



RETIFICADOR TRIFÁSICO DE MEIA ONDA CONTROLADO COM DETECTOR DE ZEROS EM FASE-NEUTRO

Guilherme Moreira¹, Pedro Ivo de Oliveira Tironi¹, Paulo Raimundo Gomes de Lima¹, Carlos Renato Borges dos Santos¹, Lucas Frederico Jardim Meloni¹

¹IFMG – Instituto Federal de Minas Gerais - *campus Formiga*.

Resumo – Este artigo aborda o desenvolvimento e construção de um retificador trifásico de meia onda controlado. Serão abordadas as etapas análise e projeto dos sistemas de potência e controle. Por fim, serão mostrados resultados experimentais que ilustrarão o funcionamento dos sistemas detectores de cruzamento, disparo de tiristores e das formas de onda de tensão de saída.

Palavras-Chave – Retificador Trifásico, Arduino, Controle, Detector de zeros, Eletrônica de Potência.

THREE PHASE HALF CONTROLLED RECTIFIER WITH NEUTRAL PHASE DETECTOR

Abstract - This article discusses the development and construction of a three-phase controlled half-wave rectifier. The analysis and design stages of the power and control systems will be addressed. Finally, experimental results will be shown that will illustrate the functioning of the crossing detector systems, thyristor firing and the output voltage waveforms.

Keywords - Three Phase Rectifier, Arduino, Control, Zero Detector, Power Electronics.

I. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da tecnologia baseia-se na melhoria de processos ou na solução de problemas. Neste mesmo enfoque os circuitos retificadores foram implementados e progredindo ao longo dos anos. Possibilitando o desempenho mais eficaz de sistemas, aparelhos eletrônicos e na transmissão de energia elétrica [1].

Um circuito com características retificadoras é um dispositivo eletro/eletrônico que converte corrente alternada (CA) em corrente contínua (CC) [1]. Fisicamente, os retificadores assumem várias formas, incluindo diodos de tubo de vácuo, válvulas de arco de mercúrio, pilhas de placas de óxido de cobre e selênio, diodos, retificadores controlados por silício e outros comutadores semicondutores [2].

Os sistemas HVDC (do inglês, *High-Voltage Direct Current*) são uma aplicação de circuitos retificadores. Estes

permitem que a energia seja transmitida em corrente contínua, para que posteriormente seja convertida para uma frequência desejada. Como exemplo de aplicação deste sistema, pode-se citar o sistema HVDC de Itaipu, onde a energia transmitida para a região do Paraguai, em 50 Hz, é retificada e enviada para São Roque (SP), local onde é convertida por meio de inversores em CA com frequência de 60 Hz [1].

Tendo em vista a importância da eletrônica de potência e mais especificamente, dos sistemas de retificação controlados nos setores industriais e energéticos, o presente trabalho visa expor a montagem de um protótipo de retificador trifásico, de baixo custo e de forma didática, de modo a promover o ensino da eletrônica de potência.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

A. Arduino

O Arduino, é um dispositivo de fácil prototipagem, criado com o objetivo de auxiliar no ensino e pesquisa nas áreas de eletrônica e de microprocessadores. A partir de uma plataforma de código aberto e com custo acessível, que proporciona aos pesquisadores um desenvolvimento de projetos de forma prática na área da eletrônica [3].

Existem variadas versões de Arduino para as diversas aplicações. Dentro deste grupo destaca-se, o Arduino MEGA 2560, conforme apresenta a Figura 1. Este possui 54 pinos digitais sendo que 15 deles podem ser utilizadas como saídas PWM, 16 entradas analógicas e 6 portas de interrupção, sendo elas 2, 3, 18, 19, 20 e 21 [4]. A variedade de pinos e opções permitem com que projetos em escalas maiores possam ser implementados, como por exemplo de um retificador trifásico.

Figura 1: Arduino MEGA 2560.



Fonte: [4].

Seu uso neste trabalho é necessário devido a exigência de um modelo mais robusto, que detenha um número de pelo menos três portas de interrupção.

