



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CAMPUS CARAÚBAS
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

JOSÉ AILTON DE OLIVEIRA JÚNIOR

**DESENVOLVIMENTO DE UM CIRCUITO DE ACIONAMENTO PARA
RETIFICADORES A TIRISTORES**

CARAÚBAS-RN

2021

JOSÉ AILTON DE OLIVEIRA JÚNIOR

**DESENVOLVIMENTO DE UM CIRCUITO DE ACIONAMENTO PARA
RETIFICADORES A TIRISTORES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal Rural do Semi-Árido –
UFERSA, Campus Caraúbas, para a obtenção
do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Profº. Me. Antônio Alisson
Alencar Freitas – UFERSA.

CARAÚBAS-RN

2021

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

O48d Oliveira Júnior, José Ailton de.
DESENVOLVIMENTO DE UM CIRCUITO DE ACIONAMENTO
PARA RETIFICADORES A TIRISTORES / José Ailton de
Oliveira Júnior. - 2021.
51 f. : il.

Orientador: Antônio Alisson Alencar Freitas.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Elétrica, 2021.

1. Retificadores. 2. Tiristores. 3. TCA785. 4.
Driver de acionamento. I. Freitas, Antônio Alisson
Alencar, orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

JOSÉ AILTON DE OLIVEIRA JÚNIOR

**DESENVOLVIMENTO DE UM CIRCUITO DE ACIONAMENTO PARA
RETIFICADORES A TIRISTORES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal Rural do Semi-Árido –
UFERSA, Campus Caraúbas, para a obtenção
do título de Engenheiro Eletricista.

APROVADA EM: 26 / 05 / 2021.

BANCA EXAMINADORA

ANTONIO ALISSON
ALENCAR FREITAS:
02228242390

Digitally signed by ANTONIO ALISSON ALENCAR FREITAS:02228242390
DN: cn=ANTONIO ALISSON ALENCAR FREITAS:02228242390,
ou=UFERSA - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, c=BR
Reason: I am the author of this document
Location: your signing location here
Date: 2021.05.28 08:54:27
Foxit Reader Version: 9.5.0

Prof^o. Me. Antônio Alisson Alencar Freitas – UFERSA
Presidente

FRANCISCO DE ASSIS
BRITO FILHO:01037665457

Assinado de forma digital por
FRANCISCO DE ASSIS BRITO
FILHO:01037665457
Dados: 2021.05.28 14:18:09 -03'00'

Prof^o. Dr. Francisco De Assis Brito Filho – UFERSA
Membro Examinador

HUGO MICHEL CÂMARA
DE AZEVEDO MAIA

Assinado de forma digital por HUGO
MICHEL CÂMARA DE AZEVEDO MAIA
Dados: 2021.05.28 16:00:22 -03'00'

Prof^o. Dr. Hugo Michel Camara de Azevedo Maia Filho – UFERSA
Membro Examinador

DEDICATÓRIA

A Deus, que com sua infinita misericórdia, me guia e orienta durante toda trajetória de vida.

A Antônio Alisson Alencar Freitas, meu orientador, por toda paciência e dedicação para transmitir suas experiências práticas e conhecimentos teóricos sendo primordial na construção deste trabalho.

A Edineide Viana da Silva Oliveira, minha mãe, que sempre esteve ao meu lado para qualquer adversidade. Sempre mostrando e guiando na direção certa.

A José Ailton Oliveira, meu pai, que sempre acreditou no meu potencial me auxiliando em todo momento na busca de meus objetivos.

A Bruna Yasnaia de Souza Oliveira, minha namorada, sempre companheira ajudando na composição estrutural deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me dar sabedoria, força e fé para seguir sempre superando as barreiras da vida, também por revelar o caminho certo a ser percorrido para alcançar meus objetivos.

A meus pais, José Ailton Oliveira e Edineide Viana da Silva Oliveira, que em momento algum deixaram de me motivar e fornecer amor. Agradeço eternamente cada objetivo alcançado a vocês que são grandes referências na minha vida.

A minha namorada, companheira e incentivadora nas conquistas de meus objetivos, disponibilizando tempo para melhorar a estruturação deste projeto com suas instruções e sugestões.

As minhas irmãs, Kaline da Silva Oliveira e Karla Emanuelle da Silva, por mostrar que permanecerão sempre ao meu lado independente de qualquer situação, e por contribuírem junto aos meus pais pelo incentivo de cada dia. Mostrando-me o verdadeiro significado de companheirismo e cuidado.

A meus concunhados, Paulo Cesar e Paulo Cezar, que sempre estão me aconselhando e proporcionando melhor entendimento de vida.

Ao professor orientador, Antônio Alisson Alencar Freitas, que contribuiu de forma pacientemente com as informações necessárias para composição deste trabalho, assim como, com sua visualização precisa e crítica para um projeto mais competente com desempenho de qualidade.

Aos amigos próximos que a faculdade proporcionou que batalharam de formas diferentes com o mesmo propósito e foram parceiros durante todo o tempo da UFERSA.

A todos os docentes e discentes que de forma direta ou indireta contribuíram consideravelmente na aprimoração de meus conhecimentos, como também, meu crescimento acadêmico prático e experimental.

“Em todo o espaço há energia... é (só) uma questão de tempo até que os homens tenham êxito em associar seus mecanismos ao aproveitamento desta energia.

Nikola Tesla

RESUMO

O avanço da tecnologia permite o desenvolvimento dos circuitos para as diversas aplicações da eletrônica de potência, gerando um aumento insaciável dos sistemas elétricos de potência que utilizam dispositivos semicondutores. Os circuitos retificadores monofásicos controlados são dispositivos que precisam de um circuito de comando, capaz de realizar o controle no disparo dos tiristores. Esse circuito de comando (driver de acionamento), são ótimas opções quando se trata de disparar precisamente os dispositivos semicondutores. Os drivers, geralmente utilizam optoacopladores como ferramenta de isolamento, separando a parte de comando da parte de potência, evitando problemas de curto-circuito. Neste trabalho, foram estudados os retificadores monofásicos não-controlados, retificadores monofásicos controlados, tiristores do tipo retificador controlado de silício — SCR, drivers de acionamento e circuito integrado TCA785 da Siemens. O principal dispositivo do circuito driver de acionamento é o TCA785, pois trata-se de um dispositivo confiável e preciso no controle de disparo dos tiristores através de um ângulo definido. Diante disso, o circuito de acionamento foi estudado, simulado e construído através de um *software* que é responsável pelos resultados obtidos neste projeto, proporcionando uma criação futuramente física para futuros testes.

Palavras-Chave: Retificadores; Tiristores; Driver; TCA785.

ABSTRACT

The advancement of technology allows the development of circuits for the various applications of power electronics, generating an insatiable increase in electrical power systems using semiconductor devices. Controlled single-phase rectifier circuits are devices that need a control circuit, capable of controlling the triggering of the thyristors. This command circuit (drive driver), are great options when it comes to precisely triggering semiconductor devices. Drivers generally use optocouplers as an isolation tool, separating the control part from the power part, avoiding short circuit problems. In this work, uncontrolled single-phase rectifiers, controlled single-phase rectifiers, silicon-controlled rectifier - SCR thyristors, drive drivers and Siemens TCA785 integrated circuit were studied. The main device of the drive driver circuit is the TCA785, as it is a reliable and precise device for controlling the triggering of the thyristors through a defined angle. Therefore, the drive circuit was studied, simulated and built using *software* that is responsible for the results obtained in this project, providing a future physical creation for future tests.

Keywords: Rectifiers; Thyristors; Drive; TCA785.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ponte retificadora de onda completa. (a) Diagrama do circuito. (b) Representação alternativa. (c) Tensões e correntes.	15
Figura 2 - (a) Retificador de onda completa com filtro capacitivo; (b) tensão na fonte e na saída.	17
Figura 3 - (a) Retificador de onda completa em ponte controlada e (b) saída para uma carga resistiva.....	19
Figura 4 - Exemplo de isolamento acoplada com foto-SCR.....	22
Figura 5 – Circuito Integrado de disparo TCA785.....	22
Figura 6 - Diagrama de pulsos do TCA785 da Siemens.	23
Figura 7 - Topologia do circuito de comando com optoacoplador.	26
Figura 8 – Representação do retificador monofásico em ponte totalmente controlado.	28
Figura 9 - Diagrama de blocos explicativo do driver de acionamento.....	30
Figura 10 - Esquemático da tensão síncrona do TCA785 em software.	31
Figura 11 - Esquemático de todos os pinos do TCA785 em software.	32
Figura 12 - Esquemático do sinal de proteção e inibição da saída do TCA785 em software.	33
Figura 13 - Esquemático da definição da rampa e extensão do pulso do TCA785 em software.	33
Figura 14 - Esquemático do controle de tensão e pulso longo do TCA785 em software.	34
Figura 15 - Esquemático de isolamento do circuito de comando e potência através de optoacopladores em software.	35
Figura 16 - Esquemático do circuito retificador monofásico controlado em software.	35
Figura 17 - Formas de onda colhidas pela simulação do circuito de disparo.....	36
Figura 18 - Formas de onda colhidas pela simulação com os SCRs conduzindo em 0°.....	37
Figura 19 - Formas de onda colhidas pela simulação com os SCRs conduzindo em 45°.....	38
Figura 20 - Formas de onda colhidas pela simulação com os SCRs conduzindo em 90°.....	38
Figura 21 - Formas de onda colhidas pela simulação com filtro capacitivo na saída.	39
Figura 22 - Visão bidimensional do driver na PCB.	40
Figura 23 – Visão em 3D do circuito de comando na PCB.....	41
Figura 24 - Visão em 3D da placa de potência na PCB.	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Funções resumidas de pino a pino do circuito integrado TCA785.....	24
Tabela 2 - Duração dos pulsos definidas por C12.....	27
Tabela 3 - Avaliações máximas absolutas do TCA785 da Siemens.....	27
Tabela 4 - Limites operacionais do TCA785 da Siemens.	28

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. OBJETIVOS	13
1.1.1. Objetivo Geral	13
1.1.2. Objetivo Específico.....	13
2. REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1. RETIFICADORES MONOFÁSICOS NÃO-CONTROLADOS	14
2.1.1. Retificados de onda completa com ponte de diodo	15
2.1.1.1. Com carga resistiva	16
2.1.1.2. Filtro capacitivo na saída.....	17
2.2. RETIFICADORES MONOFÁSICOS CONTROLADOS	18
2.2.1. Retificados de onda completa em ponte	18
2.2.1.1. Com carga resistiva	20
2.3. DRIVERS DE POTÊNCIA	20
2.3.1. Acionamento de porta SCR.....	21
2.3.2. Isolação com optoacopladores.....	21
2.4. CIRCUITO INTEGRADO (TCA 785)	22
3. PROJETO DO CIRCUITO DRIVER DE ACIONAMENTO.....	25
3.1. ESQUEMÁTICO PROPOSTO.....	25
3.1.1. Esquemático de comando	25
3.1.2. Esquemático de Potência	28
3.2. METODOLOGIA	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
4.1. SIMULAÇÃO.....	31
4.2. PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO (PCB).....	39
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS.....	43
5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	43
5.2. TRABALHOS FUTUROS	43
REFERÊNCIAS	44
ANEXO A — DIAGRAMA DE BLOCOS DO TCA785 DA SIEMENS (DATASHEET SIEMENS).....	46
ANEXO B — AVALIAÇÕES MÁXIMAS E CARACTERÍSTICAS DO TCA785 (DATASHEET SIEMENS).....	47
ANEXO C — PRIMEIRA PARTE DOS CÁLCULOS FEITO EM <i>SOFTWARE</i> MATEMÁTICO	48

ANEXO D — SEGUNDA PARTE DOS CÁLCULOS EM SOFTWARE MATEMÁTICO.	49
ANEXO E — OPTOACOPLADOR HCPL3120 (DATASHEET HP)	50
ANEXO F — LISTA DE MATERIAIS DO DRIVER DE ACIONAMENTO.....	51

1. INTRODUÇÃO

O tempo avança a cada instante de nossos dias e quase nunca percebemos as mudanças que estão conectadas com sua passagem. A grande proporção da população faz uso das diversas tecnologias, mas na maioria das vezes, não se dão conta de como é formado e estruturado os dispositivos eletrônicos que os beneficiam. Quando começam analisar detalhadamente cada dispositivo eletrônico, encontram-se encantados pensando até que ponto a sabedoria do homem pode gerar inovações benéficas para sociedade.

Evidentemente que a tecnologia não avançou do dia para noite, ou seja, precisou atravessar vários processos que deram início há muitos anos, onde existia dificuldade na obtenção de informações e conhecimentos se comparado com os dias atuais. Os anos se passaram e novos conhecimentos surgiram através do desenvolvimento tecnológico mostrando ser de grande utilidade para humanidade, na eletrônica de potência não foi diferente.

A Eletrônica de Potência está evoluindo incontestavelmente partindo do século 20 até os dias atuais. Essa evolução se dá por meio de diversas áreas e acredita-se que deu origem à segunda revolução na eletrônica, pois a primeira surgiu através da invenção dos tiristores que ocasionou na fabricação dos Circuitos Integrados — CIs. Desse modo, com progresso de materiais semicondutores adequados para controlar potências na casa de centenas de watts, o encadeamento no processo eletrônico de energia expandiu-se para diferentes equipamentos eletrônicos, formando a chamada Eletrônica de Potência. Com isso, os países industrializados tornaram-se dependentes dessas tecnologias, provando que tamanha demanda tornaria a Eletrônica de Potência fundamental na vida das pessoas (RASHID, 1998).

Quando se fala em engenharia elétrica é importante dar ênfase aos três ramos que fazem parte de sua composição: potência, eletrônica e controle. Basicamente, Eletrônica de Potência tem por finalidade processar e controlar o fluxo da energia elétrica, com a utilização de dispositivos semicondutores de potência operando como chaveadores diodos, tiristores e transistores, realizando controle e conversão da energia elétrica trabalhando em altos níveis de potência. Em resumo, trata-se do processo de conversão de tensão e corrente alternadas para contínua ou vice-versa, onde controla-se parâmetros de tensão, corrente e frequência. Um ótimo exemplo que demonstra essa técnica de conversão de potência é a simples retificação de tensão e corrente da forma alternada para a contínua (AHMED, 2000).

A aplicação de Eletrônica de Potência tem sua maior parte concentrada na área industrial seja: na transmissão de energia a grandes distâncias em corrente contínua, no controle de

temperatura e iluminação, nos sistemas de segurança, em acionamentos elétricos, tração elétrica, fontes ininterruptas de energia e até energia fotovoltaica.

A grande parte dos equipamentos eletrônicos funcionam em corrente contínua, porém a rede elétrica presente em nossas residências fornece energia em corrente alternada. Deste modo, são os circuitos retificadores responsáveis pela conversão de corrente alternada para contínua, possibilitando a alimentação desses aparelhos eletrônicos conforme sua necessidade de funcionamento. São bastante aplicados nos equipamentos eletroeletrônicos industriais, comerciais e nas residências. Sendo assim, os circuitos retificadores apresentam papel relevante no funcionamento dos dispositivos eletrônicos, bem como na vida das pessoas.

