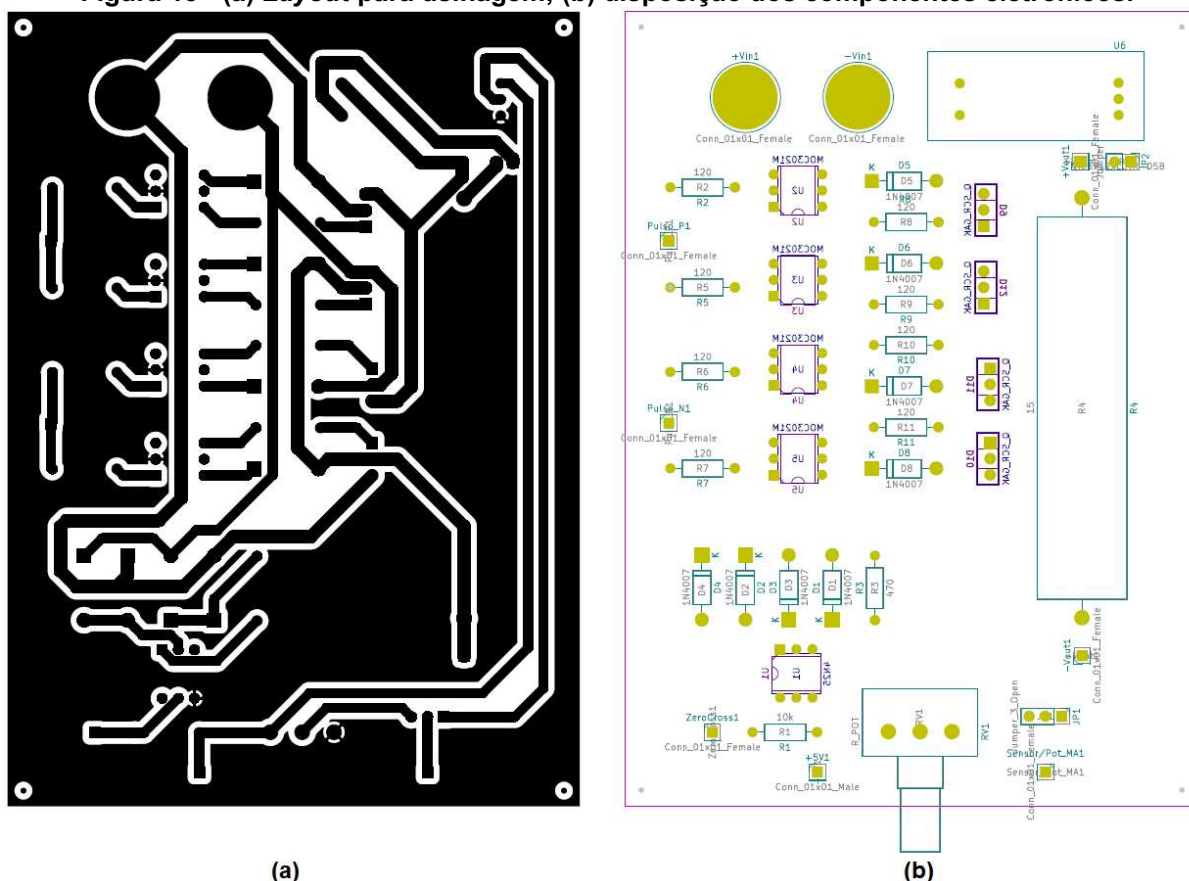


Fonte: Autoria própria (2022).

### 3.2.7 Layout da PCI

Para a confecção da placa de circuito impresso foi realizado o *layout* no *software* KiCAD. A partir do *layout* desenvolvido, vide Figura 15, obteve-se o arquivo Gerber para o *software* CNCH3N gerar os comandos para o CNC (Controle Numérico por Computador) prototipar a placa de circuito de impresso.

Figura 15 - (a) *Layout* para usinagem; (b) disposição dos componentes eletrônicos.



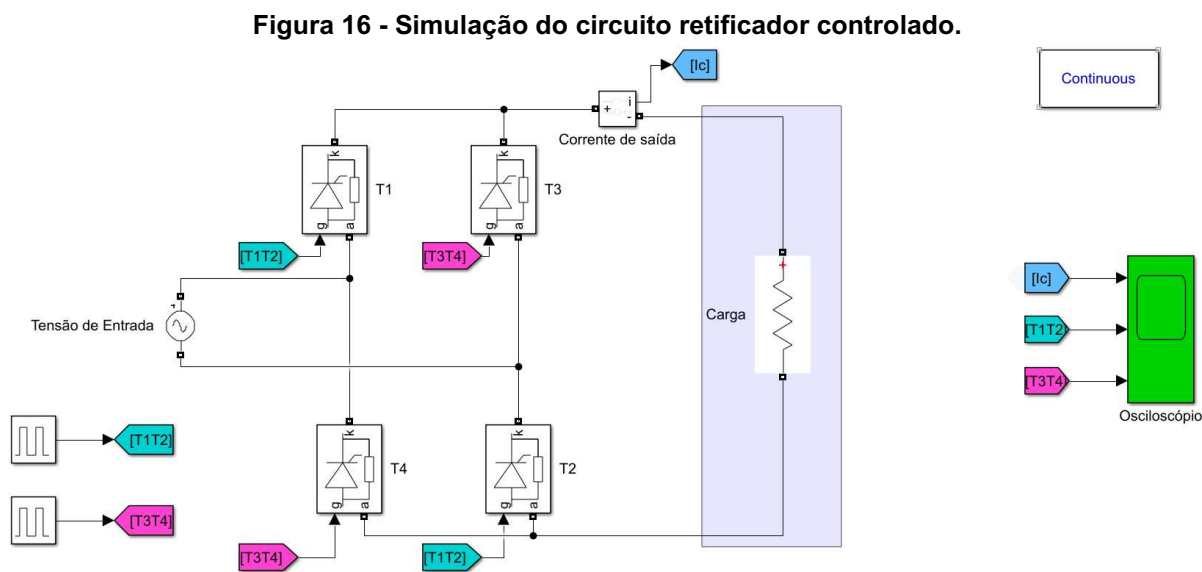
Fonte: Autoria própria (2022).

### 3.3 Modelagem e projeto do sistema de controle

Neste trabalho o objetivo é efetuar o controle automático da corrente média de saída do retificador da plataforma didática. Para tal, o sistema de controle digital deve realizar a aferição do sinal do sensor de corrente por meio de um conversor analógico para digital, computar o erro entre o valor desejado e o medido, e gerar uma ação de controle para acionar os tiristores baseado em uma relação temporal dos sinais de disparo do retificador.

A abordagem de projeto do sistema de controle adotada neste trabalho consiste em primeiro definir a dinâmica da planta no domínio contínuo, realizar o projeto do controlador contínuo e posteriormente discretizá-lo por meio da técnica de emulação para ser implementado no microcontrolador.

A dinâmica da planta pode ser obtida a partir da ferramenta *System Identification* do MATLAB. Com essa ferramenta é possível identificar diferentes modelos matemáticos de um sistema dinâmico através de dados medidos ou obtidos via simulação computacional. Sendo assim, utilizou-se dos dados de entrada e saída do sistema correspondente ao retificador controlado simulado no *Simulink*, conforme apresentado na Figura 16. Com os dados obtidos de simulação da saída do sistema operando em malha aberta para um sinal do tipo degrau nos sinais de disparo, exportou-se para o *System Identification* a fim de realizar a identificação da dinâmica do sistema.



Fonte: Autoria própria (2022).

A partir do circuito da Figura 16 obteve-se uma estimativa de função de transferência que é apresentada na equação (4):

$$G(s) = \frac{I(s)}{U(s)} = \frac{31370}{s + 421,2}, \quad (4)$$

em que  $I(s)$  representa a saída do sistema dada pela corrente média do retificador controlado e  $U(s)$  corresponde a entrada do sistema dado pelo sinal senoidal

modificado pela ponte retificadora e ângulo de disparo do tiristor. É importante ressaltar que a equação obtida é equivalente para uma carga RL no modo de condução contínuo, pois, obteve-se um pólo que caracteriza uma carga indutiva juntamente com uma carga resistiva.