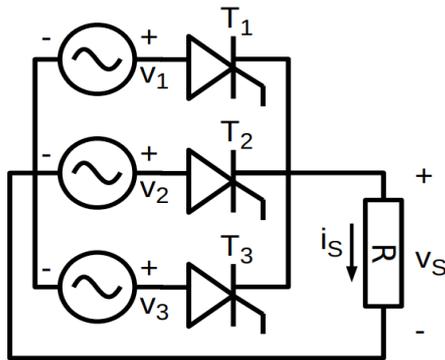
B. Circuitos retificadores

Os retificadores trifásicos são bastante utilizados em aplicações industriais no mundo moderno, seja para carregadores de baterias, para acionamentos de cargas CC como ferros de solda.

Para obter tensões de saídas com valores eficazes ajustáveis, utiliza-se dentre outros dispositivos os tiristores [5]. Estes possuem vantagem com relação aos diodos, pois permitem tensões de saída controladas variando-se os ângulos de disparo, que é feito aplicando-se um pulso de curta duração em seu *gate*.

Os retificadores de fase controlados são relativamente simples e baratos, com eficiência geralmente acima de 95%, e devido ao fato de converterem CA em CC, também são denominados de conversores CA-CC [5]. A Figura 2 expõe um circuito utilizado como retificador trifásico.

Figura 2: Circuito retificador trifásico com carga resistiva conectada a saída.



Fonte: [6].

Um retificador trifásico de meia onda possui um controle da sua tensão (média e eficaz) de saída de acordo com seu ângulo de disparo. A Equação 1 demonstra a tensão média na saída, onde V_m é o valor de pico da onda senoidal de entrada.

$$V_{m\acute{e}dio} = \frac{3}{2\pi} \int_{\pi/6+\alpha}^{5\pi/6+\alpha} V_m \sin \omega t d(\omega t) \quad (1)$$

A Equação 2 e 3 demonstram a tensão eficaz na saída de um retificador de meia onda trifásico, onde a Equação 2 expressa os valores para quando a onda é contínua, ou seja, ângulo menor que $\pi/6$ e Equação 3 para situações que não ocorrem tal fato.

$$V_{rms} = \sqrt{3} V_m \left(\frac{1}{6} + \frac{\sqrt{3}}{8\pi} \cos 2\alpha \right)^{1/2} \quad (2)$$

$$V_{rms} = \sqrt{3} V_m \left[\frac{5}{24} - \frac{\alpha}{4\pi} + \frac{1}{8\pi} \sin \left(\frac{\pi}{3} + 2\alpha \right) \right]^{1/2} \quad (3)$$

III. MATERIAIS E MÉTODOS

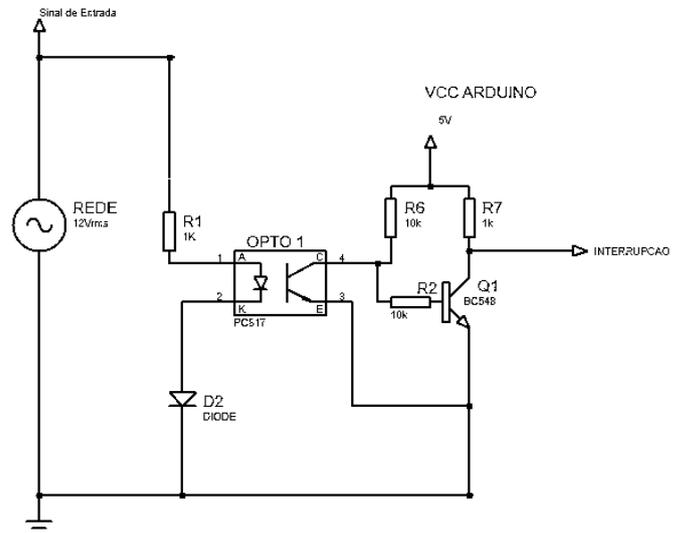
O projeto proposto de retificador trifásico de meia onda controlado pode ser dividido em três partes principais: circuito detector de zero, dispositivo de processamento e circuito de potência.

A. Circuito detector de zero

Para um circuito retificador é necessário identificar o momento adequado para o disparo, e este é feito por um circuito detector de zero, entre a fase e o neutro.