Com base no que foi dito anteriormente, com este trabalho tem-se o objetivo de dimensionar, projetar e implementar um driver de acionamento voltado para circuitos retificadores monofásicos utilizando circuito integrado monolítico analógico TCA 785. A estrutura deste trabalho está dividida da seguinte forma: no capítulo dois será estudado os retificadores monofásicos não-controlados, retificadores monofásicos controlados, funcionamento do TCA785 e de drivers; já no capítulo três analisa-se o esquemático proposto e a metodologia usada na formação do circuito driver de acionamento; por fim, no capítulo quatro é possível verificar os resultados e discussões diante da simulação realizada e a placa de circuito PCB.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Desenvolver um driver tiristor baseado no circuito de acionamento dedicado TCA785 da Siemens de forma a contribuir no controle aprimorado de circuitos retificadores.

1.1.2. Objetivo Específico

- Compreender os fenômenos relacionados ao controle de disparos em retificadores;
- Dimensionar os dispositivos necessários para a construção do circuito;
- Definir os componentes na estrutura do circuito;
- Simular o projeto;
- Verificar o funcionamento e o desempenho do circuito;
- Colher os resultados promovidos pela simulação.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, serão apresentados os retificadores monofásicos não-controlados analisados com carga resistiva e filtro capacitivo; os retificadores monofásicos controlados com carga resistiva; características e funcionamento do circuito integrado TCA785 da Siemens e do circuito driver que faz o disparo de tiristores.

A atuação dos conversores depende da sua estrutura funcional ou a forma como é controlado. Um conversor pode funcionar como um retificador ou inversor, dependendo do sentido de transferência da potência média (HART, 2011).

A técnica de retificação se dá pelo processo de conversão de tensão e corrente alternadas para valores contínuos, ou seja, valores puramente constantes. Basicamente, os retificadores são divididos em duas categorias: retificadores não-controlados; que usam somente diodos como elementos de retificação, e retificadores controlados; que utilizam em sua estrutura retificadora o Retificador Controlado de Silício – SCR para chaveamento do circuito. Alguns exemplos de retificadores são: retificador de meia onda (retificador de um-pulso), retificador de onda completa com transformador de derivação central (retificador de dois-pulsos), retificador de onda completa em ponte. Também existem suas variações sendo retificadores monofásicos e trifásicos totalmente controlados ou semicontrolados por tiristores SCR (AHMED, 2000).

Neste trabalho, serão analisados apenas retificadores com alimentação monofásica, pois trata-se de uma estrutura de fácil entendimento, quando se trata de compreender o funcionamento da retificação controlada, uma vez que, são estruturas com composições mais simples e visíveis que os retificadores trifásicos e polifásicos.

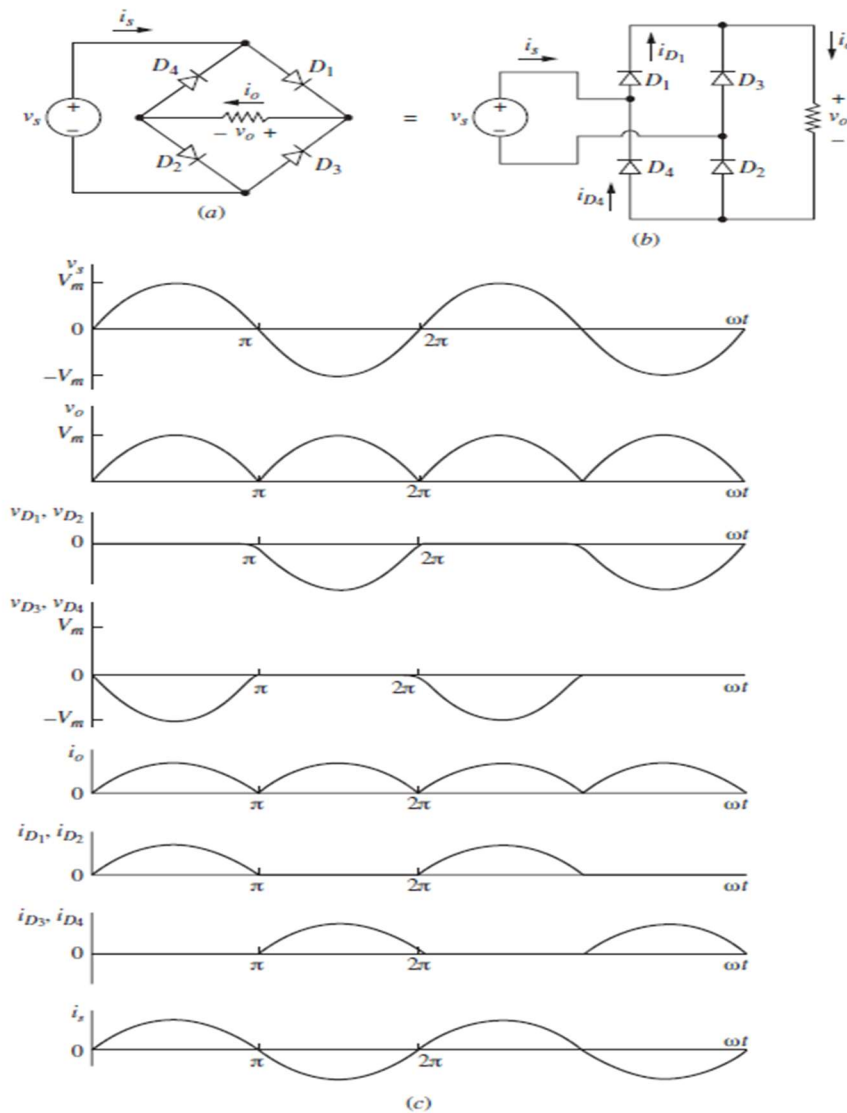
2.1. RETIFICADORES MONOFÁSICOS NÃO-CONTROLADOS

Os retificadores não-controlados utilizam os diodos semicondutores como elemento-chave na sua estrutura retificadora. Esses diodos são bastante usados em circuitos de eletrônica de potência que realizam conversão de energia elétrica. Além disso, possuem diversas aplicações em circuitos relacionados com a engenharia elétrica e eletrônica. É necessário considerar os diodos presentes neste trabalho como “ideais”, uma vez que, a intenção é simplificar seus efeitos para melhorar a apresentação do conteúdo. Dessa forma, deve-se considerar como desprezíveis o tempo de recuperação reversa t_{rr} e queda de tensão direta V_D (RASHID, 1998).

2.1.1. Retificadores de onda completa com ponte de diodo

Um retificador de onda completa tem a finalidade de gerar uma tensão ou corrente que seja puramente contínua ou que possua alguma componente contínua especificada. Esse tipo de retificador apresenta corrente média igual a zero, impossibilitando que problemas relacionados às correntes médias diferentes de zeros nas fontes venham acontecer no circuito. A Figura 1 mostra um circuito básico de um retificador de onda completa com ponte de diodo (HART, 2011).

Figura 1 - Ponte retificadora de onda completa. (a) Diagrama do circuito. (b) Representação alternativa. (c) Tensões e correntes.



Fonte: HART (2011).

Segundo Hart (2011), através da ponte retificadora apresentada anteriormente, deve-se constatar algumas informações básicas relacionadas ao circuito:

- A condução dos diodos D_1 e D_2 acontecem ao mesmo tempo, do mesmo jeito que os diodos D_3 e D_4 . A lei de Kirchhoff das tensões em torno da malha com fonte, comprova que D_1 e D_3 não irão conduzir ao mesmo tempo, assim como, D_2 e D_4 não conduzem.
- A corrente presente na carga só pode ser positiva ou zero, nunca poderá ser negativa.
- O semiciclo positivo na carga quando D_1 e D_2 conduzem é representado por $+V_S$ e no semiciclo negativo que D_3 e D_4 por $-V_S$.
- A máxima tensão de polarização reversa no diodo é igual ao valor de pico da fonte.
- A corrente de entrada na ponte ($I_{D1} - I_{D4}$) produzida pela fonte é simétrica, em relação ao zero. Logo, a corrente média na carga é zero.
- A corrente eficaz na da carga é a mesma corrente presente na fonte, ou seja, mesma intensidade. A corrente na fonte apresenta-se igual à corrente da carga considerando metade do período da fonte, já a negativa na carga é formada pela outra metade.
- A frequência fundamental proporcionada pela tensão de saída do circuito é 2ω , no qual ω é a frequência da tensão alternada de entrada. Desse modo, para cada período de entrada tem-se o equivalente a dois períodos na saída.

2.1.1.1. Com carga resistiva

A tensão na carga resistiva para o retificador mostrado na Figura 1, é representada por:

$$v_0(\omega t) = \begin{cases} V_m \sin \omega t & \text{para } 0 \leq \omega t \leq \pi \\ -V_m \sin \omega t & \text{para } \pi \leq \omega t \leq 2\pi \end{cases} \quad (1)$$

A tensão de saída contínua é a componente média, e a corrente na carga é baseada na lei de Ohm, em que a corrente na carga é a tensão sobre a resistência. Lembrado que V_m representa a tensão de pico.

$$v_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi V_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2V_m}{\pi} \quad (2)$$

$$I_0 = \frac{V_0}{R} = \frac{2V_m}{\pi R} \quad (3)$$

A carga resistiva tem sua potência absorvida denominada por $I_{rms}^2 R$, no qual I_{rms} para forma de onda da corrente no retificador de onda completa é igual a onda senoidal não retificada, ou seja, igual a tensão de entrada. Assim, a corrente é determinada por $I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$. Como a corrente presente na fonte do retificador de onda completa é senoidal e está em fase com a tensão, então o fator de potência do sistema é unitário (HART, 2011).

$$v_0(\omega t) = \begin{cases} |V_m \sin \omega t| & \text{um par de diodos em condução} \\ (V_m \sin \theta) e^{-\frac{\omega t - \theta}{\omega RC}} & \text{para diodos em corte} \end{cases} \quad (4)$$

Em que, θ é o ângulo que os diodos polarizam reversamente.

$$\theta = tg^{-1}(-\omega RC) = -tg^{-1}(\omega RC) + \pi \quad (5)$$

A ondulação é a diferença entre as tensões máximas e mínimas do circuito retificador.

$$\Delta V_0 = V_m - |V_m \sin(\pi + \alpha)| = V_m(1 - \sin \alpha) \quad (6)$$

Nos circuitos práticos em que $\omega RC \gg \pi$.

$$\theta \approx \frac{\pi}{2} \quad e \quad \alpha \approx \frac{\pi}{2} \quad (7)$$

Através da Equação (5), a tensão de saída para os diodos desligados avaliado em ωt é

$$V_0(\pi + \alpha) = V_m e^{-\frac{(\pi + \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2})}{\omega RC}} = V_m e^{-\frac{\pi}{\omega RC}} \quad (8)$$

Logo, uma aproximação que pode definir a tensão de ondulação para o retificador de onda completa com filtro capacitivo é exibida como:

$$\Delta V_0 \approx V_m(1 - e^{-\frac{\pi}{\omega RC}}) \quad (9)$$

Além do mais, a representação exponencial da Equação (9) pode ser aproximada pela expansão série, a seguir.

$$e^{-\frac{\pi}{\omega RC}} \approx 1 - \frac{\pi}{\omega RC} \quad (10)$$

Sendo assim, realizando uma substituição da Equação (10) na Equação (9), encontra-se a tensão de ondulação de pico a pico como:

$$\Delta V_0 \approx \frac{V_m \pi}{\omega RC} = \frac{V_m}{2fRC} \quad (11)$$

2.2. RETIFICADORES MONOFÁSICOS CONTROLADOS

2.2.1. Retificados de onda completa em ponte

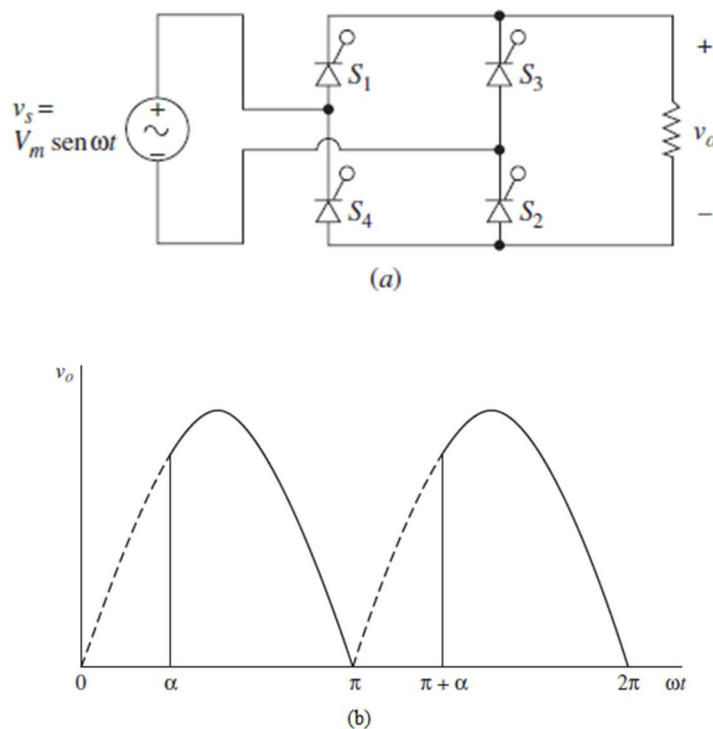
O retificador controlado de potência tradicionalmente nasceu através da evolução da válvula a gás e posteriormente com desenvolvimento dos semicondutores de potência e pode ser subdividido em duas partes: potência, e controle. A parte de potência é obtida através de uma estrutura semelhante em retificadores não controlados, com a diferença de substituímos diodos da estrutura por tiristores. Quando se trata da categoria de semicondutores controlados de potência, o dispositivo eletrônico mais significativo e expressivo são os tiristores, devido à

alta velocidade de chaveamento e à resistência a altas correntes e altas tensões, por essa razão, são dispositivos bastante utilizados em aplicações de alta potência (HART, 2011).

Os retificadores montados com tiristores SCRs, permitem a manipulação da tensão de saída em função do ângulo de disparo, ou seja, modifica-se o ângulo de disparo de tiristores, deslocando no tempo o pulso de disparo enviado ao gatilho. A grande vantagem é que o SCR passa a conduzir com uma corrente de disparo muito baixa, sendo essa corrente quase inexpressiva na análise das perdas energéticas. (LENZ, 2006).

O circuito básico de um retificador controlado de onda completa pode ser visto na Figura 3. Segundo Hart (2011), no semiciclo positivo da fonte, os SCRs S_1 e S_2 que fazem parte da ponte retificadora desse circuito, ficam polarizados diretamente. Porém, não entrarão em condução, a menos que sejam aplicados sinais nos seus gatilhos. De modo similar, os SCRs S_3 e S_4 entrarão com polarização direta no momento de semiciclo negativo da fonte, também só irão conduzir quando aplicados sinais nos gatilhos.

Figura 3 - (a) Retificador de onda completa em ponte controlada e (b) saída para uma carga resistiva.



Fonte: HART (2011).

No circuito retificador controlado, o ângulo de atraso α é o intervalo de ângulo entre a polarização direta do SCR e o sinal aplicado no seu gatilho. Assim, quando o ângulo de atraso

for zero, esse retificador vai funcionar mostrando uma tensão de saída igual a saída do retificador não controlado mostrado na Figura 1.

2.2.1.1. Com carga resistiva

O formato da onda que a tensão de saída de um retificador de onda completa controlado com carga puramente resistiva, é ilustrada na Figura 3. Essa forma de onda apresenta uma componente média, que pode ser determinada por:

$$V_0 = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha) \quad (12)$$

A corrente média de saída é encontrada por

$$I_0 = \frac{V_0}{R} = \frac{V_m}{\pi R} (1 + \cos \alpha) \quad (13)$$

Para determinar a potência na carga resistiva utiliza-se $P = RI_{rms}^2$, no qual a potência entregue para a carga depende da tensão de entrada, do ângulo de atraso e dos componentes que compõem essa carga.