A resposta ao degrau unitário do sistema é apresentada na Figura 17.



Fonte: Autoria própria (2022).

### 3.3.1 Projeto do controlador

Para o projeto do controlador definiu-se alguns índices de performance e parâmetros desejados na operação em malha fechada do sistema. As especificações constam na Tabela 1.

**Tabela 1 - Especificação de parâmetros para operação em malha fechada do retificador.**

Parâmetros	Valor
Corrente de saída ( $I_o$ )	300 mA
Máximo sobressinal ( $M_p$ (%))	10%
Carga	15 $\Omega$
Tempo de estabelecimento ( $T_s$ )	1 ms

Fonte: Autoria própria (2022).

Optou-se por utilizar de um compensador PI para realizar o controle em malha fechada. Com os parâmetros estipulados na Tabela 1, obtém-se o coeficiente de amortecimento, frequência natural e tempo de pico. O coeficiente de amortecimento do sistema é dado por:

$$\xi = \frac{-\ln(M_p/100)}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2(M_p/100)}} = 0,5912 \cdot$$

Por sua vez, a frequência natural é:

$$\omega_n = \frac{4}{\xi T_s} = 6766,4 \text{ rad/s} \cdot$$

E o tempo de pico é:

$$T_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \xi^2}} = 0,576 \text{ ms} \cdot$$

Da equação de malha fechada, tem-se que:

$$G_{MF} = \frac{31370 K_p s + 31370 K_I}{s^2 + s(421,2 + 31370 K_p) + 31370 K_I}, \quad (5)$$

utilizando da equação característica de um sistema de segunda ordem  $s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2$ , e comparando com a equação (5), é possível obter os ganhos  $K_I$  e  $K_p$  como segue:

$$K_I = \frac{\omega_n^2}{31370} = 1459,5,$$

$$K_p = \frac{2\xi\omega_n - 421,2}{31370} = 0,2416 \cdot$$

A partir da equação (5) é possível notar a influência de um zero na equação padrão de segundo grau. Logo, por simplicidade de cálculos, será utilizado a aproximação de 2ª ordem da função de transferência, tal que esta influência será desconsiderada. A desvantagem desta proposta é aumento do máximo sobressinal

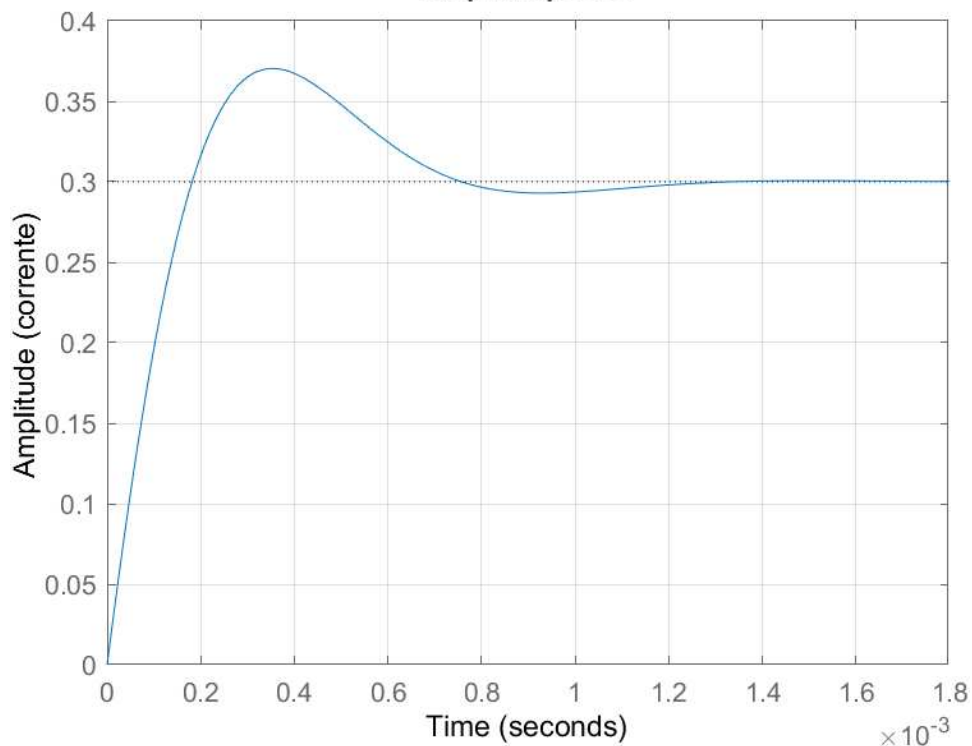
especificado, contudo em um nível tolerável à proposta deste trabalho (DORF; BISHOP, 2018).

Dessa forma o compensador PI fica sendo:

$$C(s) = \frac{0,2416s + 1459,5}{s}.$$

A resposta em malha fechada do sistema é mostrada na Figura 18. Nota-se o aumento do *overshoot* na resposta transitória de aproximadamente 10% do especificado e o tempo de estabelecimento de 1ms conforme projetado.

**Figura 18 - Resposta ao degrau unitário do sistema em malha fechada. Step Response**



Fonte: Autoria própria (2022).

Para discretizar o compensador é necessário utilizar uma técnica de transformação de analógico para digital, sendo assim, escolheu-se o método Tustin. A equação (6) apresenta o mapeamento do domínio  $s$  para  $z$ :

$$s = \frac{2z - 1}{T_s z + 1}, \quad (6)$$

sendo  $T_s$  o tempo de amostragem desejado.



Dessa forma, realizando a discretização do compensador pelo método Tustin com um tempo de amostragem de  $100 \mu s$ , tem-se:

$$C(z) = \frac{0,3146z - 0,1686}{z - 1} \quad (7)$$

$$= \frac{0,3146 - 0,1686}{1 - z^{-1}} z^{-1}$$

Para realizar a implementação computacional é necessário determinar a equação de diferenças da ação de controle para embarcar no microcontrolador. A partir da equação (7) tem-se:

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{0,3146 - 0,1686}{1 - z^{-1}} z^{-1}$$

$$U(z)(1 - z^{-1}) = E(z)(0,3146 - 0,1686 z^{-1})$$

$$u[n] - u[n - 1] = 0,3146e[n] - 0,1686e[n - 1]$$

$$u[n] = 0,3146e[n] - 0,1686e[n - 1] + u[n - 1]$$

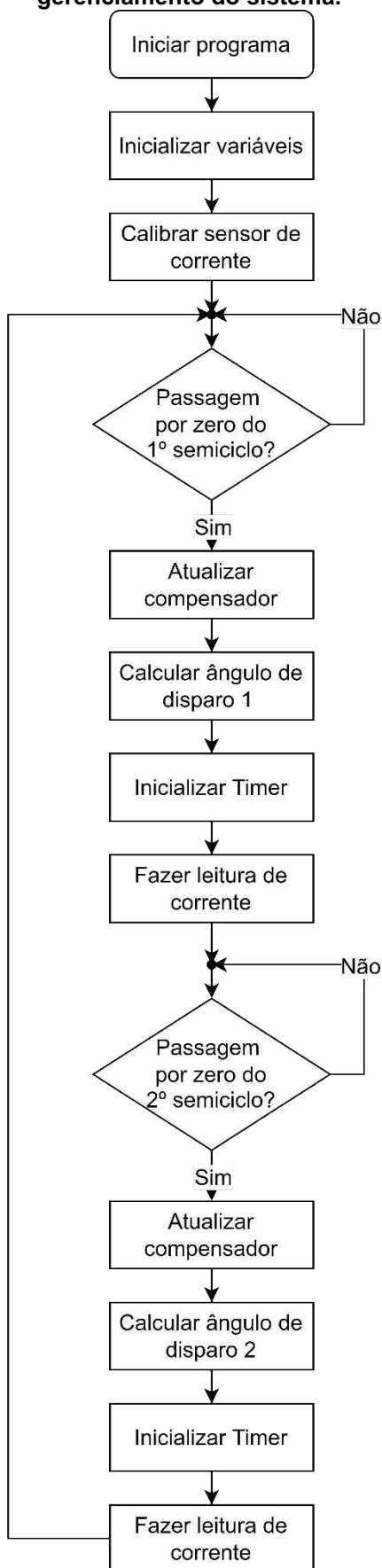
em que  $u[n]$  é a ação de controle e  $e[n]$  é o sinal de erro.