No projeto é elaborado um circuito para realizar a detecção no momento em que a onda senoidal passa do estado de semiciclo negativo para o semiciclo positivo [7]. O circuito detector de zero elaborado, é representado na Figura 3.

Figura 3: Circuito detector de zero Fase-Neutro.



Fonte: Próprio Autor.

Válido ressaltar que a Figura 3 demonstra o circuito necessário para identificação de passagem de zero entre fase e neutro. Como o projeto é trifásico são necessários três circuitos semelhantes ao apresentado na Figura 4, um para cada fase.

Para o isolamento elétrico do sinal CA do DC protegendo o Arduino, utilizou-se o PC 817, que é um circuito integrado opto acoplador. A corrente máxima que este suporta é 50 mA [8] dimensionando-se, portanto, o resistor (1k ohm) conforme uma tensão máxima de entrada de 40 V.

O diodo 1N4007 funciona como retificador, pois o PC 817 não suporta níveis de tensão negativos [8].

No lado DC do optoacoplador utilizou-se um circuito para ativação rápida com transistor [9]. Desenvolvendo-se um circuito com coletor comum, conectando a porta do coletor a porta de interrupção do Arduino.

O funcionamento deste circuito caracteriza-se por, ao receber valores negativos de tensão da rede o diodo 1N4007 bloqueia este sinal. Ao receber valores positivos de tensão irá, baseado no efeito fotoelétrico, emitir um feixe de luz infravermelha, produzido pelo diodo LED, polariza a base do fototransistor (OPTO1), forçando a condução entre base e

emissor. O circuito de ativação rápida (caracterizado pelo transistor) identifica mesmo níveis baixos de corrente na base (ordem de microampères), ativa o transistor que realiza o envio do sinal de tensão para a interrupção.

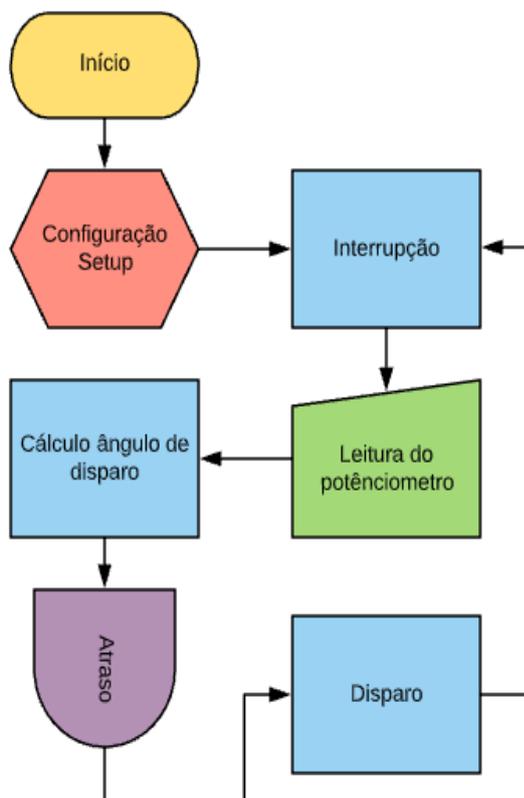
B. Dispositivo de controle e processamento

Para realizar o controle da sincronização de disparo dos tiristores, utilizou-se o Arduino MEGA, que por sua vez, teve suas portas 2, 3 e 21 configuradas como interrupções. Estas portas ao serem conectadas ao detector de zeros, recebem o sinal proveniente do momento certo para disparo. E o microcontrolador realiza a temporização necessária para efetuar o acionamento do tiristor conforme o ângulo de entrada, no tempo previamente configurado.

Para que o circuito trifásico funcione corretamente foi necessário efetuar uma correção na localização do zero detectado de fase-neutro para fase-fase. Isso deve ser feito pelo fato de o período de condução dos tiristores em um retificador trifásico de meia onda ser entre os zeros fase-fase. A correção do zero foi efetuada por meio do código inserido no Arduino, sendo assim acrescido 30° , para que o zero fase-neutro detectado se deslocasse para o zero fase-fase.

