

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA

ANDRESSA SANTOS LEÃO

**IMPLEMENTAÇÃO DE UMA FONTE DE TENSÃO AJUSTÁVEL
BASEADA EM UM RETIFICADOR MONOFÁSICO COM
TIRISTORES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO
2017

ANDRESSA SANTOS LEÃO

**IMPLEMENTAÇÃO DE UMA FONTE DE TENSÃO AJUSTÁVEL
BASEADA EM UM RETIFICADOR MONOFÁSICO COM
TIRISTORES**

Proposta de Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso, do curso de Graduação em Engenharia Eletrônica do Departamento Acadêmico de Eletrônica (DA-ELN) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletrônico.

Orientador: Prof. Dr. Jakson Paulo Bonaldo

CAMPO MOURÃO
2017

TERMO DE APROVAÇÃO
DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO INTITULADO
Implementação de uma Fonte de Tensão Ajustável Baseada em um
Retificador Monofásico com Tiristores
por
Andressa Santos Leão

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no dia 12 de Junho de 2017 ao Curso Superior de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Campo Mourão. O Candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho _____ (aprovado, aprovado com restrições ou reprovado).

Prof. Fabio Pereira de Lima
(UTFPR)

Prof. Dr. Gilson Junior Schiavon
(UTFPR)

Prof. Dr. Jakson Paulonaldo
(UTFPR)
Orientador

RESUMO

LEÃO, Andressa Santos. IMPLEMENTAÇÃO DE UMA FONTE DE TENSÃO AJUSTÁVEL BASEADA EM UM RETIFICADOR MONOFÁSICO COM TIRISTORES. Trabalho de Conclusão de Curso - Bacharelado em Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão 2017.

As maior parte das distribuidoras de energia elétrica fornecem tensão alternada senoidal de 60 Hz, no entanto, muitos aparelhos necessitam de tensão contínua para operar. Diante disso este trabalho tem o objetivo de estudar e implementar uma fonte regulável baseada em um retificador totalmente controlado de onda completa com tiristores. O acionamento dos tiristores é feito através do circuito integrado TCA785, o qual gera pulsos em sincronismo com a tensão de rede.

Palavra-chave: Conversor CA-CC, Retificador Monofásico, Ponte Completa Controlada, Eletrônica de Potência, Controle de Fase.

ABSTRACT

LEÃO, Andressa Santos. IMPLEMENTATION OF A CONTROLLED VOLTAGE SOURCE BASED ON A SINGLE-PHASE RECTIFIER WITH THYRISTORS. Course Completion Work - Bachelor of Electronic Engineering, Federal Technological University of Paraná, College Campo Mourão 2017.

Most power distributors provide 60 Hz sine-wave voltage, however, many appliances require continuous voltage to operate. The aim of this work is to study and implement an adjustable source based on a fully controlled full wave rectifier with thyristors. The thyristors are driven via the integrated circuit TCA785, which generates pulses in synchronism with the mains voltage.

keywords: AC-DC Converter, Single Phase Rectifier, Full Controlled Bridge, Power Electronics, Phase Control.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por ter me iluminado durante toda minha vida acadêmica. Agradeço também à todos os meus amigos e familiares que diretamente e indiretamente contribuíram para este trabalho.

Gostaria de agradecer também à todos meus professores da graduação que muito agregaram para minha formação, em especial ao meu orientador Prof. Dr. Jakson Bonaldo, cuja orientação foi imprescindível para a realização deste trabalho.

Agradeço também ao meu namorado Gustavo Chichanoski, pelo apoio e compreensão.

Por fim, agradeço a UTFPR a Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Campo Mourão, pela disponibilização de sua estrutura.