Dessa forma, é possível embarcar o compensador projetado para o microcontrolador e realizar o controle em malha fechada do sistema.

### 3.3.2 Código embarcado no microcontrolador

Para o funcionamento do controle utilizando o microcontrolador é necessário que a sequência de código tenha funções bem definidas a fim de obter um bom resultado na saída do sistema. Na Figura 19 é mostrado um fluxograma para melhor visualização da rotina que será executada. O código completo encontra-se no apêndice B.

Figura 19 - Fluxograma do código embarcado no microcontrolador para controle e gerenciamento do sistema.



Fonte: Autoria própria (2022).

O programa inicia e então realiza a declaração das variáveis que serão utilizadas durante todo o código, tais como a corrente desejada, ganhos proporcional e integral, sensibilidade do sensor de corrente e entre outras variáveis auxiliares. Também é realizada a configuração dos pinos como entrada e saída.

Após a primeira etapa é feita a calibração do sensor de corrente ACS712, pois, devido ao seu *offset* na saída de 2,5 V é necessário encontrar o ponto zero e efetuar a compensação do *offset*.

Passado essas etapas, o microcontrolador começará a rotina de sincronismo com a rede. Para isso, o microcontrolador realiza a medição do sinal do circuito de passagem por zero, cujo pulso dispara uma interrupção por *hardware* para o microcontrolador executar os comandos de controle do sistema. Neste momento, o microcontrolador realiza os cálculos referentes ao compensador atualizando o valor de erro e de cada parcela (proporcional e integral), bem como calcula o ângulo de disparo dos tiristores a partir da ação de controle. Com isso, um temporizador do microcontrolador recebe o ângulo de disparo convertido em segundos para realizar os disparos dos tiristores. A cada semiciclo também ocorre a conversão analógica para digital da realimentação que será utilizada para calcular o erro do sistema.

Dessa forma, a rotina de programação se repete para cada semiciclo e realiza a compensação da saída do sistema visando alcançar a referência estipulada com os índices de desempenho desejados.

### **3.4 Conclusão parcial**

Neste capítulo foi descrito o circuito esquemático de cada subcircuito da plataforma didática do retificador controlado. Além disso, foi exposto uma abordagem para identificação da dinâmica do sistema e uma metodologia para obter os ganhos do controlador PI a partir da emulação de um controlador contínuo. No próximo capítulo será apresentado a montagem da plataforma didática e os resultados obtidos via simulação e experimentalmente com o protótipo.

## 4 RESULTADOS

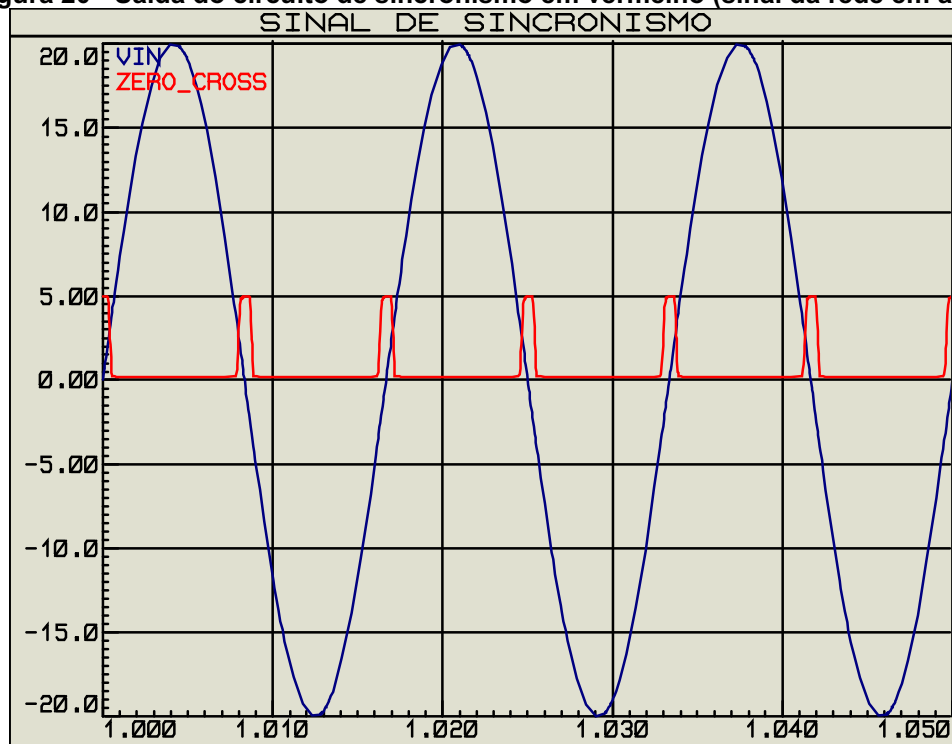
### 4.1 Introdução

Neste capítulo é mostrado os resultados obtidos a partir de simulações e da validação experimental com a plataforma didática montada. Será avaliado o circuito de sincronismo, os sinais de disparo dos tiristores e a malha de realimentação. É importante lembrar que para este trabalho será considerado apenas a parcela da carga resistiva.

### 4.2 Resultados simulados

Considerando o circuito apresentado na Seção **Projeto da plataforma didática**, o primeiro sinal a ser apresentado é a saída do circuito de sincronismo proveniente do fototransistor 4N25. Note que a cada passagem por zero do sinal da rede gera-se um pulso de 5 V que é lido pelo microcontrolador, vide Figura 20.

Figura 20 - Saída do circuito de sincronismo em vermelho (sinal da rede em azul).

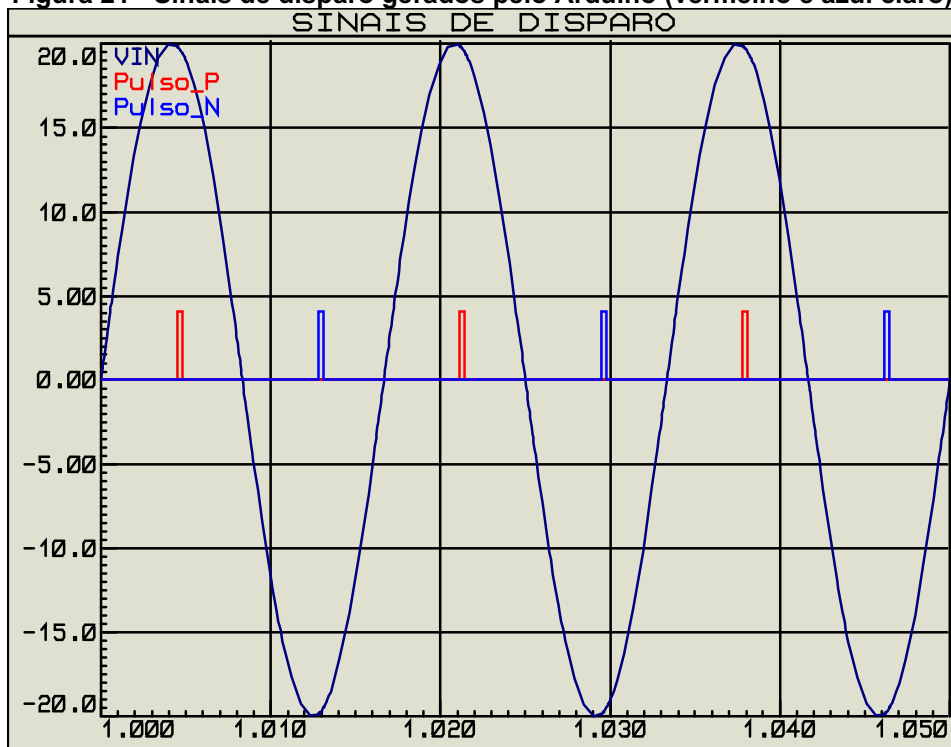


Fonte: Autoria própria (2022).