A configuração do disparo do dispositivo se dá inicialmente, através da leitura de valores realizada em um potenciômetro. Este possui a finalidade de variar a tensão em seu pino central. O Arduino identifica esta variação por meio de um pino analógico (*analog input*) e a partir dela, modifica o ângulo de acionamento do tiristor. A Figura 4 mostra o esquema do circuito proposto em forma de fluxograma.

Figura 4: Fluxograma da lógica de programação.

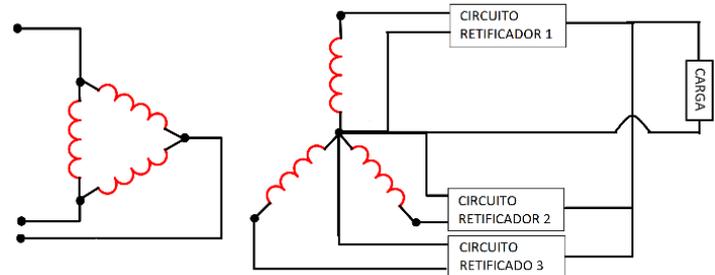


Fonte: Próprio Autor.

C. Circuito de Potência

Para o funcionamento do circuito foram utilizados bancos de transformadores monofásicos. O lado do primário referente a rede foi conectado em delta, e o segundo foi feita uma disposição de modo que os transformadores estivessem em estrela, conforme expõe a Figura 5.

Figura 5: Disposição do banco de transformadores.



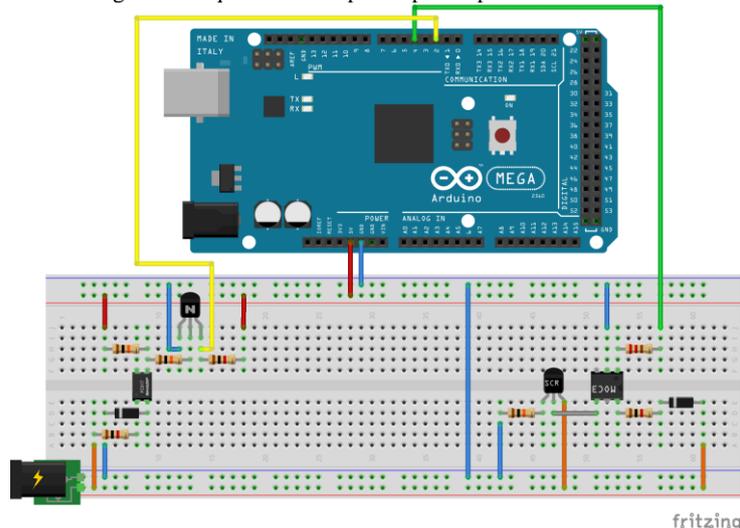
Fonte: Próprio Autor.

A carga no exemplo a seguir será conectada no lado de baixa para fins didáticos. Porém, a carga também pode ser conectada no lado de alta, isto obedecendo a defasagem dos transformadores. A relação de transformação dos transformadores utilizados foram de $220/12 V_{RMS}$.

O circuito retificador é composto por um optoacoplador MOC 3023, que tem como finalidade isolar a parte de potência do Arduino. Que envia um sinal para o *gate* de BT 151 [7], que permite deste modo, a condução da onda de entrada para a carga conectada aos seus terminais [10].

A Figura 6 apresenta a montagem dos circuitos de detecção de zero, do dispositivo de controle e o de potência, apenas para uma das fases do retificador trifásico. montado em protoboard no *software* livre fritzing.

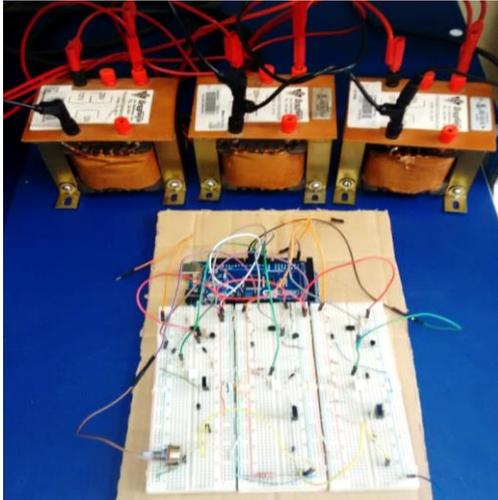
Figura 7: Esquemático do protótipo em protoboard.