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \left(\frac{V_m}{R} \sin \omega t \right)^2 d(\omega t)} \quad (14)$$

$$I_{rms} = \frac{V_m}{R} \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{4\pi}}$$

É importante salientar que a corrente presente na fonte é igual a corrente eficaz na carga.

2.3. DRIVERS DE POTÊNCIA

O driver de potência é um dispositivo cuja interface é composta por um circuito de controle e outro circuito de potência, onde suas funções são: amplificar a intensidade de corrente e tensão para realizar o acionamento de elementos eletromecânicos e semicondutores. O principal objetivo do circuito driver é acionar dispositivos semicondutores com suas especificações de tensão e corrente necessárias, atribuindo o máximo de proteção contra curto-circuito (BASCOPE et al., 2013).

2.3.1. Acionamento de porta SCR

Os tiristores SCRs funcionam de modo semelhante ao diodo semicondutor, porém com adição de um terceiro terminal, conhecido como Gatilho (Porta ou Gate). Esse terminal tem o objetivo de controlar qual o momento que será feita a condução, conforme a recepção de um sinal de corrente no gatilho, geralmente um pulso (ALMEIDA, 2010).

Para Ahmed (2000) o acionamento de circuitos controlados por SCRs, deve acontecer operando com sinal de disparo trabalhando no tempo correto, pois deve-se assegurar que o sistema esteja ligado quando necessário. Logo, para acionar os SCRs adequadamente, o circuito de disparo deve seguir alguns princípios de funcionamento:

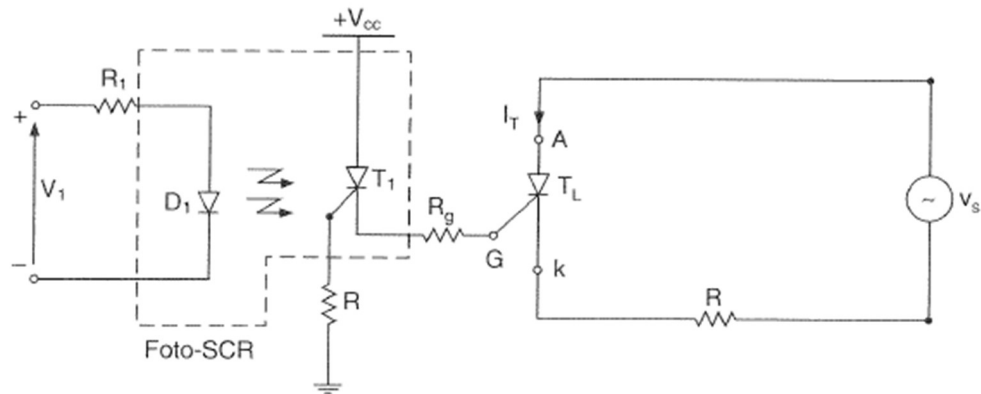
- Gerar um sinal no gatilho com amplitude adequada e tempo de subida consideravelmente curto;
- Gerar no gatilho um sinal com duração adequada;
- Controlar precisamente o disparo conforme a faixa requerida;
- Certificar que nenhum sinal falso ou ruído venha acionar acidentalmente o SCR;
- Para corrente alternadas, verificar se nenhum sinal no gatilho seja aplicado no SCR caso esteja diretamente polarizado;
- Assegurar que os SCRs ligados em série ou paralelo funcionem de forma correta e simultânea.

Além disso, geralmente são três tipos de sinais básicos para acionamento: sinais de corrente contínua, sinais de corrente alternada e sinais pulsados.

2.3.2. Isolação com optoacopladores

Os circuitos retificadores controlados por tiristores, possuem potenciais diferentes nos seus diversos pontos. Naturalmente, na parte de potência dos conversores tiristorizados, aplicam-se valores de tensões elevadas, superiores a 100V. Já o circuito de gatilho é alimentado com baixa tensão, frequentemente em níveis entre 12 e 30V. Além de tudo, é necessário um circuito responsável pela isolamento dos tiristores e o circuito de geração dos pulsos. Esse tipo de isolamento pode ser feito por transformadores de pulsos ou até optoacopladores, podendo ser fototransistor ou foto-SCR (RASHID, 1998). Na Figura 4, observa-se um modelo exemplo de uma isolamento acoplada com foto-SCR.

Figura 4 - Exemplo de isolamento acoplada com foto-SCR.



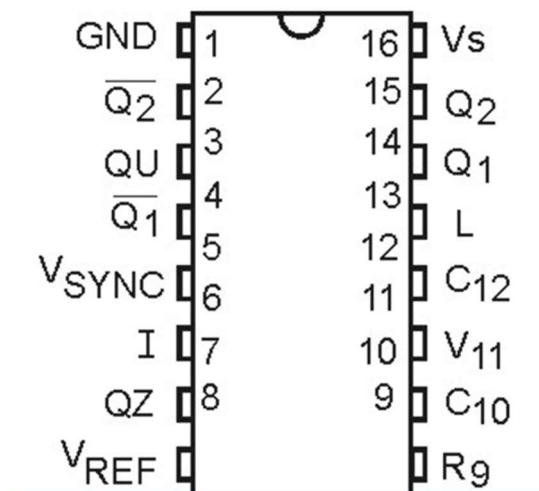
Fonte: RASHID (1998).

Os circuitos de drivers de potência podem ser com ou sem isolamento, no qual dependerá diretamente do tipo de aplicação necessária para o sistema.

2.4. CIRCUITO INTEGRADO (TCA 785)

Com o aumento na utilização de circuitos de disparo na eletrônica de potência, surgiram diversos circuitos integrados. Esses tipos de circuitos, atuam com intenção de facilitar a formação estrutural do projeto, tornando dispositivos mais simples, compactos e confiáveis. Um circuito integrado bastante usado na área industrial é o TCA785 da Siemens que será o objeto de estudo, ilustrado na Figura 5 (ALMEIDA, 2010).

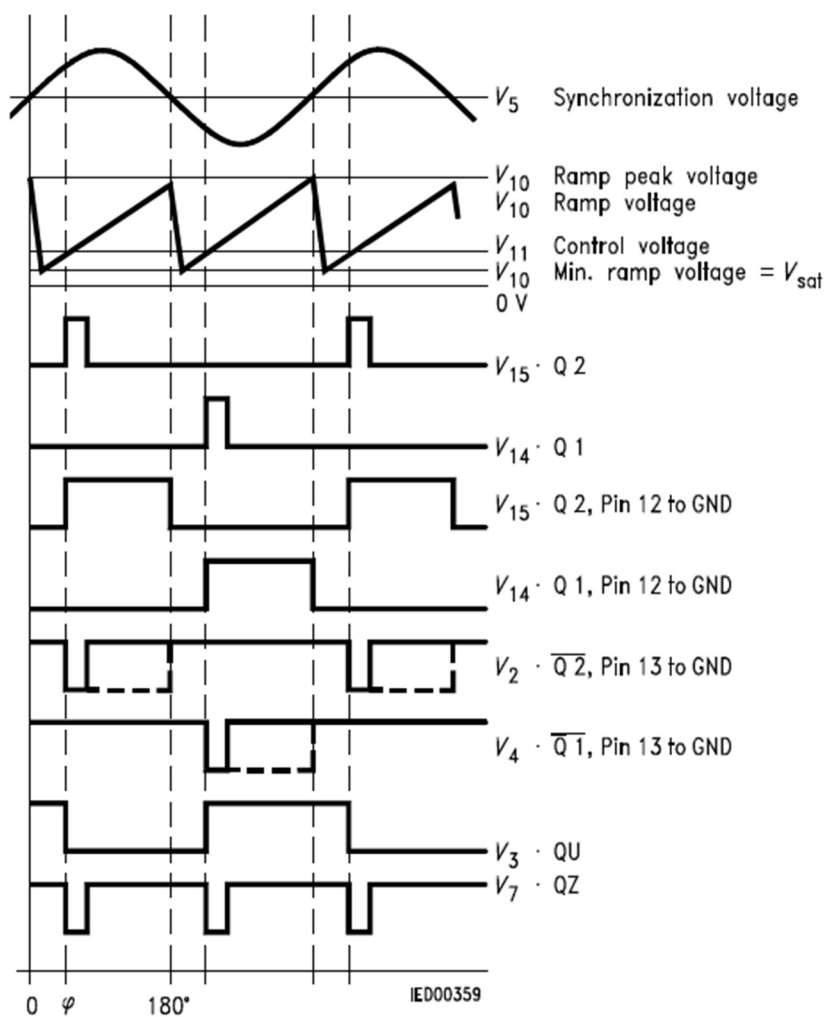
Figura 5 – Circuito Integrado de disparo TCA785.



Fonte: DATASHEET (TCA785 SIEMENS).

Diante das informações disponíveis no ANEXO A e B, sobre o Datasheet do TCA785 da Siemens, mais precisamente pelo diagrama de blocos no ANEXO A. É possível verificar na Figura 6, as características gráficas de cada onda, com relação a cada pinos existentes no seu circuito.

Figura 6 - Diagrama de pulsos do TCA785 da Siemens.



Fonte: DATASHEET (TCA785 SIEMENS).

A parte responsável pelo controle do retificador monofásico controlado é extremamente importante, devido à sua responsabilidade por realizar o disparo dos tiristores. A base para todo controle é atribuída ao circuito integrado TCA785, que é responsável por produzir o pulso de corrente no gatilho, para que ocorra o acionamento dos tiristores. Diante das variadas aplicações dentro da eletrônica, o TCA 785 tem função principal de realizar o controle de tiristores através do ângulo de disparo partindo inicialmente de 0° até 180° . Além disso, trata-se de um circuito integrado simplificado, ou seja, com volume pequeno e configuração simples, onde deseja-se

simplificar ao máximo a seleção de componentes externos. Algumas das grandes preocupações nesse circuito integrado, acontecem através do controle de disparo no tempo desejado. Em que, deve-se prestar atenção na hora de ligar o circuito de disparo e o circuito de potência, pois é necessário evitar a ocorrência de possíveis curtos-circuitos (BASCOPE, 21--).

Em retificadores controlados, os circuitos de disparos devem estar sincronizados com a rede, visto que, caso não esteja sincronizado, ocorrerá no sistema disparo aleatório nos tiristores. Com isso, haverá uma diferença no tempo de cada pulso devido a não sincronização dele com a tensão da rede (ALMEIDA, 2010).

De forma simples, A Tabela 1 mostra as funções resumidas de pino a pino do circuito integrado TCA785 da Siemens.

Tabela 1 – Funções resumidas de pino a pino do circuito integrado TCA785.

FUNÇÕES	SIGLA	PINO
Terra	GND	(1)
Saída complementar do pino 15, em coletor aberto	$\bar{Q}_2$	(2)
Onda quadrada sincronizada com ângulo de disparo α . Para sincronismo com circuitos externos	Q_u	(3)
Saída complementar do pino 14, em coletor aberto	$\bar{Q}_1$	(4)
Sinal da rede para sincronismo com zero	V_{SYNC}	(5)
Desabilita saídas	Inhibit	(6)
Sinal correspondente à operação NÃO OU entre Q_1 e Q_2 .	Q_z	(7)
Fornece 3,1V estabilizado	-	(8)
Resistor que determina corrente de carga do capacitor, que sairá pelo pino 10	R_9	(9)
Capacitor ligado a uma fonte de corrente. Gera o sinal dente de serra	C_{10}	(10)
Tensão de controle, que será comparada com o sinal dente de serra. Quando o dente de serra é maior, ocorre o disparo dos tiristores	V_{11}	(11)
Capacitor para controle de largura dos pulsos de disparo	Q_{12}	(12)
Estende as saídas negadas até próximo zero da rede.	-	(13)
Saída de disparo para semiciclo negativo da rede	Q_1	(14)
Saída de disparo para semiciclo positivo da rede	Q_2	(15)
Alimentação de corrente contínua	V_S	(16)

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

O diagrama de blocos do circuito Integrado da Siemens visto no ANEXO B, dispõe de:

- Detector de zero;
- Fonte interna de corrente;
- Gerador de dente de serra;
- Comparador;
- Pulsos de gatilho com largura controlada;
- Correntes de gatilho de até 250 mA.

3. PROJETO DO CIRCUITO DRIVER DE ACIONAMENTO

Na seção anterior mostrou-se todo embasamento teórico necessário para aplicação do circuito driver de acionamento, no qual buscou-se conhecimentos específicos de alguns componentes presentes em sua estrutura. Entretanto, este capítulo dedicou-se para analisar os circuitos tomados como base para realização do projeto, ou seja, mostra-se a topologia escolhida do retificador monofásico controlado e do circuito driver de disparo, bem como, sua funcionalidade.

3.1. ESQUEMÁTICO PROPOSTO

3.1.1. Esquemático de comando

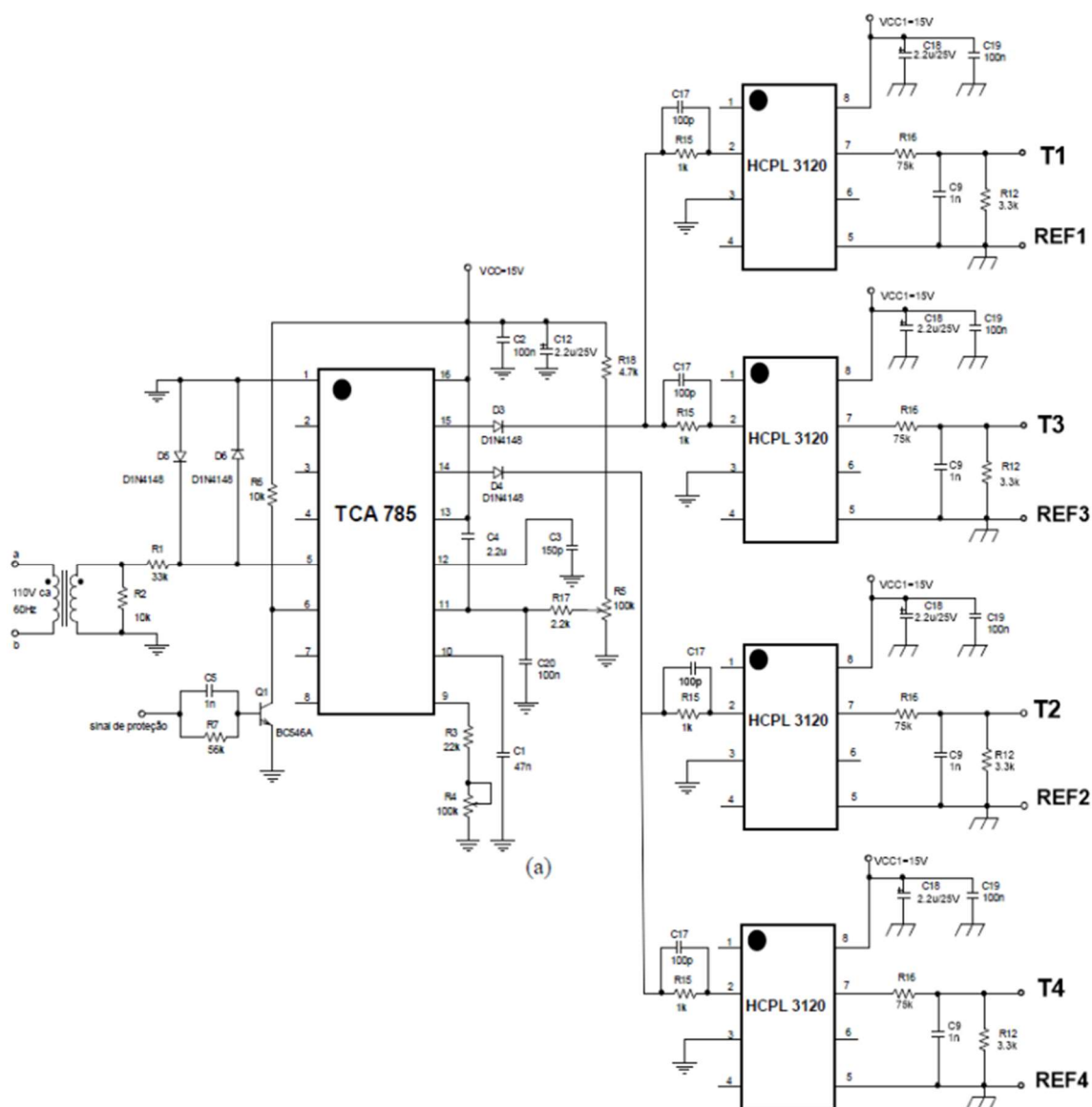
Os circuitos drivers de acionamento são dispositivos complexos de se compreender, pois compartilham de diversos componentes elétricos, ou seja, cada componente está qualificado para desempenhar uma função específica, que proporciona um grau de complexidade considerável em seu funcionamento.