Os sinais de disparo dos tiristores são gerados pelo microcontrolador e acoplados opticamente por meio do MOC3021. A Figura 21 apresenta os sinais de

disparo para cada semiciclo. Em vermelho corresponde ao sinal de disparo para o semiciclo positivo e em azul o sinal de disparo para o semiciclo negativo.

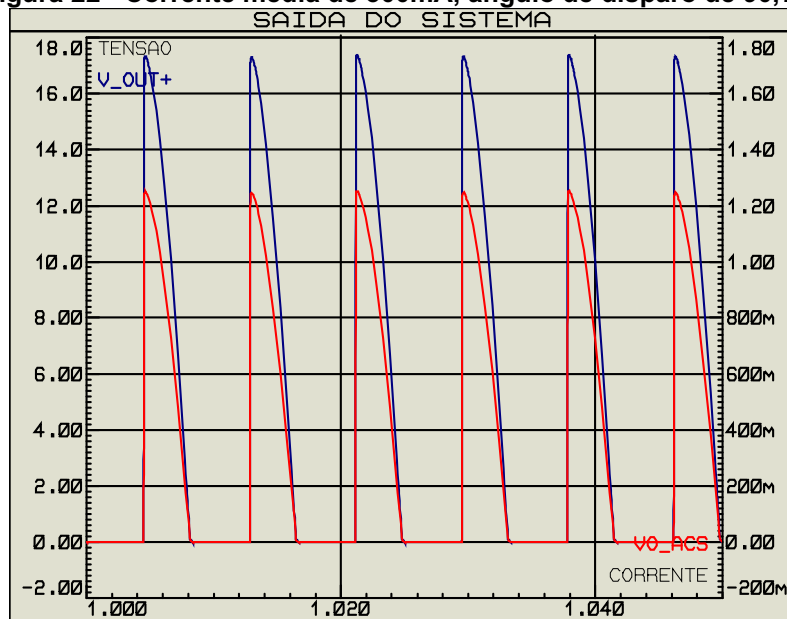
**Figura 21 - Sinais de disparo gerados pelo Arduino (vermelho e azul claro).**



Fonte: Autoria própria (2022).

Nas Figuras 22 a 24 apresentam-se diferentes valores de corrente média na carga correspondente a distintos intervalos de tempo no disparo dos tiristores da ponte retificadora.

**Figura 22 - Corrente média de 300mA, ângulo de disparo de 90,72°.**



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 23 - Corrente média de 500mA, ângulo de disparo de 43,2°.

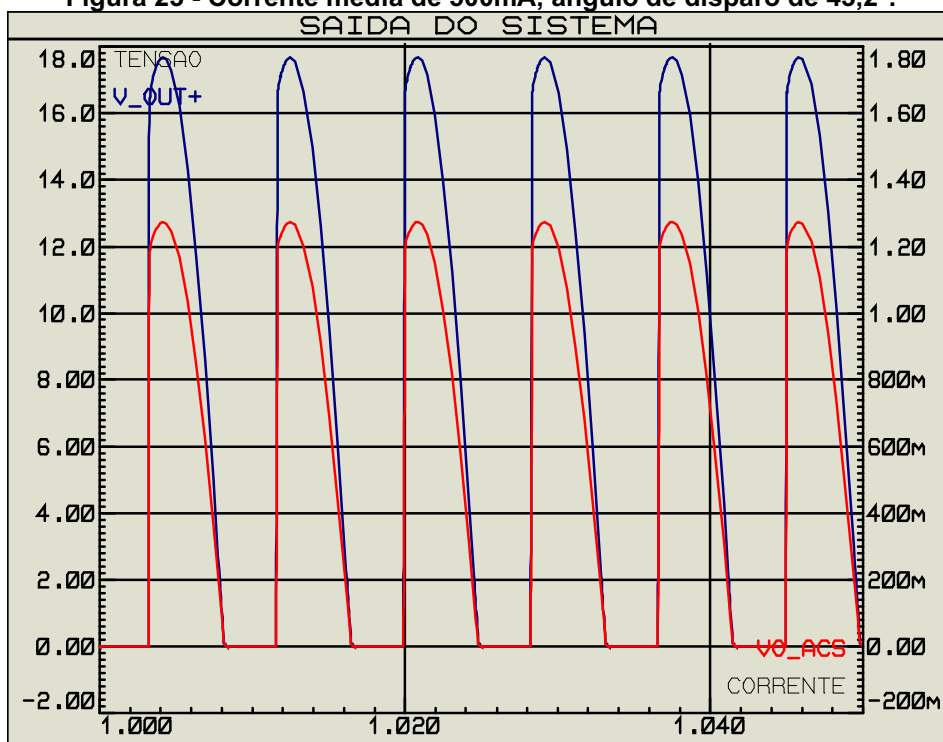
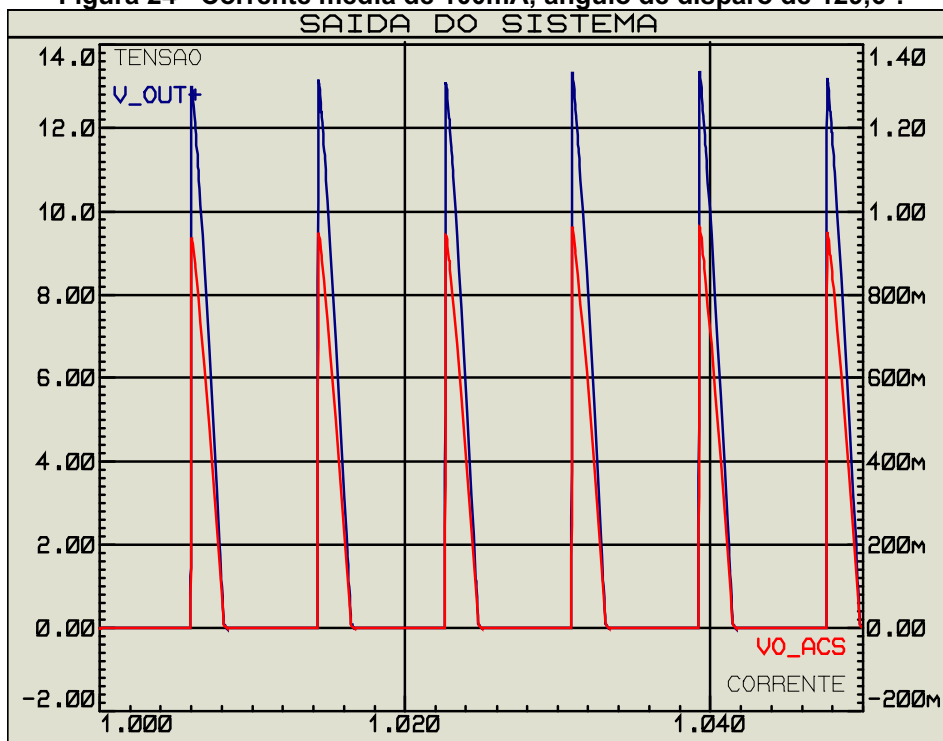