Fonte: Próprio Autor.

A montagem total do circuito se dá pela união dos três circuitos, sendo cada um destinado para cada fase, e utiliza-se apenas um microcontrolador [11]. Tal fato pode ser observado na Figura 8, que apresenta o circuito trifásico completo, realizado em bancada.

Figura 8: Montagem do protótipo completo em protoboard.

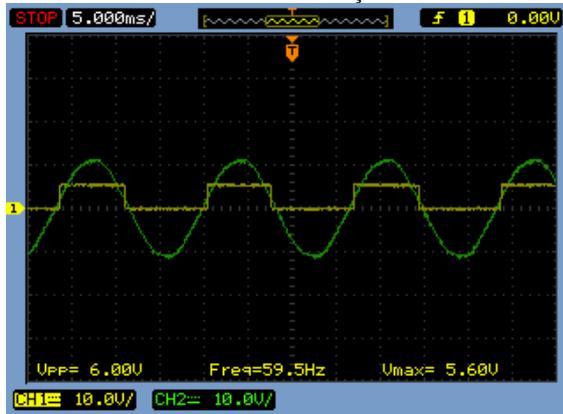


Fonte: Próprio Autor.

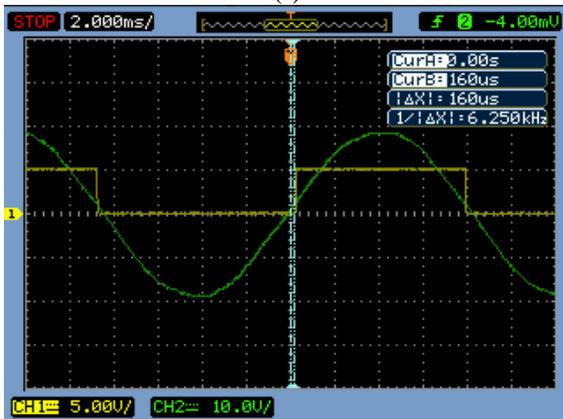
IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após finalizado o código do microcontrolador Arduino foram efetuados os testes em bancada a fim de aferir o funcionamento dos circuitos propostos. Deste modo, foi testado inicialmente o circuito monofásico para o teste de validação do código para detecção de zeros. A Figura 9 demonstra o resultado obtido da detecção de zero.

Figura 9: (a) Resultado da detecção de zeros fase-neutro, (b) tempo de atraso na detecção.



(a)



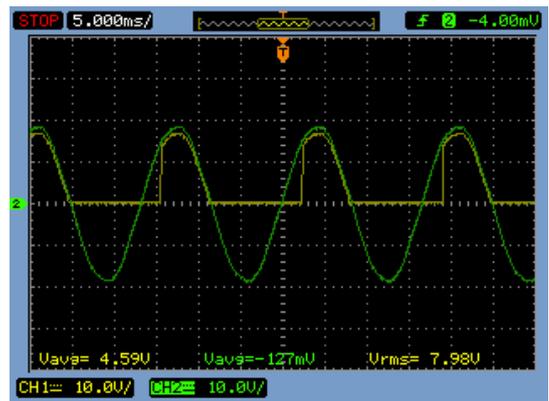
(b)

Fonte: Próprio Autor.

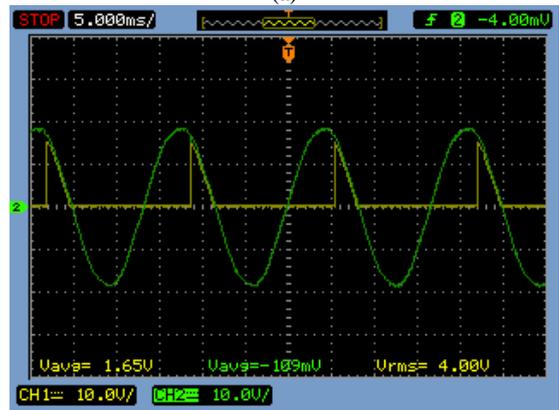
Observa-se na Figura 9 que a localização do zero entre fase e neutro efetuada. É obtido com um tempo de atraso de 160 microssegundos na detecção do zero (diferença entre o zero real e o detectado), possibilitando assim efetuar o controle dos disparos nos tiristores.