O circuito de acionamento TCA 785 da Siemens é o principal dispositivo implementado neste projeto, visto que, trata-se de um circuito integrado analógico composto por 16 pinos, no qual foi desenvolvido com função de gerar pulsos através de um controle no ângulo de disparo dos tiristores, normalmente SCRs e TRIACs. Assim, o TCA785 possui uma estrutura interna que evita circuitos muito volumosos, que funcionam geralmente com grande precisão e estabilidade (OLIVEIRA, 2012).

O circuito de disparo deste projeto, foi baseado no esquemático presente na Figura 7, onde foi feita uma reestruturação do esquemático anterior, pois o projeto era implementado em circuitos retificadores semicontrolados. No esquemático anterior, só existiam comandos de

gatilho para dois tiristores, assim foi necessário adicionar mais dois dispositivos optoacopladores para isolamento entre estágios de comando e potência, disponibilizando dois controles de disparos adicionais. O objetivo é construir um circuito que possibilite o controle total dos tiristores, presentes nos retificadores monofásicos controlados (BASCOPE, 21--).

Figura 7 - Topologia do circuito de comando com optoacoplador.



Fonte: BASCOPE (21--).

A Figura 8 mostra o esquemático com uma fonte de alimentação definida entre 8 a 18V no (pino 16). O sincronismo do circuito é obtido diante do detector de zero no (pino 5), que possui conexão com o registrador de sincronismo. A geração da rampa é definida pelo capacitor C_{10} cuja corrente é controlada pelo potenciômetro ligado no (pino 9), com intuito de ajustar a amplitude da rampa, que vai a zero no momento em que a tensão de sincronização passa por

zero, por causa da saturação do transistor em paralelo com capacitor. O comparador de controle é responsável pela análise comparativa entre a tensão de controle e a rampa, se forem iguais, então envia pulsos na saída por unidade lógica. Sendo assim, no (pino 15) tem-se os pulsos do semiciclo positivo da tensão de sincronismo e no (pino 14) os pulsos do semiciclo negativo. A amplitude desses pulsos, são iguais às tensões de alimentação, já a largura deles são realizadas por escolha do capacitor C_{12} presente no (pino 12), conforme a Tabela 2 (ALMEIDA, 2010).

Tabela 2 - Duração dos pulsos definidas por C_{12} .

COMPONENTES								UNIDADE
C_{12}	Aberto	150	220	330	680	1000	Curto	pF
Duração dos pulsos	30	93	136	205	422	620	180- α	μs

Fonte: ALMEIDA (2010).

Através do Datasheet disponível no ANEXO B, foram construídas as Tabela 3 e 4, no qual mostram alguns limites operacionais e avaliações máximas absolutas do circuito integrado TCA.

Tabela 3 - Avaliações máximas absolutas do TCA785 da Siemens.

DESCRIÇÃO	SÍMBOLOS	VALORES	UNIDADES
Tensão de alimentação	V_S	-0,5 a 18	V
Corrente de saída nos pinos 14 e 15	I_Q	-10 a 400	mA
Tensão de inibição	V_6	-0,5 a V_S	V
Controle de voltagem	V_{11}		
Circuito de curto-pulso de tensão	V_{13}		
Corrente de entrada de sincronização	V_5	-200 a ± 200	μA
Tensão de saída nos pinos 14 e 15	-	V_S	V

Fonte: DATASHEET (TCA785 SIEMENS).

Tabela 4 - Limites operacionais do TCA785 da Siemens.

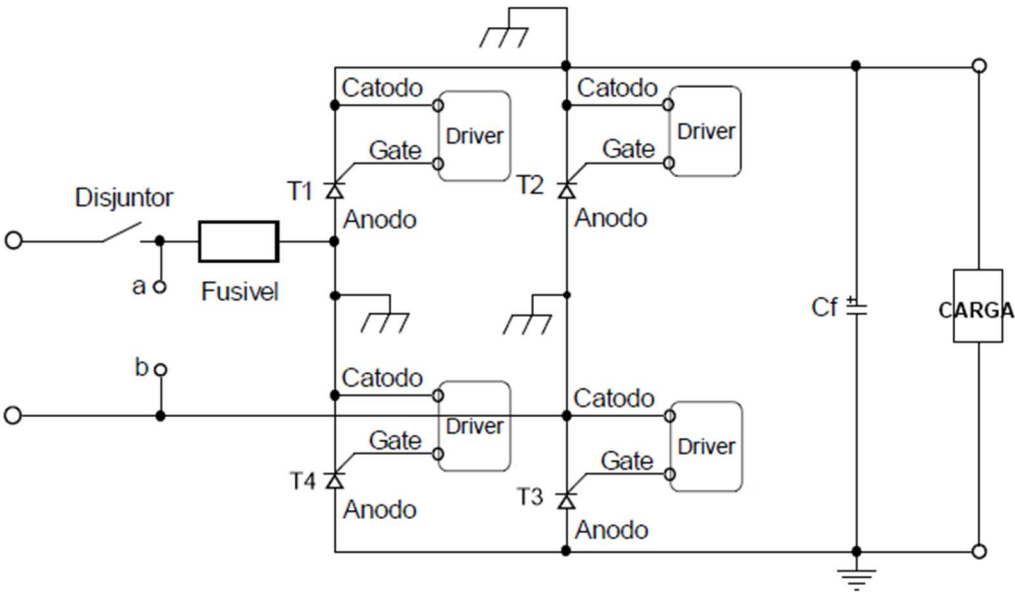
DESCRIÇÃO	SÍMBOLOS	VALORES	UNIDADES
Tensão de alimentação	V_S	8 a 18	V
Frequência de operação	f	10 a 500	Hz
Temperatura ambiente	T_A	-25 a 85	°C

Fonte: DATASHEET (TCA785 SIEMENS).

3.1.2. Esquemático de Potência

Para realização deste projeto, foi utilizado como base o esquema do circuito de potência mostrado na Figura 8, no qual também se modificou a estrutura usada anteriormente, que era de um retificador monofásico semicontrolado. Porém, como o objetivo do projeto é construir um retificador monofásico totalmente controlado, foi preciso adicionar mais dois componentes tiristores T3 e T4 para substituir os diodos, uma carga puramente resistiva e um filtro capacitivo de saída dado por C_f (BASCOPE, 21--).

Figura 8 – Representação do retificador monofásico em ponte totalmente controlado.



Fonte: BASCOPE (21--).

O funcionamento desse circuito de potência acontece de maneira básica, onde considera-se um sistema com tensão de alimentação senoidal trabalhando na frequência de 60 Hz. No semiciclo positivo irão funcionar os tiristores T1 e T3 sincronizados, permitindo a

condução de corrente de acordo com o comando do circuito de disparo que controla o ângulo variando de 0° a 180° . Já no semiciclo negativo, onde os tiristores T2 e T4 conduzem conforme o ângulo de disparo, tem sua variação de 180° a 360° . Além do mais, esse retificador opera sem realimentação em malha aberta, ou seja, os ângulos que disparam os tiristores são feitos regulados manualmente.

3.2. METODOLOGIA

Neste capítulo será discutido a metodologia de pesquisa implementada, analisando os procedimentos e materiais utilizados para formação do circuito, assim como, os processos que encaminharam seu desenvolvimento.

A princípio, os testes e análises deste trabalho foram feitos em um retificador monofásico semicontrolado com dois SCRs, observando seu comportamento tanto na parte de comando, como na de potência. Depois de um certo grau de confiança, o circuito foi desenvolvido para ser aplicado no retificador monofásico controlado.

A topologia usada no capítulo anterior, possui componentes eletrônicos pré-definidos para funcionar, porém com abertura para adaptações e mudanças dentro desses componentes pré-definidos, ou seja, deve-se dimensionar os componentes utilizados de acordo com os parâmetros e aplicações.

A base para o equacionamento de todo o retificador foi tomada pelo livro: Eletrônica de Potência: análise e projetos de circuitos de Hart. A partir da tensão de alimentação e de potência, foi possível descobrir os valores de tensão média, de pico e eficaz na carga para $\alpha = 0^\circ$ e $\alpha = 45^\circ$; valor da resistência (carga); valor de pico na carga; valor de corrente média, pico e eficaz na carga; valores de corrente média, eficaz e pico na entrada; valores de tensão de pico reverso; valores de corrente média, pico e eficaz na entrada dos tiristores; valores de perdas nos SCRs; valor do filtro capacitivo; valores da resistência presentes depois dos optoacopladores e por fim, da corrente de gatilho nos SCRs. Todos os valores mencionados são ilustrados no ANEXO C e D e foram feitos em um *software* de cálculos, onde foi executado uma planilha com todos os cálculos necessários para o dimensionamento do projeto.

Em seguida, com auxílio de um *software* de simulação de circuitos, foi possível desenvolver todos os processos para retirada dos gráficos e resultados. Sendo assim, foram colhidas as formas de onda do circuito de comando para: tensão de entrada, tensão de rampa e pulsos de saída. A forma de onda principal extraída desse circuito, foi a tensão de saída na carga para $\alpha = 0^\circ$, 45° e 90° , assim como, a forma de onda da saída filtrada com capacitor.

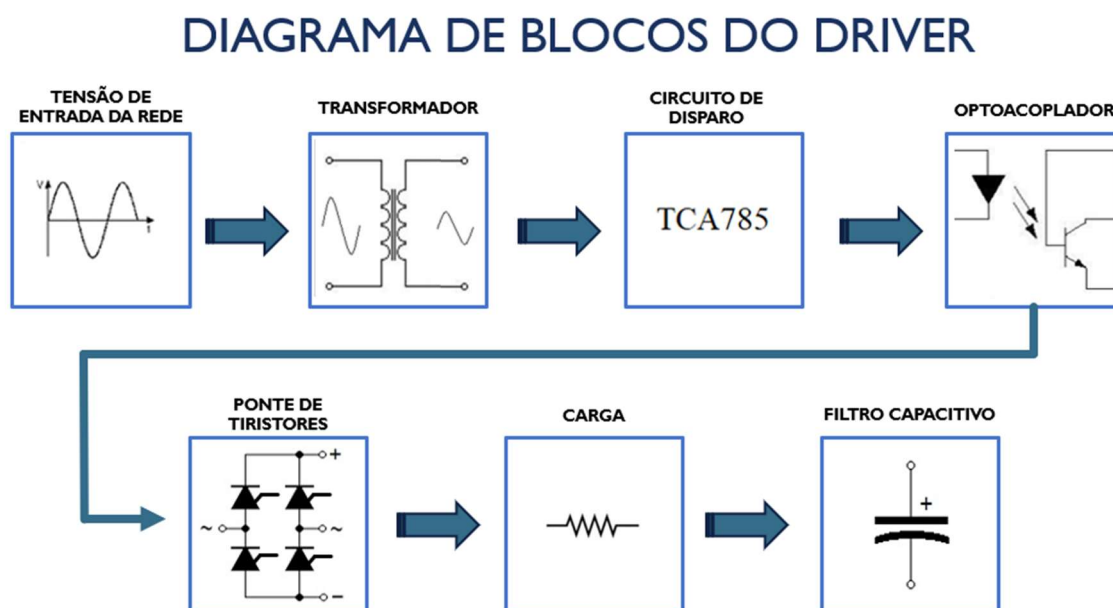
Diante da mesma ferramenta de simulação, foi desenvolvido a placa de circuito impresso com uso de footprints em 3D representado cada dispositivos, em que o objetivo é visualizar de maneira realista a placa de circuito. Além disso, utilizou-se conectores via cabo capaz de transferir os sinais e referência da placa de comando para a placa de potência, consequentemente diminuindo os ruídos e interferências que causam problemas para o projeto. Também foram usados pinos (bananas), para implementação da alimentação do TCA785 e dos optoacopladores no circuito de comando, assim como na fase, no neutro e na carga do circuito de potência. Em resumo, foi desenvolvido todo processo necessário para confecção de uma placada de circuito impresso, onde projetou-se a placa de comando e potência.

Por fim, depois de simulado e confeccionado o circuito de disparo, realiza-se testes e comparações diante dos resultados com intuito de verificar, se o sistema é funcional conforme toda sua estrutura e viabilidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, serão analisados os resultados atingidos conforme toda teoria estudada, com ajuda de um *software* de simulação para extração dos resultados obtidos, permitindo uma breve discussão sobre o tema. Além disso, será apresentado diante da Figura 9, um diagrama de blocos que explica de maneira intuitiva, o funcionamento do circuito driver de acionamento deste trabalho.

Figura 9 - Diagrama de blocos explicativo do driver de acionamento.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

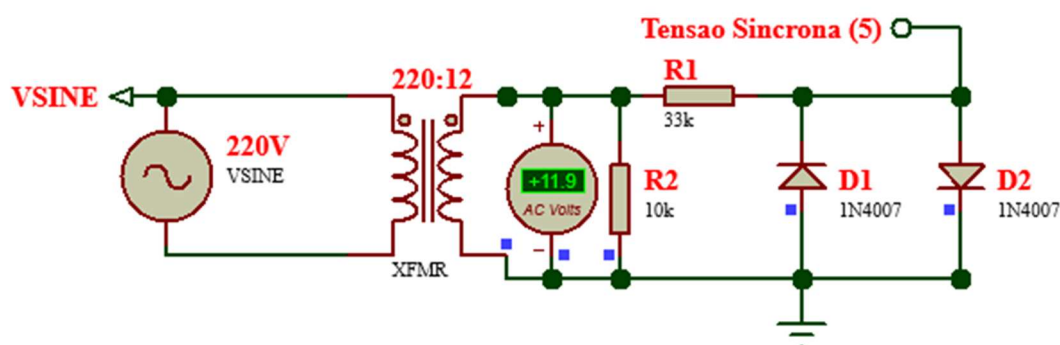
Na primeira parte do diagrama de blocos mostrado, aplica-se uma tensão na entrada do driver de acionamento na forma alternada senoidal, pro exemplo a rede de distribuição elétrica, no qual entra em um transformador responsável por abaixar a tensão de entrada para níveis aceitáveis conforme o circuito de disparo TCA785. Em seguida, o circuito de disparo manda pulsos para entrada do circuito de potência, em que existe uma proteção por meio de optoacopladores separando o circuito de comando do circuito de potência. Por fim, a tensão de alimentação do circuito de potência é retificada pela ponte de tiristores, utilizando uma carga puramente resistiva com filtro capacitivo em paralelo para diminuir a ondulação da tensão de saída.