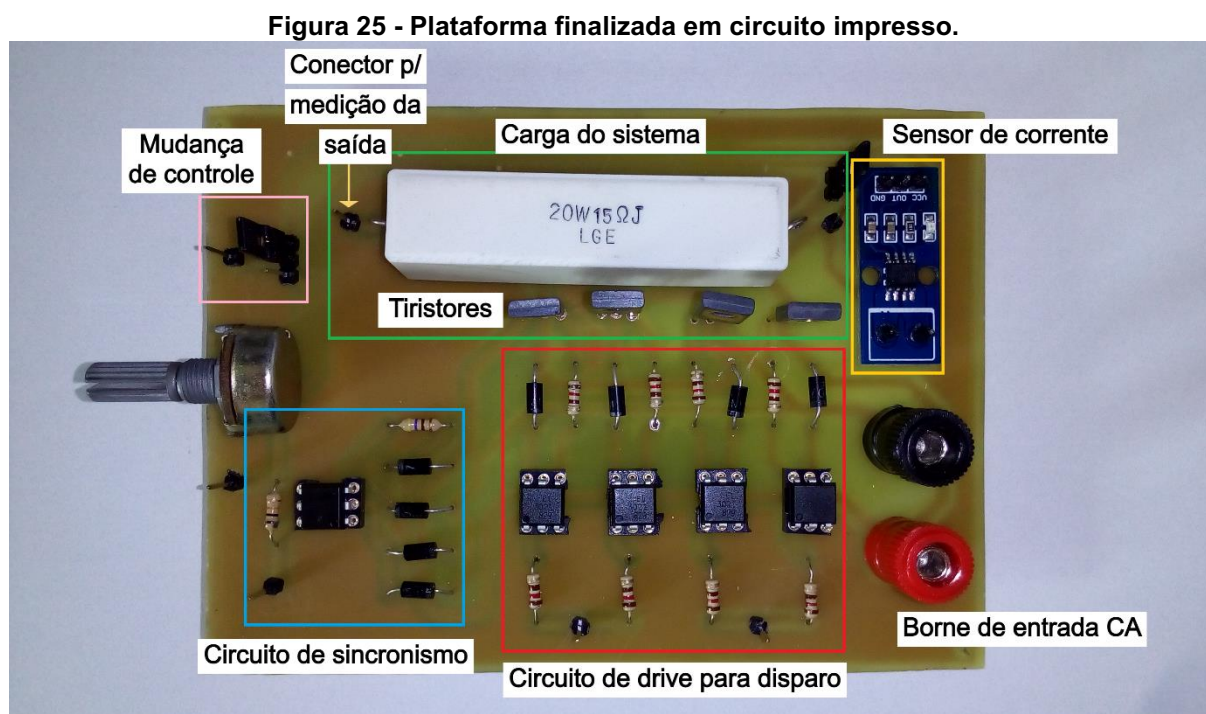
Figura 24 - Corrente média de 100mA, ângulo de disparo de 129,6°.



### 4.3 Resultados práticos

#### 4.3.1 Plataforma implementada

Na Figura 25 é mostrada a plataforma finalizada feita a partir do *layout* apresentado na seção *Layout* da .



Fonte: Autoria própria (2022).

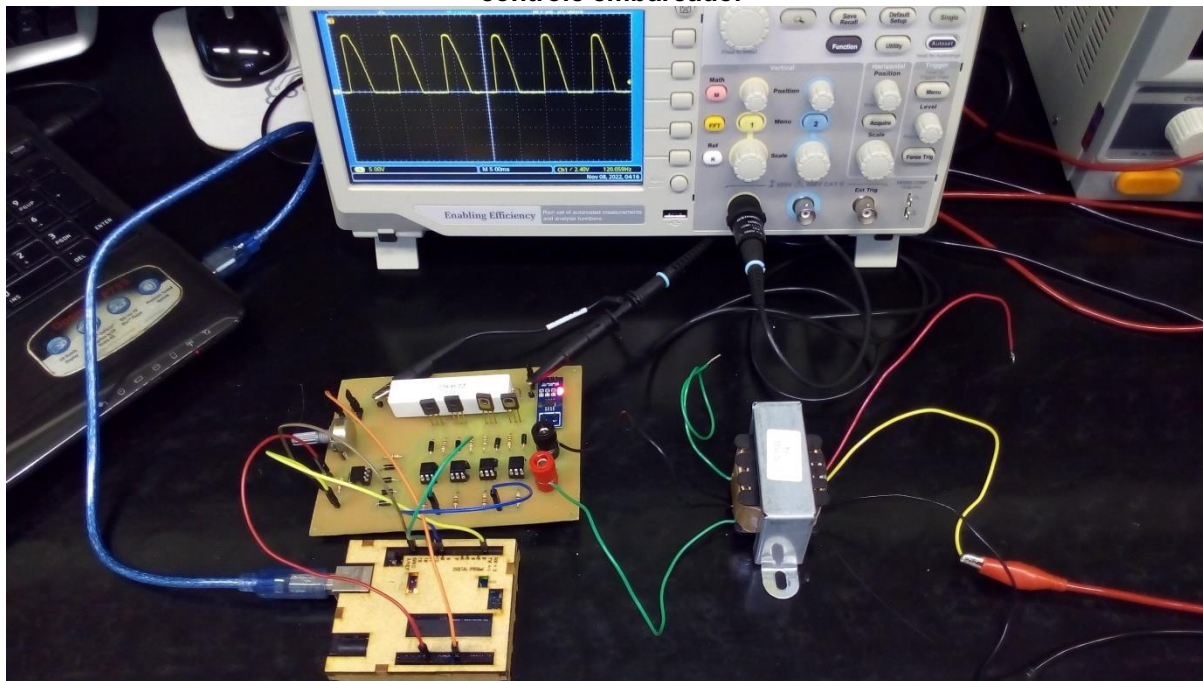
No destaque em amarelo está o sensor de corrente utilizado, o ACS712-05B. Em vermelho consta o *driver* com isolação óptica por meio do MOC3021 para disparo dos tiristores. Em azul está o circuito de sincronismo e detecção de passagem por zero. Foi implementado um *jumper* (destaque rosa) para escolha de controle de malha fechada ou malha aberta. Por fim, a carga utilizada e os tiristores escolhidos se encontram no destaque verde.

O potenciômetro implementado tem a função de realizar o controle em malha aberta, assim, é possível avaliar a mudança do ângulo alpha através do ajuste do potenciômetro. Para isso, é necessário utilizar o código do apêndice A.

Com a plataforma é possível verificar os sinais de saída por meio de conectores equipados, seja de tensão ou corrente. A fonte de alimentação pode ser um transformador abaixador 127 / 12 V ou um regulador de tensão Variac.

A Figura 26 apresenta a configuração experimental de ensaios com a plataforma didática, o código de controle embarcado no microcontrolador, conexão de fonte de alimentação e osciloscópio para a aquisição dos sinais de interesse.

**Figura 26 - Conexão entre a plataforma didática e o microcontrolador contendo o código de controle embarcado.**



Fonte: Autoria própria (2022).