Em seguida, foi testado o sistema completo por fase, contemplando o circuito detector de zeros, controlador e o circuito de potência, com uma carga resistiva na saída do retificador. Variando o ângulo de disparo pode-se verificar o controle de tensão na carga para uma detecção monofásica, conforme demonstrado na Figura 10.

Figura 10: (a) Tensão de entrada e saída com ângulo de disparo de 40° (b) Tensão de entrada e saída com ângulo de disparo de 110°.



(a)



(b)

Fonte: Próprio Autor.

Conforme observado na Figura 10 ao analisar a onda em amarelo, o valor da tensão eficaz (rms) e a tensão média na saída do retificador é variado de acordo com o respectivo ângulo de disparo.

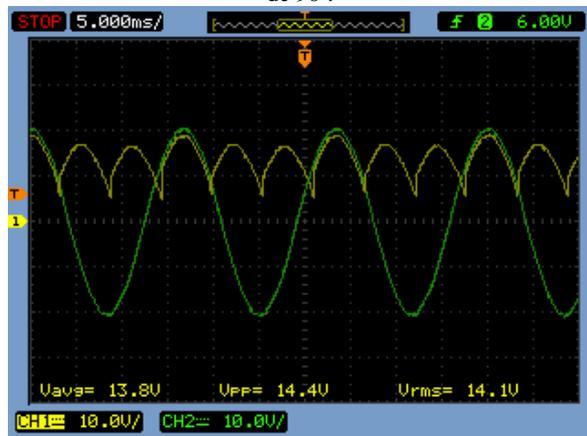
Em posse desses resultados, o próximo teste foi a validação da união de três destes circuitos monofásicos, resultando em um retificador trifásico controlado.

Para alcançar tal objetivo foi necessário a correção da localização do zero de fase-neutro para fase-fase. Em seguida, foi realizado o teste trifásico, sendo obtida as curvas de saída. A Figura 11 demonstra tal resultado.

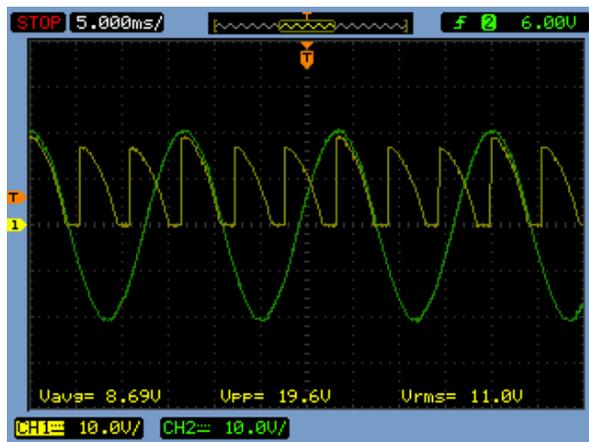
Analisando as curvas na Figura 11 é possível observar que a tensão média e eficaz entregue para a carga é maior, Figura 11 (a), fato esse que decorre pelo motivo de ser uma retificação trifásica. Analogamente ao teste monofásico, foi obtido e validado o controle da tensão terminal de saída por

meio do ângulo de disparo, conforme verificado na Figura 11 (b).

Figura 11: (a) Sinal de tensão de saída sem ângulo de disparo, e o sinal de uma das fases (b) Tensão de saída com ângulo de disparo de 90°.



(a)



(b)

Fonte: Próprio Autor.

Para critérios de comparação a Tabela 1, demonstra após uma série de testes efetuados a precisão do circuito para diferentes ângulos. A partir das Equações 1, 2 e 3 apresentadas anteriormente. E pelo valor de tensão eficaz da relação de transformação do transformador utilizado.

Tabela 1: Comparação entre resultados teóricos e práticos.