4.1. SIMULAÇÃO

Para construção da simulação deste trabalho, foi constituído um sistema com dois módulos que utilizam conexões de vários componentes eletrônicos. Um deles é o circuito de acionamento que contém como elemento principal, o circuito dedicado TCA785 da Siemens, o outro módulo é o circuito de potência.

Com intuito de evitar que aconteçam disparos aleatórios nos tiristores, os circuitos de disparos precisam estar sincronizados com a rede, onde o ponto de referência nessa técnica de sincronização, é a passagem de zero da rede. O esquemático mostrado na Figura 10, mostra a tensão eficaz de entrada de 110V, sendo abaixada para 12V por um transformador. Em seguida, essa tensão chamada de tensão de sincronização direciona-se para o bloco detector de passagem zero, que é responsável por gerar pulso de sincronismo cada vez que a tensão da rede passa por zero (ALMEIDA, 2010).

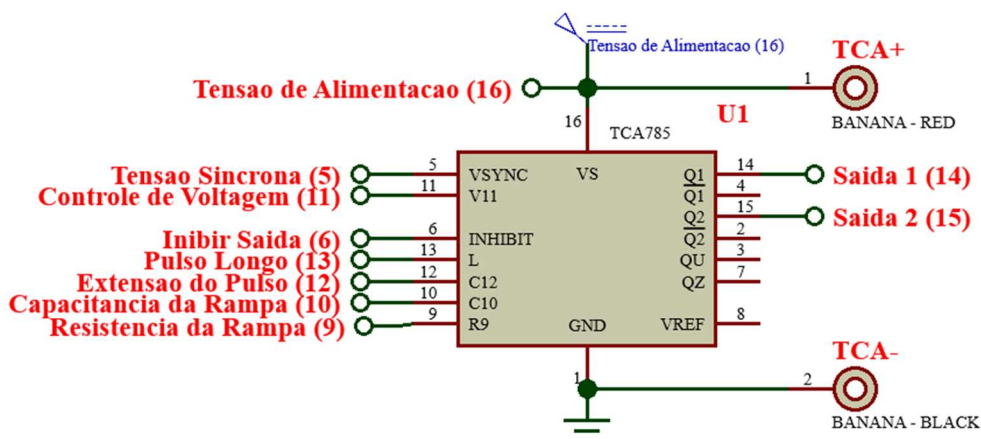
Figura 10 - Esquemático da tensão síncrona do TCA785 em *software*.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

O esquemático da Figura 11, mostra todos os pinos que compõem a estrutura do TCA e suas conexões utilizadas na simulação do circuito. Esse circuito recebe uma alimentação de 15V em corrente contínua (ALMEIDA, 2010).

Figura 11 - Esquemático de todos os pinos do TCA785 em *software*.



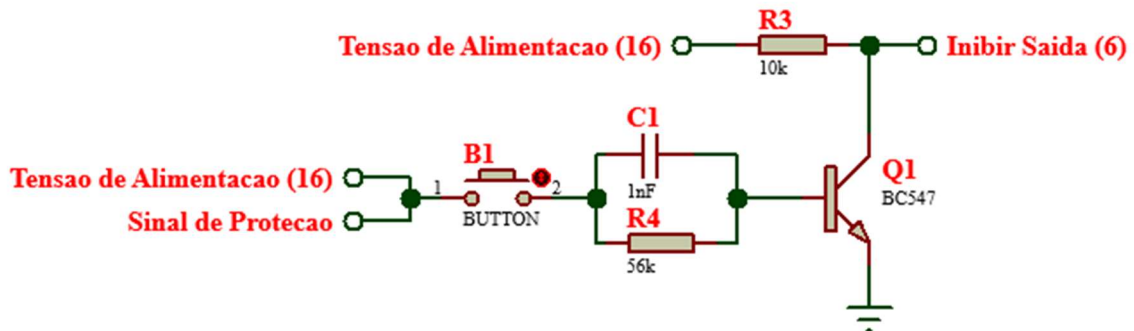
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

O (pino 6) faz a função de liberar as saídas do TCA, porém sua alimentação precisa ser maior que 4V, do contrário as saídas serão bloqueadas. Quando o pino é aterrado, o sistema inibe todas as saídas. Na Figura 12, tem-se o esquemático que representa esse comportamento, em que o sinal que faz a inibição das saídas é chamado de sinal de proteção (ALMEIDA, 2010).

O gerador de rampa é a base para o sincronismo do sistema (controlado pela unidade lógica), onde os dispositivos externos resistores e capacitores presentes no pino 9 e 10, são responsáveis pelo ajuste e formação da rampa (CAPELLI, 2006). Além disso, o resistor $R_{pino\ 9}$ junto com potenciômetro POT_1 , vão determinar a corrente de carga do capacitor $C_{pino\ 10}$ através da variação linear da tensão em função do tempo, também podem definir qual será a inclinação da rampa (ALMEIDA, 2010).

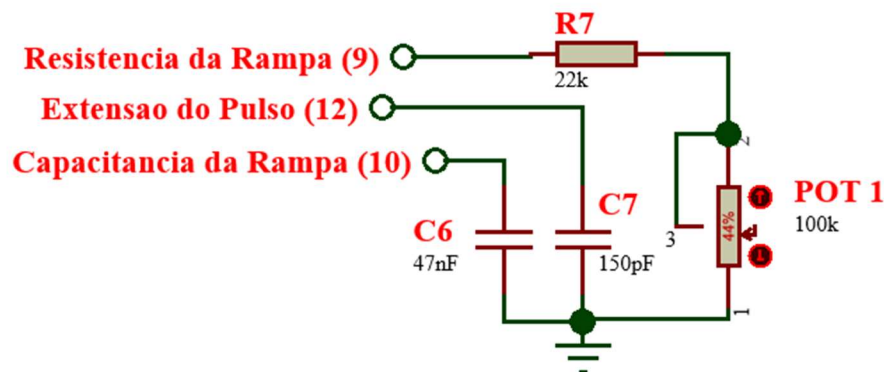
Na saída Q_1 do (pino 14), é gerado o pulso que corresponde aos disparos do semiciclo negativo e o Q_2 (pino 15) disparo do pulso do semiciclo positivo, ambos sincronizados com a rede. O (pino 12) realiza a função de regulação na duração dos pulsos como visto na Tabela 2. Já a amplitude dos pulsos é determinada através da tensão de alimentação (pino 16). O esquema de configuração da rampa e o capacitor de regulação dos pulsos são ilustrados na Figura 13 (ALMEIDA, 2010).

Figura 12 - Esquemático do sinal de proteção e inibição da saída do TCA785 em *software*.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

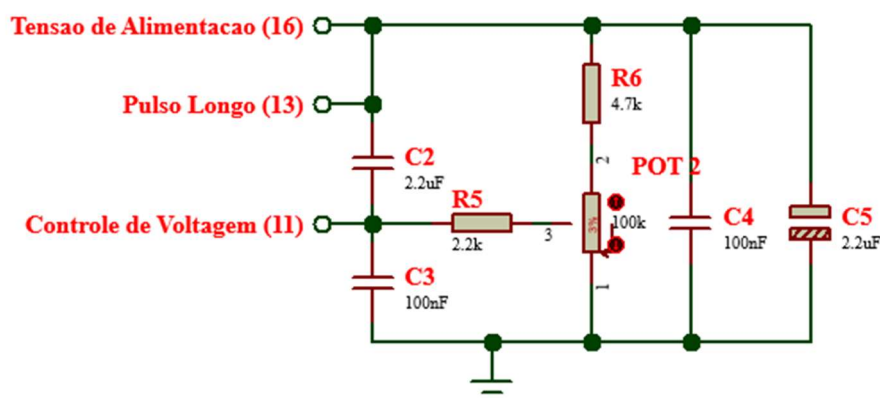
Figura 13 - Esquemático da definição da rampa e extensão do pulso do TCA785 em *software*.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

Internamente ao (pino 11) do TCA, existe um comparador de controle que tem a função de comparar a tensão da rampa (V_{Rampa}) e a tensão de controle ($V_{Controle}$), com finalidade de gerar os pulsos. Assim, quando o dente de serra se apresenta maior que o sinal de controle, os tiristores são disparados executando a condução da corrente. Além disso, parte do circuito integrado do TCA tem sua regulação feita pela tensão de referência $V_{ref} = 3,1V$ no (pino 8), possibilitando vários níveis de tensão na sua alimentação, variando de 8 a 18V na forma contínua com potencial positivo no (pino 16) e terra no (pino 1) (CAPELLI, 2006). O (pino 13) funciona de forma parecida com o (pino 12), pois estende as saídas negadas dos pinos (2 e 4) até próximo zero da rede. Contudo, o esquemático que representa os pinos mencionados na simulação é mostrado na Figura 14 (ALMEIDA, 2010).

Figura 14 - Esquemático do controle de tensão e pulso longo do TCA785 em *software*.

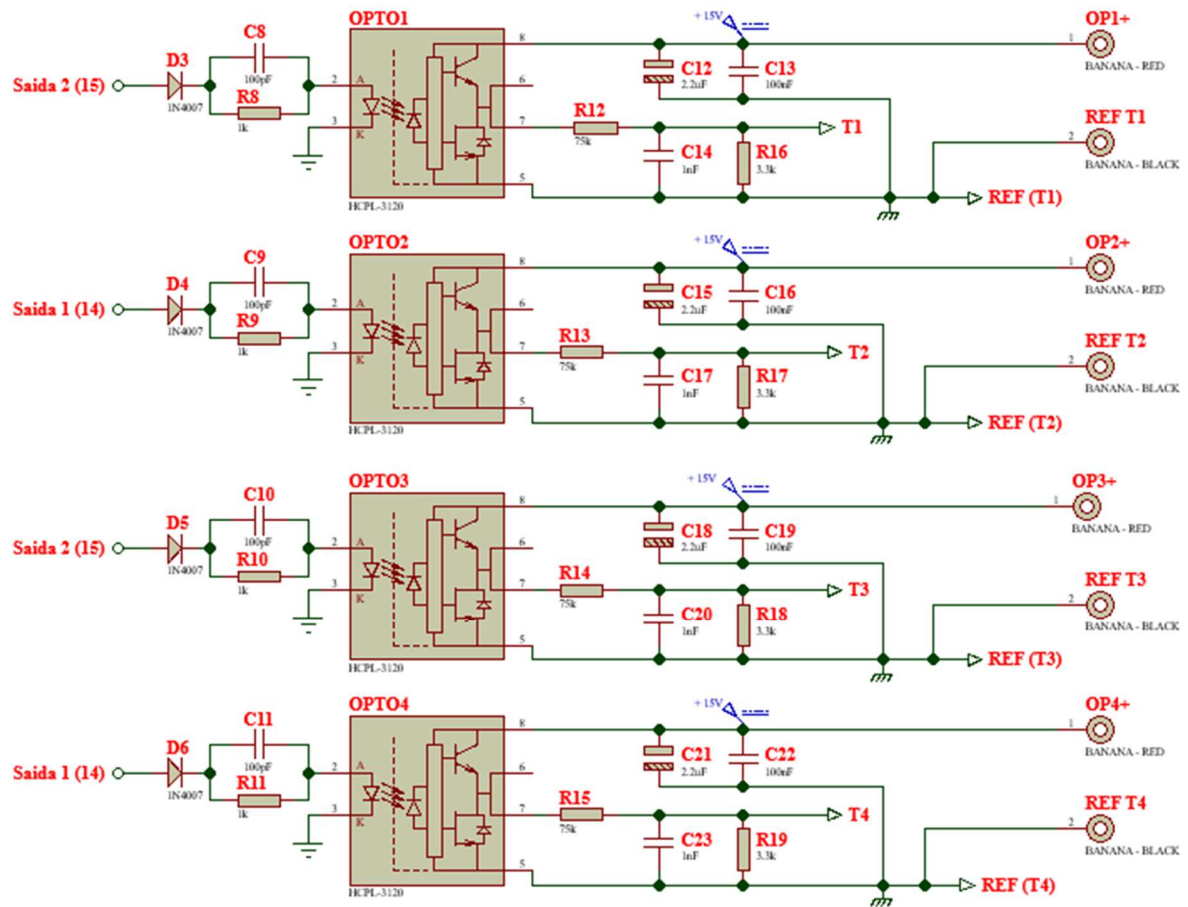


Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

A estrutura de isolamento do circuito de acionamento e potência dos é mostrada na Figura 15, composta por quatro optoacopladores, com uma isolamento para cada sinal de disparo.

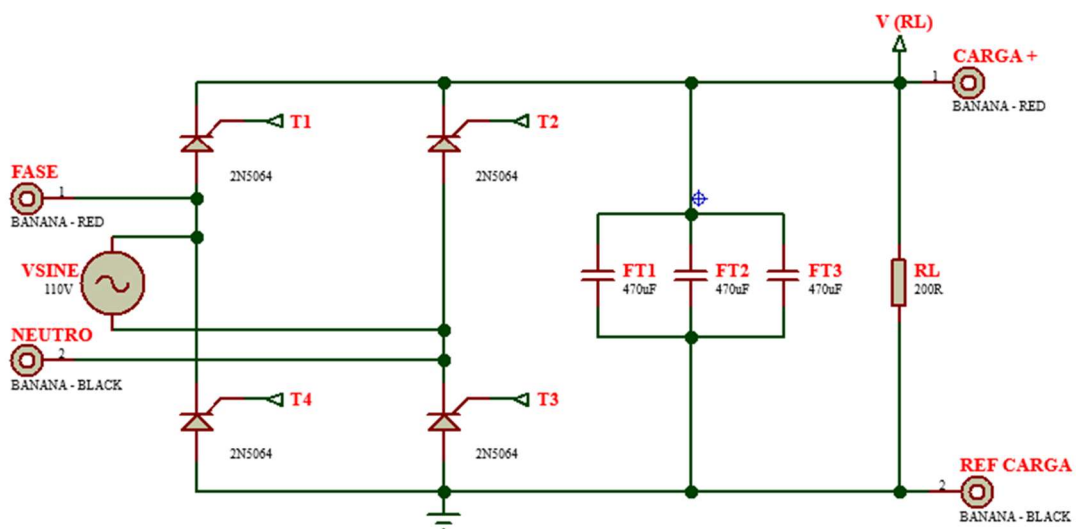
O circuito retificador controlado feito no *software* encontra-se na Figura 16 seguir, no qual possui em sua estrutura, pinos banana para implementar a fase, o neutro e a carga resistiva do sistema, que deverá ser um reostato devido a quantidade de potência aplicada no sistema. O modelo escolhido de SCR é o (2N5064), que trabalha com corrente de gatilho sensível, com no máximo 200uA. Além disso, a corrente de condução pode variar de 0,8 a 10A, que é um valor consideravelmente alto. Esse dispositivo também suporta tensões reversas de até 200V.