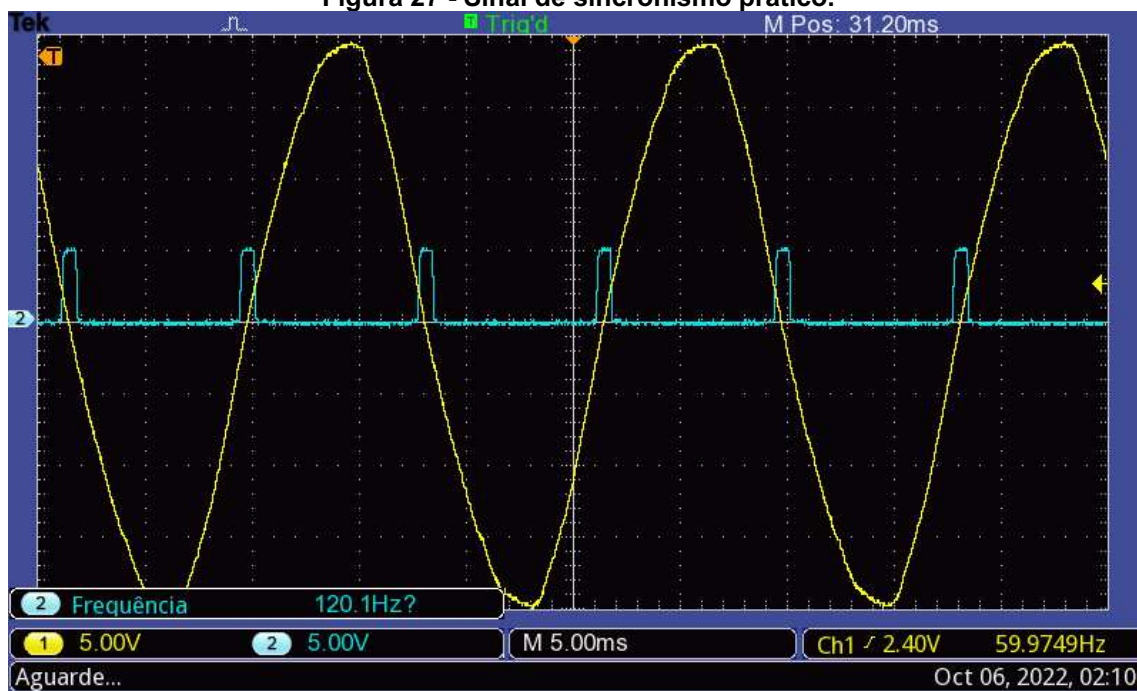
#### 4.3.2 Resultados experimentais

Os resultados a seguir foram obtidos através de um osciloscópio digital modelo TBS1052B da marca Tektronix.

O sinal de sincronismo obtido é apresentado na Figura 27. Nota-se uma boa resposta proveniente do fototransistor 4N25 e está de acordo com o resultado simulado.



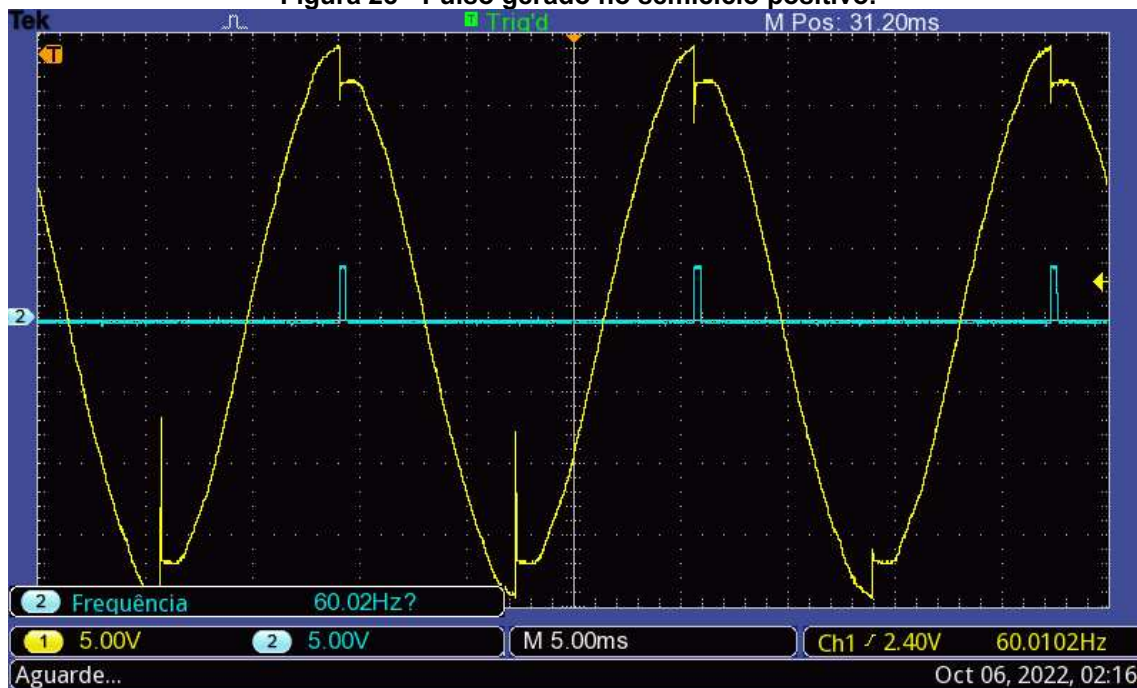
Figura 27 - Sinal de sincronismo prático.



Fonte: Autoria própria (2022).

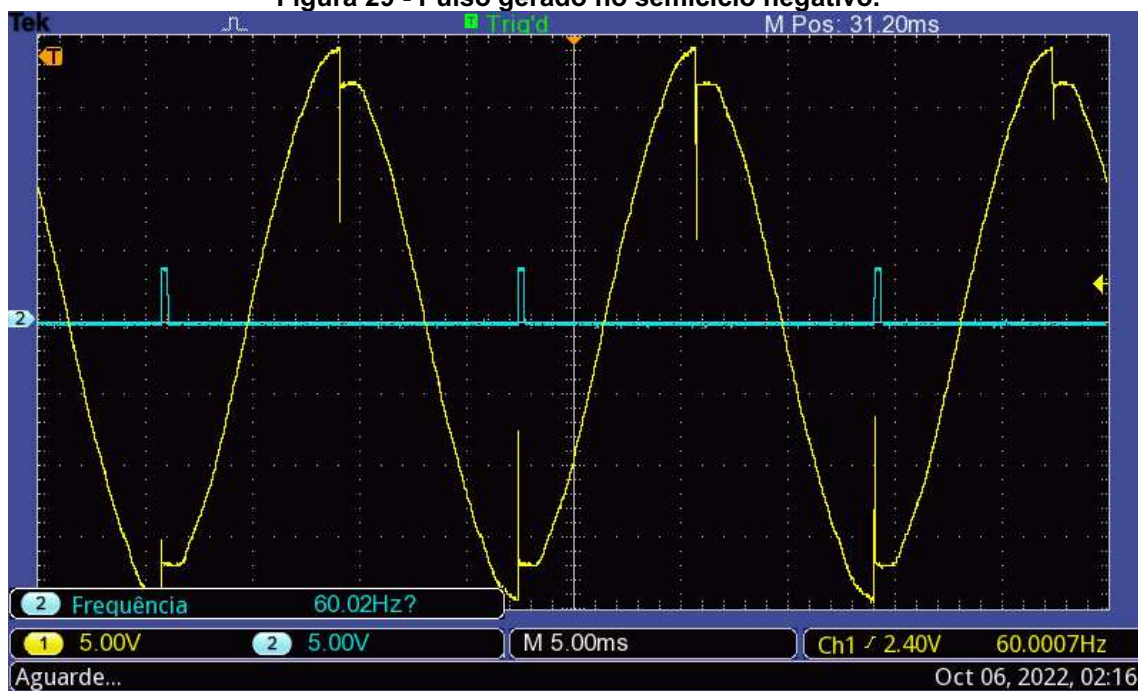
A seguir nas Figura 28 e Figura 29 os pulsos gerados pelo Arduino operando em malha fechada para realizar os disparos dos tiristores com ângulo de  $90^\circ$ . Em amarelo a entrada CA e em azul os pulsos provindos do Arduino.

Figura 28 - Pulso gerado no semiciclo positivo.



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 29 - Pulso gerado no semiciclo negativo.