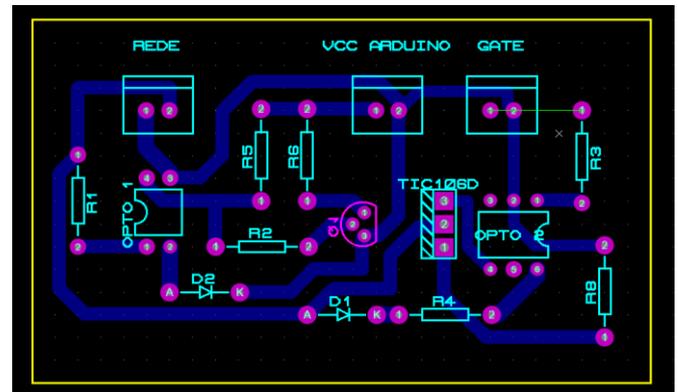
Ângulo de disparo	V_{AVG} (Teórico)	V_{AVG} (Prático)	Erro (%)
0	14,03	13,80	1,64
30	12,15	11,95	1,73
60	8,10	7,94	1,98
90	4,05	3,93	2,96

Fonte: Próprio do Autor.

Com os resultados obtidos em escala de prototipagem, desenvolveu-se o layout de uma placa PCB para aplicações em valores de tensão mais altos. Salientando-se que o circuito pode trabalhar com valores de 500 V e 7,5 A no lado de alta tensão, conforme a datasheet dos dispositivos. O circuito no lado de baixa necessita que a tensão seja reduzida a pelo

menos 35 V para o funcionamento ideal dos dispositivos sem danos a sua integridade física. O projeto da placa PCB pode ser visualizado na Figura 12.

Figura 12: Layout da placa PCB por fase.



Fonte: Próprio Autor.

V. CONCLUSÕES

O circuito possui limitação prática sobre o detector de zero onde este é feito com determinado atraso na onda. E também possui um ângulo de disparo inicial em 30,5° até 115° para que exista uma faixa de servidão para que não ocorra disparos que causem curto e provoquem danos aos dispositivos.

Logo, sobre estas condições o circuito possui funcionamento correto, com tempo de resposta ao ajuste do ângulo de disparo a cada ciclo.

As cargas não lineares, como retificadores, produzem harmônicos de corrente no lado CA e harmônicos de tensão no lado DC, devido ao comportamento de comutação. Porém, com o desenvolvimento da tecnologia é necessário cada vez mais o domínio deste tipo de circuito na formação de Engenheiros Eletricistas.

REFERÊNCIAS

- [1] Universidade Estadual de Campinas (2014). ELETRÔNICA de Potência. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdffiles/eltpo t/cap3.pdf>>. Acesso em: 24 nov. 2019.
- [2] HYDRO, Manitoba. Bipole lines: HVDC. Disponível em: <https://www.hydro.mb.ca/corporate/facilities/bipole_lines/>. Acesso em: 07 dez. 2019.
- [3] I. S. Ribeiro, M. S. Souza, G. M. Novaes, T. B. Nazaré. A plataforma Arduino: Princípios de funcionamento e demonstração prática com um controlador de ventiladores. In *ConBRepro*, vol. 7. 2017.
- [4] F. Souza. Arduino Mega 2560. 2014. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/arduino-mega-2560/>>. Acesso em: 07 dez. 2019.
- [5] M. H. Rashid, *Eletrônica de potência: Dispositivos, circuitos e aplicações*, Pearson Education, 4ª Edição, São Paulo, 2014.
- [6] Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (2013). *Eletrônica de Potência*. Acedido em 22 de Novembro de 2019, em: https://automafull.files.wordpress.com/2013/08/eo_potencia_2_retificadores.pdf.

- [7] TEXAS INSTRUMENTS. Thyristor. BT 141 datasheet, Nov. 2007.
- [8] TEXAS INSTRUMENTS. PC 817X Séries. PC 817 datasheet, Dez. 2015.
- [9] C. R. B. Santos, M. H. Vieira. *Conversor CA-CA de baixo custo utilizando Arduíno e optoacopladores para a detecção de zero*. 2017. Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica.
- [10] TEXAS INSTRUMENTS. MOC 302X Séries. MOC 3023 datasheet, Jun. 2011.
- [11] TEXAS INSTRUMENTS. BC546B, BC547A, B, C, BC548B, C Amplifier Transistors. Transistor Datasheet, Abr. 2017.