Figura 15 - Esquemático de isolamento do circuito de comando e potência através de optoacopladores em *software*.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

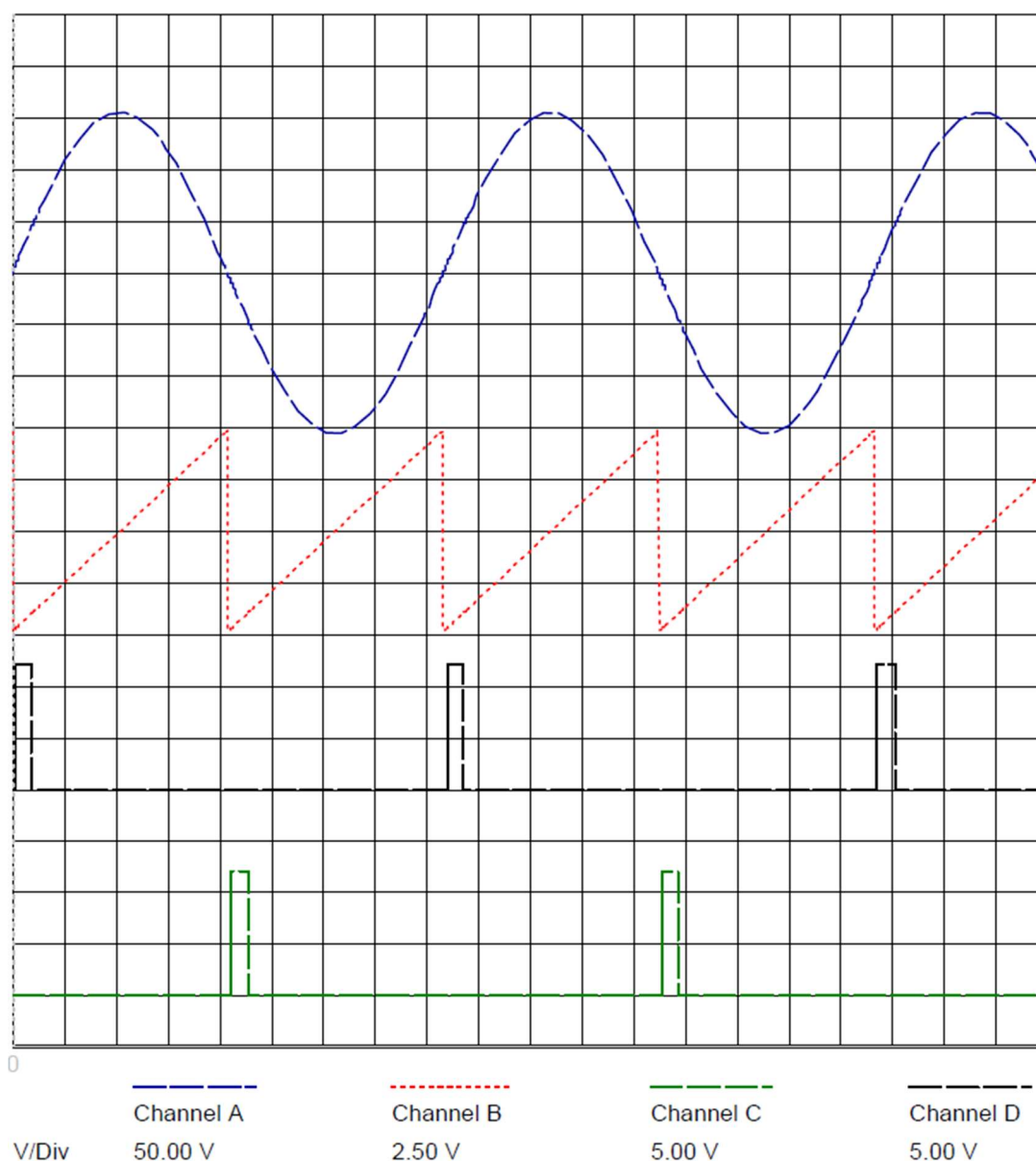
Figura 16 - Esquemático do circuito retificador monofásico controlado em *software*.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

A Figura 17 mostra as formas de onda do circuito de acionamento para tensão de entrada, tensão de rampa, e os pulsos de cada semiciclo. A primeira forma de onda em azul é da tensão de entrada da rede no formato senoidal, que possui 50V por divisão variando entre valores de 155V pico a pico. A segunda forma de onda em vermelho, é a tensão de rampa com formato dente de serra colhida no (pino 9) do TCA, onde o valor de tensão por divisão aqui é de 2,5V. Como citado anteriormente, a inclinação da rampa é definida pela variação de corrente através potenciômetro POT_1 ligado ao (pino 9) e a capacitância C_6 presente no (pino 10), ambos foram ilustrados anteriormente na Figura 13.

Figura 17 - Formas de onda colhidas pela simulação do circuito de disparo.

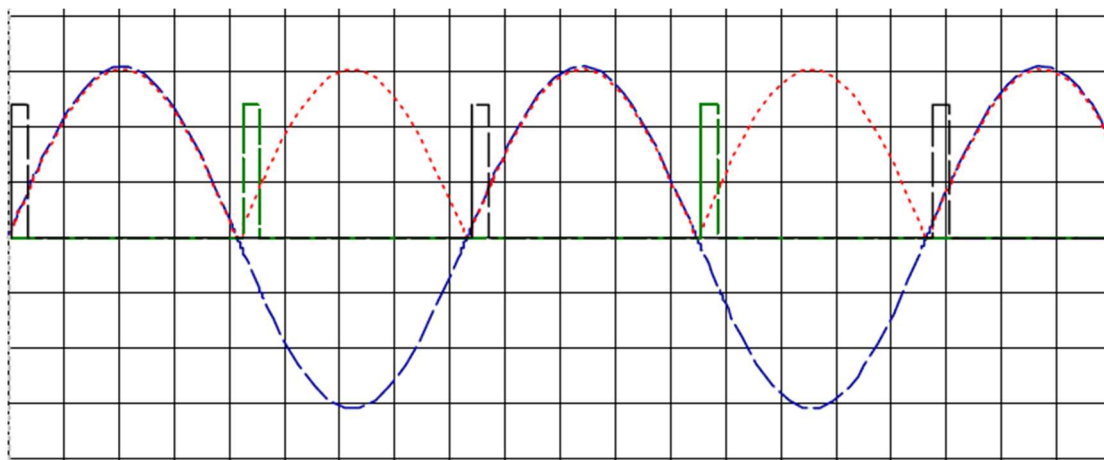


Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

Os pulsos mostrados na Figura 18, são obtidos através dos pinos 14 e 15 do TCA. Os pulsos na cor preta fazem o disparo dos SCRs, que conduzem no semiciclo positivo, já os pulsos em verde disparam os SCRs no semiciclo negativo. A tensão por divisão para os dois pulsos são de 5V e apresentaram picos de 12V, porém em momentos diferentes. A largura de pulso foi definida pelo capacitor C_7 da Figura 13, com valor de aproximadamente $60\mu s$.

O primeiro teste realizado no retificador monofásico controlado foi feito com ângulo de disparo dos SCRs no mesmo momento do zero da rede, ou seja, o disparo vai acontecer com $\alpha = 0^\circ$. A Figura 18 mostra as ondas relevantes de tensão de entrada em azul, com 50V por divisão, do pulso de disparo no semiciclo positivo em preto, com 2,5V por divisão, do pulso de disparo do semiciclo negativo em verde, também com 2,5V por divisão e tensão de saída na carga em vermelho, com 50V por divisão. Diante desse gráfico, é possível observar que a tensão na carga foi de 152,5V, retificada e apresenta com uma leve queda de tensão, devido aos SRCs que estão em condução. A tensão média eficaz nesta condição, tem valor próximo de 97V e a frequência de saída dobrou para 120Hz, que é característica desse tipo de circuito.

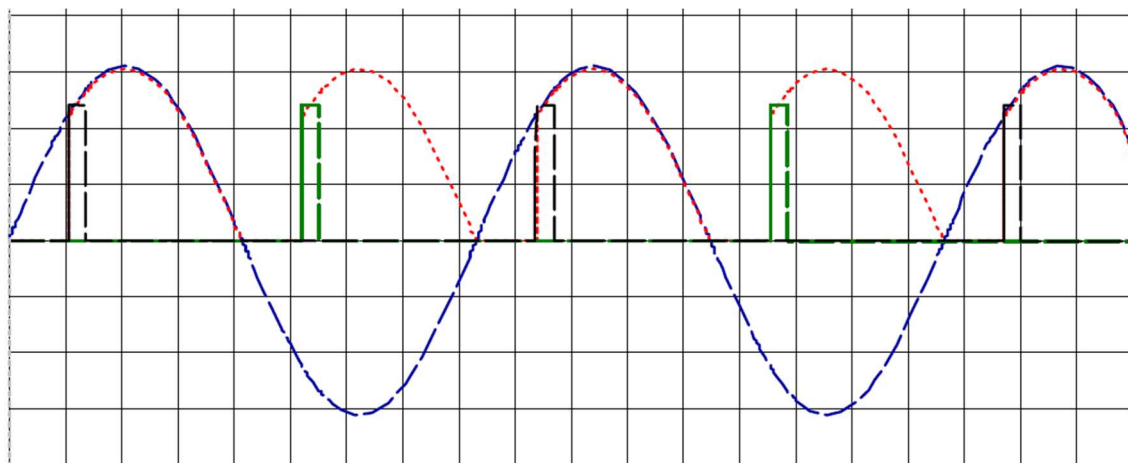
Figura 18 - Formas de onda colhidas pela simulação com os SCRs conduzindo em 0° .



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

Em seguida, foi realizado o teste com ângulo de disparo $\alpha = 45^\circ$, como mostrado na Figura 19. Através desse gráfico, percebe-se que os SCRs (1 e 3) que atuam no semiciclo positivo, só vão conduzir quando ângulo α atingir 45° , onde a referência é a tensão de entrada em zero. O mesmo funciona para os SCRs (2 e 4) atuantes no semiciclo negativo, porém com ângulo de disparo sendo $\alpha = 135^\circ$. A intensidade de cada onda é igual ao gráfico da Figura anterior, mas nesta parte, a tensão média eficaz tornou-se levemente menor, com valor próximo de 83V.

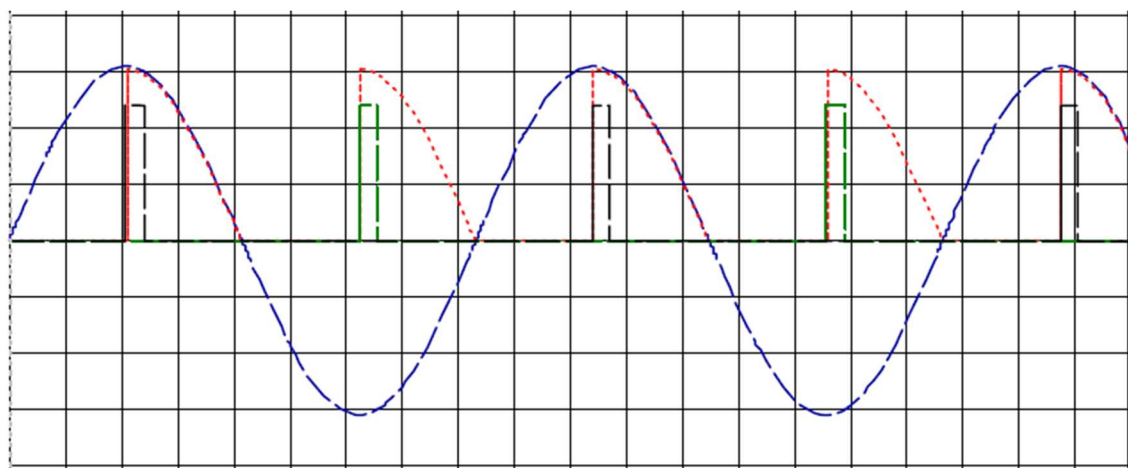
Figura 19 - Formas de onda colhidas pela simulação com os SCRs conduzindo em 45° .



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

Posteriormente, o mesmo processo implementado no sistema passado é aplicado na Figura 10, onde a diferença está no ângulo de disparo dos SCRs (1 e 3) sendo $\alpha = 90^\circ$ e os SCRs (2 e 4) com valores próximos de $\alpha = 180^\circ$. A tensão por divisão é mantida com a mesma proporção do método da Figura 19. Além disso, observando o gráfico foi possível visualizar que o tempo de condução é relativamente curto e sua tensão média é a menor diante das outras com valor eficaz próximo de 49V.

Figura 20 - Formas de onda colhidas pela simulação com os SCRs conduzindo em 90° .

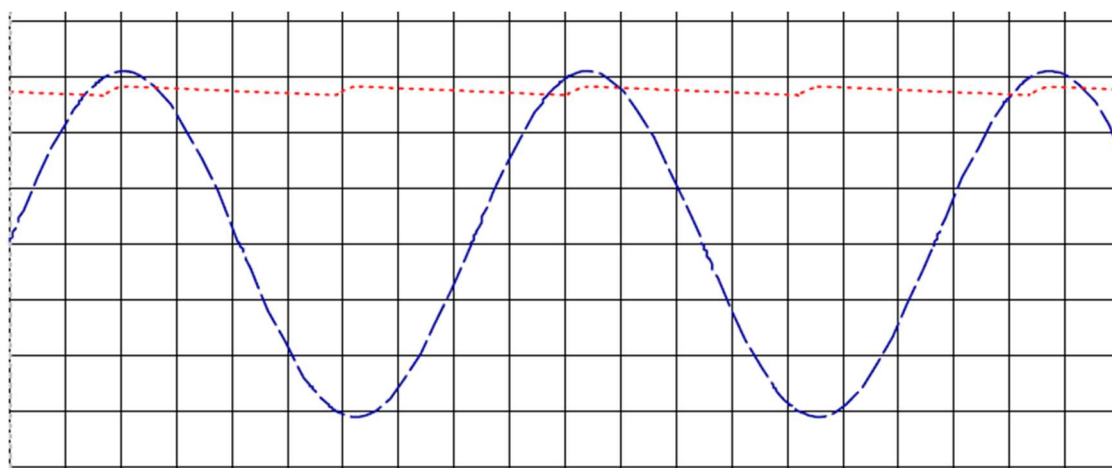


Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

A última parte é realizada com filtro capacitivo na saída do retificador, como mostrado na Figura 21. Como o objetivo é eliminar as ondulações do circuito e entender o comportamento do filtro capacitivo, foram adicionados valores aleatórios próximos ao padrão do circuito calculado no ANEXO D, que mostra o dimensionamento do capacitor para ser implementado no circuito. A forma de onda de cor azul, é a tensão de entrada que, assim como as outras possui

valores de 50V por divisão no gráfico, já a onda de vermelho é justamente a tensão de saída do retificador com filtro capacitivo, também com 50V por divisão. Diante da análise realizada com os valores aleatórios, percebeu-se que o capacitor carrega totalmente com valor de pico na carga em cada semiciclo de subida e na outra metade faz a reposição de energia na carga, evitando variações bruscas de tensão. Logo, quanto mais cargas o capacitor puder acumular, menor será a ondulação, consequentemente mais filtrada será a tensão de saída.

Figura 21 - Formas de onda colhidas pela simulação com filtro capacitivo na saída.