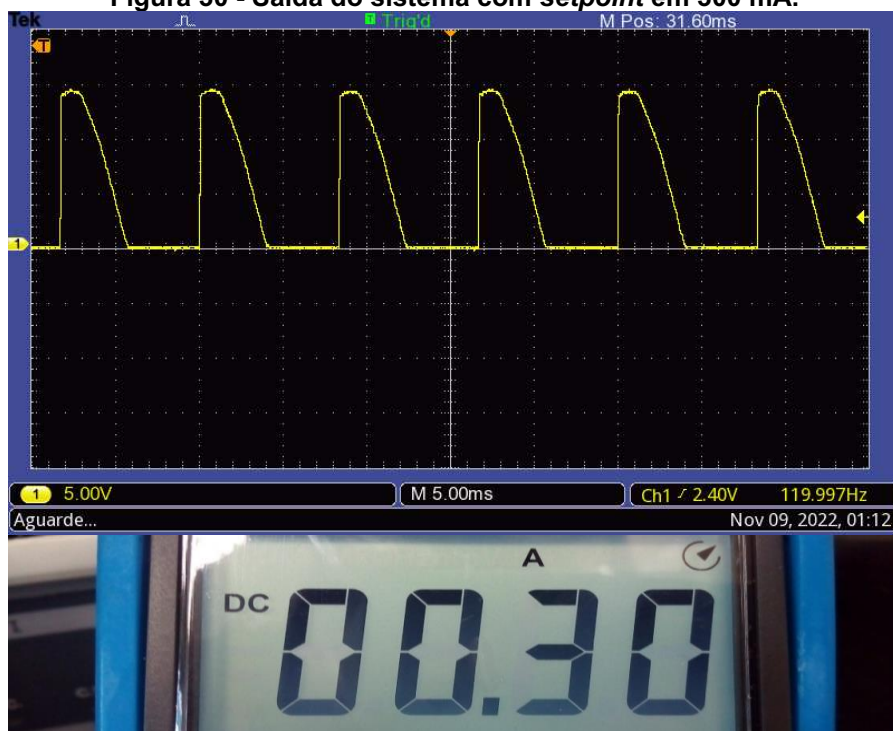


Fonte: Autoria própria (2022).

Nota-se uma queda na tensão no instante em que ocorre o disparo dos tiristores, isso ocorre devido ao fato de haver uma queda de tensão na chave utilizada e no momento do disparo ocorre uma queda de tensão na entrada da rede.

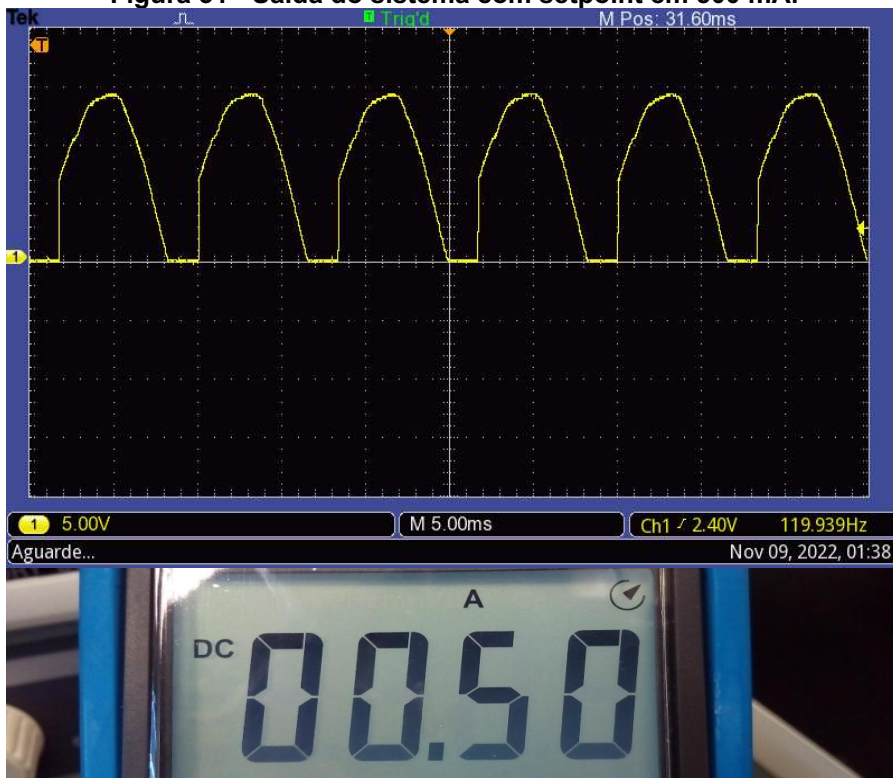
Nas Figura 30, Figura 31 e Figura 32 são apresentados os resultados para o controle em malha fechada para os setpoint de 300 mA, 500 mA e 100 mA, respectivamente.

Figura 30 - Saída do sistema com *setpoint* em 300 mA.



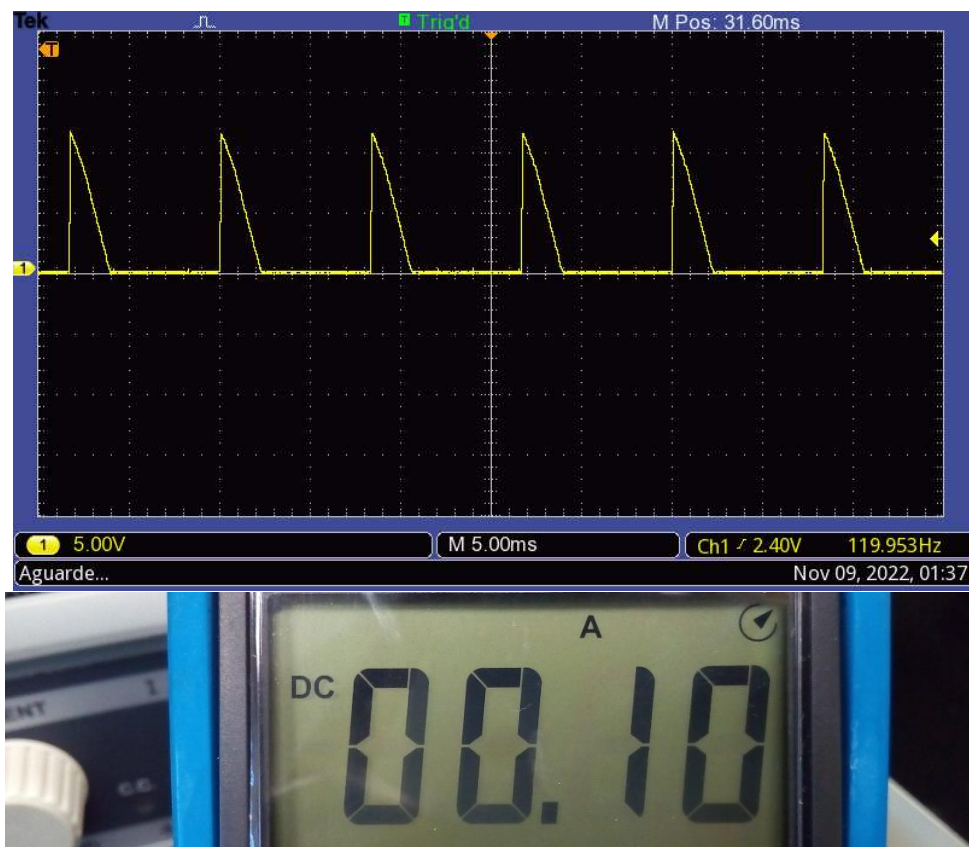
Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 31 - Saída do sistema com *setpoint* em 500 mA.



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 32 - Saída do sistema com *setpoint* em 100 mA.



Fonte: Autoria própria (2022).

#### 4.4 Análise comparativa dos resultados

Os resultados práticos apresentados se mantiveram próximos ao esperado. Tanto os sinais de sincronismo e disparo correspondem aos resultados obtidos por simulação.

Quanto à saída do sistema, foi necessário realizar um ajuste na sensibilidade do sensor de corrente para o *setpoint* de 100 mA, pois, foi observado experimentalmente que ocorre um erro à medida que é requerido uma menor corrente média de saída. O erro gerado pode ser atribuído ao fato de o sensor de corrente não possuir uma sensibilidade adequada para valores baixos de corrente, pois, à medida que se ajusta o *setpoint* para uma menor corrente, o erro tende a aumentar.

Em suma, o sistema teve uma boa resposta com o projeto proposto para o *setpoint* desejado de 300 mA. Para os demais pontos desejados é necessário realizar uma regulagem no ganho do compensador para que atinja a estabilidade.