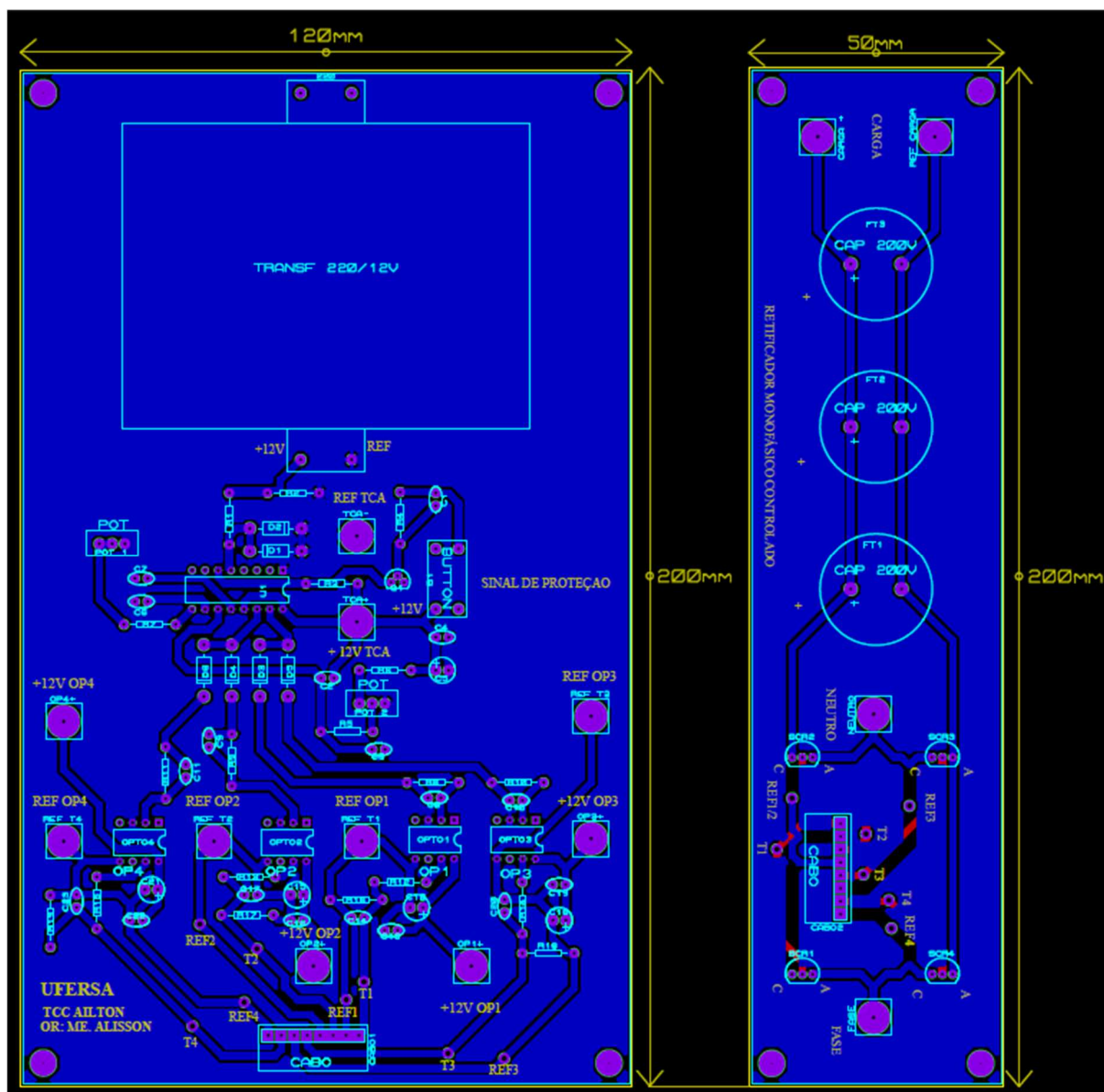
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

Os resultados apresentados nesta seção, foram bastantes satisfatórios, pois além de auxiliar na compreensão do circuito utilizado, conseguiu-se atingir os valores adequados para construção física do projeto, mostrando que o circuito de acionamento é funcional, diante da ferramenta de simulação.

4.2. PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO (PCB)

Diante das todas as análises feitas neste trabalho, assegurou-se que o circuito driver de acionamento projetado, realmente funciona e tem capacidade de gerar pulsos para controlar devidamente os SCRs presentes no circuito retificador. Assim, através de um *software* de placas de circuito impresso, tornou-se possível realizar a estrutura bidimensional da placa para o projeto, respeitando sempre as regras relacionadas a largura e angulação nas trilhas dos circuitos. A estrutura em 2D do circuito de comando é mostrado no lado esquerdo da Figura 22, já no lado direito, é ilustrado o 2D circuito de potência, ambos com malha de aterramento proporcionando mais segurança na aplicabilidade dos circuitos.

Figura 22 - Visão bidimensional do driver na PCB.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

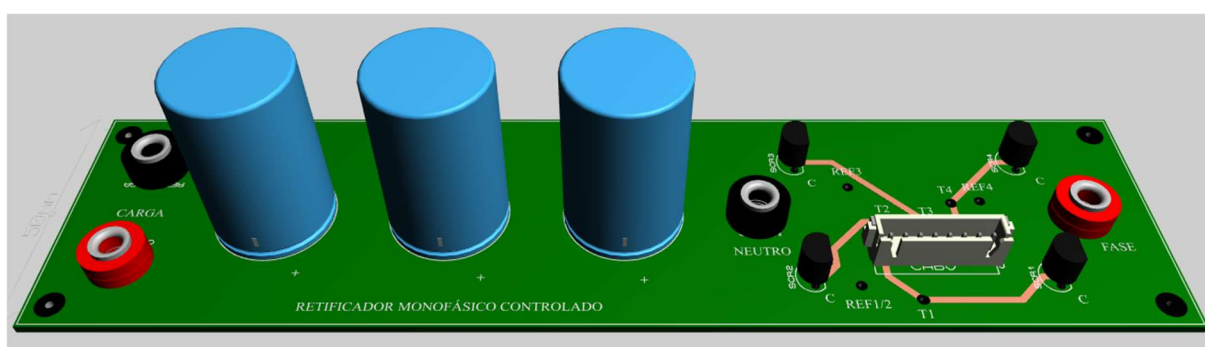
O *software* de simulação utilizado no projeto tem capacidade de representar os circuitos da Figura 22 no formato 3D Layout, trazendo organização e uma sensação mais realista na montagem de cada dispositivo presente no projeto. A Figura 23, mostra o circuito driver de acionamento com visualização em 3D. Além disso, a representação em 3D do retificador controlado é mostrada na Figura 24, onde sua configuração é do tipo dupla face, capaz de separar os sinais de acionamento das altas potências presentes do circuito de potência, evitando problemas futuros.

Figura 23 – Visão em 3D do circuito de comando na PCB.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

Figura 24 - Visão em 3D da placa de potência na PCB.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

As medidas do circuito driver de comando mostrado na Figura 23, apresentam-se com largura (12cm) x altura (20cm) para o driver e largura (50cm) x altura (20cm) para a placa do retificador controlado. Essas placas estão aterradas para evitar problemas de fugas de energia. Além disso, foi orientado nas duas PCBs, os nomes e as posições de cada elemento do circuito, com intuito de facilitar a implementação deles.

O transformador na entrada do circuito de comando, abaixa a tensão eficaz de 110V/60Hz para 12V/60 Hz, no qual seu modelo apresenta tensões de saída adaptada com 12V ou 12+12V para corrente máxima de 1A e suas medidas são aproximadamente comprimento (6 cm) x Largura (4 cm) x Altura (8 cm). Os capacitores são do tipo radial eletrolítico com modelo (A2477M EPCOS) de 470uF, em que cada capacitor suporta tensões de até 200V com medidas de diâmetro (2,2cm) x altura (35cm).

A carga na prática deve ser um reostato de laboratório com modelo (POL-412S) configurado com 200 Ω , assegurando contra possíveis danos conforme a potência do sistema. Os potenciômetros são modelos (Trimpot 100K Ω vertical 3296W) e o botão é necessário para garantir rapidez, no sinal de proteção.

Para a isolação do circuito de comando foi utilizado optoacopladores de modelo (HCPL3120 HP), no qual seus parâmetros podem ser analisados através pelo Datasheet, que está disponível no ANEXO E. Também foi utilizado um cabo conector do tipo (XH de 8 pinos com passo de 2.54mm), para transferir os sinais de gatilho e as referências geradas do circuito de comando para o circuito de potência.

O ANEXO F ilustra uma lista de materiais montada com objetivo de disponibilizar o gasto total diante de cada dispositivo, necessário para construir o driver de acionamento, que apresentou o custo de R\$256,00. É importante frisar que na lista, foi retirado o custo da carga resistiva, pois como já dito anteriormente, deve-se utilizar um reostato de laboratório que trabalha com maiores potências.

De modo geral, as PCBs geradas nesta parte do projeto foram montadas como esperado, procurando manter um padrão de organização que seja funcional e vista de forma harmoniosa.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os procedimentos realizados, foi possível perceber que o circuito funcionou de maneira adequada e satisfatória, mostrando que os resultados de simulação apresentados e as discussões pertinentes conduziram às seguintes conclusões:

- O circuito de acionamento disparou os SCRs nos ângulos desejados para o funcionamento correto do retificador.
- O teste com filtro capacitivo, mostrou a tensão de saída com uma variação de tensão mais suave, ou seja, com menor ondulação.
- O circuito driver de acionamento funcionou corretamente em circuitos retificadores monofásicos controlados com ponte de SCR, onde mais à frente, torna-se possível construí-lo fisicamente.

5.2. TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho propõe como estudos futuros:

- Construção de circuito driver de acionamento implementado em retificadores trifásicos controlados;
- Desenvolvimento do driver de disparo com acionamento digital;
- Desenvolvimento de um driver de acionamento com uso de sensor de tensão e corrente, visando uma maior precisão nos pulsos acionamento.

REFERÊNCIAS

AHMED, Ashfaq. **Eletrônica de Potência**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2000.

Disponível em:

<https://www.academia.edu/39623628/Eletronica_de_Potencia_Ashfaq_Ahmed>. Acesso em: 17 fev. 2021.

ALMEIDA, J. L. A. D. **Dispositivos Semicondutores: Tiristores Controle de Potência em CC e CA**. 13ª Edição, Érica, São Paulo, 2010. Disponível em:

<https://www.google.com.br/books/edition/_/HrdiDwAAQBAJ?hl=pt-BR&gbpv=1>. Acesso em: 18 fev. 2021.

BASCOPE, René Pastor Torrico. **Circuitos de Comando para Tiristor**. 21--. Departamento de Eng. Elétrica. Disponível em:

<https://drive.google.com/file/d/1JgIArHlkxaCA_7kMoZv_uakTi6mtY8uo/view?usp=sharing>. Acesso em: 17 fev. 2021.

BASCOPE, René Pastor Torrico; GOMES, Ícaro Silvestre Freitas; FONTENELE, Nestor Rocha Monte; OLIVEIRA, Túlio Naamã Guimarães. **Circuitos de Comando para MOSFETs e IGBTs de Potência**. Fortaleza-CE: Pet Elétrica, 2013. 24 slides, color.

Disponível em: <<https://docplayer.com.br/1852320-Circuitos-de-comando-para-mosfets-e-igbts-de-potencia.html>>. Acesso em: 12 maio. 2021.

BOSE, Bimal k. **Recent Advances in Power Electronics**. International Conference on Industrial Electronics - IECON'90, p. 829-838, November, 1990

CAPELLI, A. **Eletrônica de potência**. Rio de Janeiro: Ed. Antenna Edições Técnicas Ltda, 2006, 86p.

DATASHEET HP: **2.0 Amp Output Current IGBT Gate Drive Optocoupler: HCPL-3120**. Disponível em: <<https://drive.google.com/file/d/1Q9K3DTeaKW2jb4Gu-qZtkdNRlgsKpx-/view?usp=sharing>>. Acesso em: 07 abr. 2021.

DATASHEET SIEMENS: **Phase control IC: TCA 785**. Disponível em:

<https://drive.google.com/file/d/17W0_qJc00ARxSusfMme3VhmvDpSqCVTN/view>. Acesso em: 17 abr. 2021.

DATASHEET TECCOR ELECTRONICS: **Silicon Controlled Rectifiers: 2N6565**.

Disponível em:

<<https://drive.google.com/file/d/1HLrkvwCK0QlBzzpNTRgB5xTul8oYxjkd/view?usp=sharing>>. Acesso em: 07 abr. 2021.

HART, Daniel W. **Eletrônica de Potência: análise e projetos de circuitos**. Porto Alegre, Rs: Amgh Editora Ltda, 2011. Tradução de: Romeu Abdo. Disponível em:

<<https://drive.google.com/file/d/1a9EQ6y4p687fls1IKuiC0bklkTigaW1u/view?usp=sharing>>. Acesso em: 17 fev. 2021.

LENZ, André Luis. **Retificadores Controlados Monofásicos**. In: -. São Paulo: -, 2006. p. 11. Disponível em:

<https://drive.google.com/file/d/1NBigsus_QBH4XNifywgCOU1atKyMoKsh/view?usp=sharing>. Acesso em: 18 fev. 2021.

OLIVEIRA, R.A. **Utilizando Eletrônica com AO, SCR, TRIAC, UJT, PUT, CI 555, LDR, LED, IGBT, e FET de potência.** 2. ed. São Paulo: Érica, 2012, 204p.

POMILIO, J.A. **Eletrônica de Potência — Cap3.** Revisado em julho de 2014. Publicação FEEC 01/98. Disponível em:

<<https://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/elfiles/eltpot/cap3.pdf>>. Acesso em: 18 fev. 2021.

RASHID. **Eletrônica de Potência.** Editora Pearson Education do Brasil LTDA. 1998.

Disponível em: < <https://pt.slideshare.net/gerrosil/muhammadh-rashid-eletrnicadepotnciacircuitosdispositivoseaplicaes-46424810>>. Acesso em: 17 fev. 2021.

ANEXO A — DIAGRAMA DE BLOCOS DO TCA785 DA SIEMENS (DATASHEET SIEMENS)

SIEMENS

TCA 785

Functional Description

The synchronization signal is obtained via a high-ohmic resistance from the line voltage (voltage V_s). A zero voltage detector evaluates the zero passages and transfers them to the synchronization register.

This synchronization register controls a ramp generator, the capacitor C_{10} of which is charged by a constant current (determined by R_9). If the ramp voltage V_{10} exceeds the control voltage V_{11} (triggering angle φ), a signal is processed to the logic. Dependent on the magnitude of the control voltage V_{11} , the triggering angle φ can be shifted within a phase angle of 0° to 180° .

For every half wave, a positive pulse of approx. $30 \mu s$ duration appears at the outputs Q 1 and Q 2. The pulse duration can be prolonged up to 180° via a capacitor C_{12} . If pin 12 is connected to ground, pulses with a duration between φ and 180° will result.