#### **4.5 Conclusão parcial**

Neste capítulo foram apresentados os resultados de simulação e experimentais referentes ao circuito implementado para a plataforma didática. Foi realizada a comparação entre os resultados e mostrado quais as diferenças existentes na saída do sistema. Os resultados se mostraram satisfatórios e o objetivo principal de implementar o protótipo da plataforma foi concluído.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como resultado deste trabalho, é feita uma importante contribuição para o campus Apucarana-PR de uma plataforma de estudo contendo um retificador tiristorizado em malha fechada. Vale ressaltar que será de grande importância para a compreensão dos discentes, visto que não há tal plataforma disponível no campus Apucarana-PR.

O assunto acerca de controle em retificadores tiristorizados ainda é relevante devido as aplicações industriais e instituições de ensino que buscam o tema para ser discutido em trabalhos acadêmicos como os que foram apresentados no início deste trabalho.

Em termos de aprendizado, foi possível um melhor entendimento quanto ao funcionamento dos tiristores, da topologia de retificador controlado com carga resistiva e da composição do projeto em malha fechada.

O objetivo principal de implementar a plataforma didática foi concretizado e obtiveram-se resultados satisfatórios tanto no protótipo implementado quanto na parte de controle do sistema.

Em vista da complexidade e do tempo de execução da prototipagem eletrônica e testes práticos, não foi possível implementar o caso de carga resistiva-indutiva. Logo, propõe-se a validação do algoritmo de controle sob carga R-L como uma proposta de trabalho futuro para o sistema eletrônico construído neste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ALLEGRO. **Datasheet: ACS712**. 2012. Disponível em: [https://eecs.oregonstate.edu/education/inventory\\_datasheets/P1425015357-1425016965.pdf](https://eecs.oregonstate.edu/education/inventory_datasheets/P1425015357-1425016965.pdf). Acesso em: 10 out. 2022.
- ARDUINO. **Product reference manual**. 2021. Disponível em: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf>. Acesso em: 10 out. 2022.
- BARBI, I. **Eletrônica de potência**. 6. ed. Florianópolis: Ed. do Autor, 2006.
- BRITO, M. R. S. *et al.* Plataforma didática de retificadores trifásicos para ensino de eletrônica de potência. Uberlândia, p. 1-6, out. 2010.
- DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Sistemas de controle modernos**. 13. ed. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2018.
- HART, D. W. **Eletrônica de potência: análise e projetos de circuitos**. São Paulo: Grupo A, 2012.
- OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall.
- RASHID, M. H. **Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações**. São Paulo: Makron Books, 1999.
- RASHID, M. H. **Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações**. 4. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014.
- SANTOS, M. H. P. **Controle ativo da corrente entre pontes retificadoras a tiristor conectadas em paralelo aplicadas na excitação de geradores**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Florianópolis, Florianópolis, 2007.
- VICENTE, E. M. **Projeto e implementação do controle de uma ponte retificadora tiristorizada utilizando um Psoc**. 2009. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2009.

## **APÊNDICE A - Código para operação em malha aberta**



```
#define scr_trigP 9
#define scr_trigN 10
#define pot A0

int ZC = 0, initial = 0, count = 0;
volatile int alpha=0;

void setup(void) {

  pinMode(scr_trigP, OUTPUT);
  digitalWrite(scr_trigP, LOW);

  pinMode(scr_trigN, OUTPUT);
  digitalWrite(scr_trigN, LOW);

  pinMode(2, INPUT_PULLUP);

  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), ZCP_detect, RISING);

}

void ZCP_detect() {
  ZC = 1;
}

void loop() {

  if (count == 0 && ZC == 1) {
    delayMicroseconds(alpha);
    digitalWrite(scr_trigP, HIGH);
    delayMicroseconds(500);
    digitalWrite(scr_trigP, LOW);
    ZC = 0;
    alpha = analogRead(pot) * 10;
    if (alpha > 7666) {
      alpha = 7666;
    }
    if (alpha < 600) {
      alpha = 600;
    }
    count += 1;
  }

  if (count == 1 && ZC == 1) {
    delayMicroseconds(alpha);
    digitalWrite(scr_trigN, HIGH);
    delayMicroseconds(500);
    digitalWrite(scr_trigN, LOW);
    ZC = 0;
  }
}
```

```
alpha = analogRead(pot) * 10;
if (alpha > 7666) {
  alpha = 7666;
}
if (alpha < 600) {
  alpha = 600;
}
count -= 1;
}
}
```

## **APÊNDICE B - Código para operação malha fechada**

```

#include <TimerOne.h>
#include <Math.h>

#define scr_trigP  9
#define scr_trigN  10

int ZC = 0, initial = 0, zero = 0, zero1 = 0, count = 0;
volatile int count1 = 0, ZC1 = 0;
float alpha = 0, sensibilidade = 0.185, corrente = 0;

double Kp = 3.20, //ganho proporcional
       Ki = 0.01, //ganho integral
       P = 0.00, //parcela proporcional
       I = 0.00, //parcela integral
       Pi = 0.00, // recebe a soma P + I
       setPoint = 0.3, //corrente média desejada;
       erro = 0 , //recebe o erro para cálculo do controle;
       erroant = 0; //erro anterior

void setup(void) {
  Serial.begin(9600);
  cal_zero(); //função para calibrar o sensor de corrente e retirar o offset

  pinMode(scr_trigP, OUTPUT); // define pino 9 como saída
  digitalWrite(scr_trigP, LOW);

  pinMode(scr_trigN, OUTPUT); // define pino 10 como saída
  digitalWrite(scr_trigN, LOW);

  pinMode(2, INPUT_PULLUP);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), ZC_detect, RISING); // habilita interrupção
  externa pino 2
}

void ZC_detect() {

  ZC = 1;
  ZC1 = 1;

  erro = setPoint - corrente;

  P = erro * Kp;

  I = I + erro * Ki + erroant * Ki;

  erroant = erro;

```

```

Pi = P + I;

if (Pi >= 5) {
  Pi = 5;
}
if (Pi <= 0) {
  Pi = 0;
}

alpha = ( (acos((2.00 * Pi - 5.00) / 5.00) * 180.00 / PI) * 0.01666666) / 360.00 *
1000.00; // calcula o angulo alpha

if (alpha > 7.333) {
  alpha = 7.333;
}
if (alpha < 0.70) {
  alpha = 0.70;
}

Timer1.attachInterrupt(callback);
Timer1.initialize(alpha * 1000);

}

void callback()
{
  if (count == 0 && ZC == 1) {
    digitalWrite(scr_trigP, HIGH);
    delayMicroseconds(300);
    digitalWrite(scr_trigP, LOW);
    ZC = 0;
    count += 1;
    TCCR1B &= ~(1 << CS10);
  }

  if (count == 1 && ZC == 1) {
    digitalWrite(scr_trigN, HIGH);
    delayMicroseconds(300);
    digitalWrite(scr_trigN, LOW);
    ZC = 0;
    count -= 1;
    TCCR1B &= ~(1 << CS10);
  }
}

void loop() {

  if (count1 == 0 && ZC1 == 1) {

```

```
    corrente = calculaCorrente(CorrenteMedia()); //Calcula a corrente
    count1 += 1;
    ZC1 = 0;
}
if (count1 == 1 && ZC1 == 1) {
    corrente = calculaCorrente(CorrenteMedia()); //Calcula a corrente
    count1 -= 1;
    ZC1 = 0;
}

}

int cal_zero() {
    for (int i = 0; i < 50; i++) {
        zero += analogRead(A0);
    }
    zero1 = zero / 50;
    return zero1;
}

float calculaCorrente(int media) {
    return (media - zero1) * (5.0) / (1023.0 * sensibilidade);
}

int CorrenteMedia() {
    long soma = 0, media = 0;
    int amos = 2000;
    for (int i = 0; i < amos; i++) {
        soma += analogRead(A0);
        delayMicroseconds(100);
    }
    media = soma / amos;
    return (int) media;
}
```