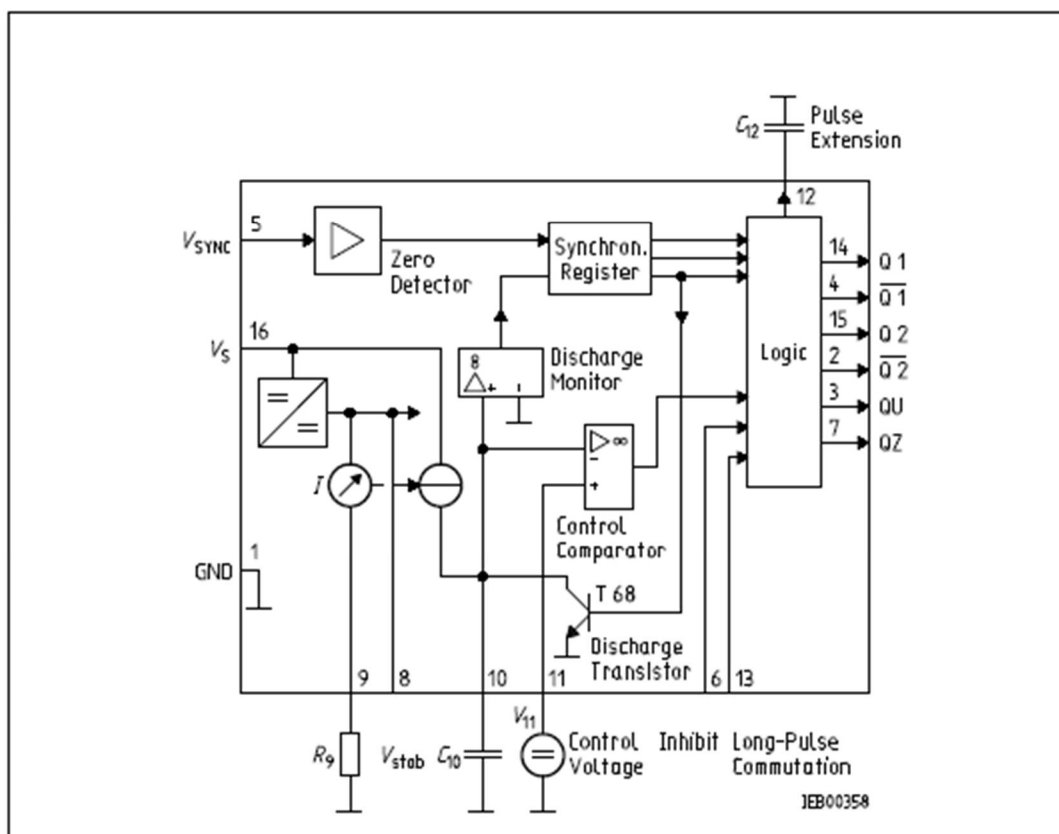
Outputs $\overline{Q1}$ and $\overline{Q2}$ supply the inverse signals of Q 1 and Q 2.

A signal of $\varphi + 180^\circ$ which can be used for controlling an external logic, is available at pin 3.

A signal which corresponds to the NOR link of Q 1 and Q 2 is available at output Q Z (pin 7).

The inhibit input can be used to disable outputs Q1, Q2 and $\overline{Q1}$, $\overline{Q2}$.

Pin 13 can be used to extend the outputs $\overline{Q1}$ and $\overline{Q2}$ to full pulse length ($180^\circ - \varphi$).



Block Diagram

Fonte: DATASHEET (TCA785 SIEMENS).

ANEXO B — AVALIAÇÕES MÁXIMAS E CARACTERÍSTICAS DO TCA785 (DATASHEET SIEMENS)

SIEMENS
TCA 785

Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Limit Values		Unit
		min.	max.	
Supply voltage	V_s	- 0.5	18	V
Output current at pin 14, 15	I_Q	- 10	400	mA
Inhibit voltage	V_i	- 0.5	V_s	V
Control voltage	V_{11}	- 0.5	V_s	V
Voltage short-pulse circuit	V_{13}	- 0.5	V_s	V
Synchronization input current	I_s	- 200	± 200	μA
Output voltage at pin 14, 15	V_Q		V_s	V
Output current at pin 2, 3, 4, 7	I_Q		10	mA
Output voltage at pin 2, 3, 4, 7	V_Q		V_s	V
Junction temperature	T_j		150	$^{\circ}C$
Storage temperature	T_{stg}	- 55	125	$^{\circ}C$
Thermal resistance system - air	$R_{th SA}$		80	K/W

Operating Range

Supply voltage	V_s	8	18	V
Operating frequency	f	10	500	Hz
Ambient temperature	T_A	- 25	85	$^{\circ}C$

Characteristics

 $8 \leq V_s \leq 18 \text{ V}; -25^{\circ}C \leq T_A \leq 85^{\circ}C; f = 50 \text{ Hz}$

Parameter	Symbol	Limit Values			Unit	Test Circuit
		min.	typ.	max.		
Supply current consumption S1 ... S6 open $V_{11} = 0 \text{ V}$ $C_{10} = 47 \text{ nF}; R_9 = 100 \text{ k}\Omega$	I_s	4.5	6.5	10	mA	1
Synchronization pin 5 Input current	$I_{s rms}$	30		200	μA	1
Offset voltage	ΔV_s		30	75	mV	4
Control input pin 11 Control voltage range	V_{11}	0.2		$V_{10 peak}$	V	1
Input resistance	R_{11}		15		k Ω	5
Semiconductor Group		4				

Fonte: DATASHEET (TCA785 SIEMENS).

ANEXO C — PRIMEIRA PARTE DOS CÁLCULOS FEITO EM *SOFTWARE* MATEMÁTICO

1) Valor de Tensão Média na Carga:

Para $\alpha := 0^\circ$

$$\alpha_1 := 0$$

$$V_{in} := 110 \text{ V}$$

$$V_{Lmed0} := 0.45 \cdot V_{in} \cdot (1 + \cos(\alpha)) = 99 \text{ V}$$

$$V_{Lmed0} = 99 \text{ V}$$

$$V_{Lp0} := V_{in} \cdot \sqrt{2} = 155.563 \text{ V}$$

$$V_{Lp0} = 155.563 \text{ V}$$

$$V_{Lrms0} := V_{in} \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right) + \left(\sin\left(\frac{2\alpha}{2\pi}\right)\right)} = 110 \text{ V}$$

$$V_{Lrms0} = 110 \text{ V}$$

Para $\alpha := 45^\circ$

$$\alpha_2 := \frac{\pi}{4}$$

$$V_{Lmed45} := \left(\frac{1}{\pi} \int_{\alpha_2}^{\pi} \sqrt{2} \cdot V_{in} \cdot \sin(\omega t) d\omega t \right) = 84.531 \text{ V}$$

$$V_{Lmed45} = 84.531 \text{ V}$$

$$V_{Lmed} := 0.45 \cdot V_{in} \cdot (1 + \cos(\alpha_2)) = 84.502 \text{ V}$$

$$V_{Lmed} = 84.502 \text{ V}$$

2) Valor de pico na Carga:

$$V_{Lp} := \sqrt{2} \cdot V_{in} = 155.563 \text{ V}$$

$$V_{Lp} = 155.563 \text{ V}$$

3) Valor Eficaz na Carga:

$$V_{Lrms} := V_{in} \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{\alpha_2}{\pi}\right) + \left(\frac{\sin(2\alpha_2)}{2\pi}\right)} = 104.885 \text{ V}$$

$$V_{Lrms} = 104.885 \text{ V}$$

4) Valor de Tensão Média de Entrada, de Pico e Rms, na Carga:

$$V_{in,med} := 0 \text{ V}$$

$$V_{in,pico} := V_{in} \cdot \sqrt{2} = 155.563 \text{ V}$$

$$V_{in,rms} := V_{in} = 110 \text{ V}$$

5) Valores de Resistência na Carga e em Laboratório:

$$P_{out} := 50 \text{ W}$$

$$R_{Lo} := \frac{V_{Lmed0}^2}{P_{out}} = 196.02 \text{ } \Omega$$

$$R_L := 200 \text{ } \Omega$$

6) Valor de Corrente Média, Eficaz e de Pico na Saída:

$$I_{Lmed} := \frac{V_{Lmed45}}{R_L} = 0.423 \text{ A}$$

$$I_{Lpico} := \frac{V_{Lp}}{R_L} = 0.778 \text{ A}$$

$$I_{Lrms} := \frac{V_{Lrms}}{R_L} = 0.524 \text{ A}$$

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

ANEXO D — SEGUNDA PARTE DOS CÁLCULOS EM SOFTWARE MATEMÁTICO

7) Valor de Corrente Média, Eficaz e de Pico na Entrada:

$$I_{in,med} := I_{Lmed} = 0.423 \text{ A}$$

$$I_{in,pico} := I_{Lpico} = 0.778 \text{ A}$$

$$I_{in,rms} := I_{Lrms} = 0.524 \text{ A}$$

8) Valores de Tensão de Pico Reverso e de Corrente Média, Eficaz e de Pico na Entrada dos Tiristores:

$$V_T(\text{reverso}) := -V_{in} \cdot \sqrt{2} = -155.563 \text{ V}$$

$$I_{Tmed} := \frac{I_{Lmed}}{2} = 0.211 \text{ A}$$

$$I_{Tp} := I_{Lpico} = 0.778 \text{ A}$$

$$I_{Trms} := \frac{I_{Lrms}}{\sqrt{2}} = 0.371 \text{ A}$$

10) Valores de Perdas nos Diodos:

$$V_T := 1.7 \text{ V}$$

$$P_T := V_T \cdot I_{Tmed} = 0.359 \text{ W}$$

11) Cálculo do Capacitor de Filtro:

$$\text{Frequência de Rede: } f := 60 \text{ Hz}$$

$$\text{Ondulação: } ond := 0.03$$

$$C := \frac{1}{2 \cdot f \cdot R_L \cdot ond} = (1.389 \cdot 10^3) \mu F$$

$$C := 1400 \mu F$$

11) Cálculo dos Resistores do optoacoplador e Corrente no gatilho do SCR

$$R_2 := 3.5 \text{ k}\Omega$$

$$V_{op} := 13.4 \text{ V}$$

$$V_{out}(T) := 0.6 \text{ V}$$

$$R_1 := \frac{(V_{op} \cdot R_2)}{V_{out}(T)} - R_2 = 74.667 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 := 75 \text{ k}\Omega$$

$$I(T) := \frac{V_{op}}{R_1 + R_2} = 170.701 \mu A$$

$$I(T) := 170 \mu A$$

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

ANEXO E — OPTOACOPLADOR HCPL3120 (DATASHEET HP)

2.0 Amp Output Current IGBT Gate Drive Optocoupler

Technical Data

HCPL-3120

Features

- 2.0 A Minimum Peak Output Current
- 15 kV/ μ s Minimum Common Mode Rejection (CMR) at $V_{CM} = 1500$ V
- 0.5 V Maximum Low Level Output Voltage (V_{OL}) Eliminates Need for Negative Gate Drive
- $I_{CC} = 5$ mA Maximum Supply Current
- Under Voltage Lock-Out Protection (UVLO) with Hysteresis
- Wide Operating V_{CC} Range: 15 to 30 Volts
- 500 ns Maximum Switching Speeds
- Industrial Temperature Range: -40°C to 100°C
- Safety Approval
UL Recognized - 2500 V rms for 1 minute per UL1577
CSA Approval
VDE 0884 Approved with $V_{ORM} = 630$ V peak (Option 060 only)

Applications

- Isolated IGBT/MOSFET Gate Drive
- AC and Brushless DC Motor Drives

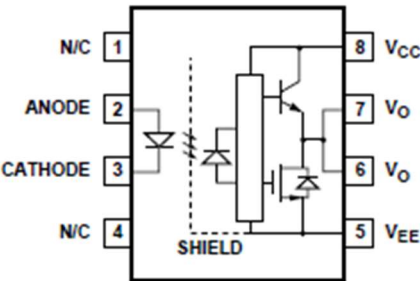
- Industrial Inverters
- Switch Mode Power Supplies (SMPS)

Description

The HCPL-3120 consists of a GaAsP LED optically coupled to an integrated circuit with a power output stage. This optocoupler is ideally suited for driving power IGBTs and MOSFETs used in

motor control inverter applications. The high operating voltage range of the output stage provides the drive voltages required by gate controlled devices. The voltage and current supplied by this optocoupler makes it ideally suited for directly driving IGBTs with ratings up to 1200 V/100 A. For IGBTs with higher ratings, the HCPL-3120 can be used to drive a discrete power stage which drives the IGBT gate.

Functional Diagram



TRUTH TABLE

LED	$V_{CC} - V_{EE}$ "POSITIVE GOING" (i.e., TURN-ON)	$V_{CC} - V_{EE}$ "NEGATIVE GOING" (i.e., TURN-OFF)	V_O
OFF	0 - 30 V	0 - 30 V	LOW
ON	0 - 11 V	0 - 9.5 V	LOW
ON	11 - 13.5 V	9.5 - 12 V	TRANSITION
ON	13.5 - 30 V	12 - 30 V	HIGH

A 0.1 μ F bypass capacitor must be connected between pins 5 and 8.

CAUTION: It is advised that normal static precautions be taken in handling and assembly of this component to prevent damage and/or degradation which may be induced by ESD.

ANEXO F — LISTA DE MATERIAIS DO DRIVER DE ACIONAMENTO

19 Resistors				
<u>Quantity</u>	<u>References</u>	<u>Value</u>	<u>Model</u>	<u>Unit Cost</u>
1	R1	33k		R\$0,40
2	R2,R3	10k		R\$0,40
1	R4	56k		R\$0,40
1	R5	2.2k		R\$0,40
1	R6	4.7k		R\$0,40
1	R7	22k		R\$0,40
4	R8,R9,R10,R11	1k		R\$0,40
4	R12,R13,R14,R15	75k		R\$0,40
4	R16,R17,R18,R19	3.3k		R\$0,40
Sub-totals:				R\$7,60
23 Capacitors				
<u>Quantity</u>	<u>References</u>	<u>Value</u>	<u>Model</u>	<u>Unit Cost</u>
5	C1,C14,C17,C20,C23	1nF		R\$0,10
6	C2,C5,C12,C15,C18,C21	2.2uF		R\$0,20
6	C3,C4,C13,C16,C19,C22	100nF		R\$0,10
1	C6	47nF		R\$0,20
1	C7	150pF		R\$0,10
4	C8,C9,C10,C11	100pF		R\$0,10
Sub-totals:				R\$3,00
6 Diodes				
<u>Quantity</u>	<u>References</u>	<u>Value</u>	<u>Model</u>	<u>Unit Cost</u>
6	D1,D2,D3,D4,D5,D6	1N4007		R\$0,10
Sub-totals:				R\$0,60
1 Transistors				
<u>Quantity</u>	<u>References</u>	<u>Value</u>	<u>Model</u>	<u>Unit Cost</u>
1	Q1	BC547		R\$0,40
Sub-totals:				R\$0,40
1 Integrated Circuits				
<u>Quantity</u>	<u>References</u>	<u>Value</u>	<u>Model</u>	<u>Unit Cost</u>
1	U1	TCA785	SIEMENS	R\$25,00
Sub-totals:				R\$25,00
31 Miscellaneous				
<u>Quantity</u>	<u>References</u>	<u>Value</u>	<u>Model</u>	<u>Unit Cost</u>
1	220	XFMR	TRAFO	R\$45,00
1	B1	BUTTON	Chave Táctil	R\$0,40
2	CABO1,CABO2	CABO_8PIN	Passo 2,54mm	R\$20,00
7	CARGA +,FASE,OP1+,OP2+,OP3+,OP4+,TCA+	BANANA - RED	Plug Banana	R\$2,00
3	FT1,FT2,FT3	470pF	Cap	R\$8,00
7	NEUTRO,REF CARGA,REF T1,REF T2,REF T3,REF T4,TCA-	BANANA - BLACK	Plug Banana	R\$2,00
4	OPTO1,OPTO2,OPTO3,OPTO4	HCPL-3120		R\$15,00
2	POT 1,POT 2	100k	TRIMPOT 100K	R\$3,00
4	SCR1,SCR2,SCR3,SCR4	2N5064		R\$4,00
Sub-totals:				R\$219,40
Totals:				R\$256,00