A todos, muito obrigado.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama de blocos do retificador de onda completa.	13
Figura 2 – Simbologia do SCR e suas junções.	15
Figura 3 – Curva ideal do tiristor.	17
Figura 4 – Curva característica do tiristor.	18
Figura 5 – Modelo com dois transistores de um tiristor.	18
Figura 6 – Efeitos da corrente no gatilho na tensão de bloqueio.	21
Figura 7 – Retificador monofásico de meia onda com carga puramente resistiva.	23
Figura 8 – Formas de onda do retificador de meia onda com carga resistiva.	23
Figura 9 – Retificador controlado monofásico de meia onda com carga indutiva.	24
Figura 10 – Formas de onda do retificador de meia onda com carga indutiva.	24
Figura 11 – Circuito retificador de meia onda controlado com diodo de circulação.	25
Figura 12 – Formas de ondas do retificador de meia onda com diodo de circulação.	26
Figura 13 – Característica de controle do retificador monofásico com carga resistiva.	27
Figura 14 – Retificador controlado em ponte completa com carga resistiva.	28
Figura 15 – Formas de onda do retificador controlado em ponte com carga resistiva.	28
Figura 16 – Retificador em ponte operando em condução descontínua.	29
Figura 17 – Formas de onda do retificador operando em condução descontínua.	30
Figura 18 – Formas de onda de um retificador em ponte operando em modo contínuo.	31
Figura 19 – Característica de controle de um retificador em ponte em condução contínua.	32
Figura 20 – Pinagem do CI TCA 785.	33
Figura 21 – Diagrama de blocos do CI TCA 785.	33
Figura 22 – Tensão de referência de sincronismo.	34
Figura 23 – Rampa de sincronismo.	34
Figura 24 – Circuito que define ponto de disparo.	35
Figura 25 – Circuito Snubber RC.	36
Figura 26 – Campos magnéticos em um núcleo EE e em um núcleo toroidal.	38
Figura 27 – Circuito com transformador de pulso para disparo do tiristor.	39
Figura 28 – Encapsulamento TIC 126.	40
Figura 29 – Esquema de Disparo TCA 785.	42
Figura 30 – Circuito de acoplamento dos sinais de disparo.	45
Figura 31 – Controle em malha aberta.	46
Figura 32 – Circuito Completo do protótipo do retificador.	48
Figura 33 – Foto da placa de potência.	49
Figura 34 – Foto da placa de ajuste do ângulo de disparo e fonte 12 V.	49
Figura 35 – Comparação entre a tensão de rede e a forma de onda no pino 5.	50
Figura 36 – Comparação entre a rampa sobre o capacitor e a onda no pino 5.	51
Figura 37 – Pulso no semiciclo positivo, no canal 1, e negativo, no canal 2.	52
Figura 38 – Rampa de sincronismo 1 e tensão de controle com o valor no máximo.	52
Figura 39 – Comparação da rampa de sincronismo com a tensão de controle a 0 V.	53
Figura 40 – Rampa de sincronismo, no canal 1, e pulso no pino 15, no canal 2.	53
Figura 41 – Saída do circuito no canal 1.	54
Figura 42 – Comparação da rampa de sincronismo com o pulso em 0°.	54

Figura 43 - Saída do circuito com angulo de 0° no canal 1.....	55
Figura 44 - Comparação da rampa de sincronismo com a tensão de controle a 5	
.....V.....	55
Figura 45 - Comparação da rampa de sincronismo com o pulso em 90°	56
Figura 46 - Saída do circuito com angulo de 90°	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados do TIC 126D.....	41
Tabela 2 - Descrição dos pinos do TCA785.....	41
Tabela 3 - Saída do conversor em malha aberta.....	47
Tabela 4 - Características da fonte ajustável.....	50

LISTA DE SÍMBOLOS

DAELN	Departamento de Engenharia Eletrônica
V_{cc}	Tensão de corrente constante
CA	Corrente alternada
CC	Corrente continua
CI	Circuito integrado
SCR	<i>Silicium silicon controlled rectifier</i>
TRIAC	<i>Triode for alternating current</i>
DIAC	<i>Diode for alternating current</i>
GTO	<i>Gate Turn-Off Thyristor</i>
MOS	Metal Oxide Semiconductor
V_{AK}	Tensão entre ânodo e cátodo
β	Ângulo de extinção
V_s	Voltage Suply
V_{CR}	Tensão sobre o capacitor C_R
R_L	Resistência na carga
T	Período
V_G	Tensão no gate
I_G	Corrente no gate
M	10^6
k	10^3
m	10^{-3}
μV	10^{-6}
n	10^{-9}
p	10^{-12}
A	Ampère
V	Volt
Ω	Ohm
F	Faraday

C	Celsius
H	Heinz
Hz	Hertz
$V_{CR_{max}}$	Tensão máxima sobre o pino 9 do TCA785
$V_{CR_{max}}$	Corrente máxima sobre o pino 9 do TCA785

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 JUSTIFICATIVA	13
1.2 OBJETIVOS	13
1.2.1 Objetivo geral	13
1.2.2 Objetivos específicos	13
1.3 METODOLOGIA	14
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1 INTRODUÇÃO	15
2.2 TIRISTORES	15
2.2.1 Modelo ideal do tiristor	16
2.2.2 Curva característica do tiristor	16
2.2.3 Efeitos das capacitâncias	19
2.2.4 Disparo do tiristor	20
2.3 RETIFICADORES CONTROLADOS	21
2.3.1 Retificadores controlados de meia onda	22
2.3.1.1 Curva característica de um retificador de meia onda	26
2.3.2 Retificadores totalmente controlados de Ponte Completa	27
2.3.2.1 Operação com carga Resistiva	27
2.3.2.2 Operação com Carga Indutiva	29
2.3.2.3 Curva característica de um retificador em ponte completa	32
2.3.3 Circuito de Acionamento	32
2.3.4 Circuitos de proteção	36
2.3.5 Circuitos de Acoplamento	37
2.3.6 Circuito de Disparo	38
3 MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1 INTRODUÇÃO	40
3.2 ESCOLHA DO TIRISTOR	40
3.3 PROJETO DO CIRCUITO DE ACIONAMENTO	41
3.4 PROJETO DO CIRCUITO DE ACOPLAMENTO DOS SINAIS DE DISPARO	43
3.5 PROJETO DO CIRCUITO DE ÂNGULO DE DISPARO	45
4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	49
4.1 PROTÓTIPO DO RETIFICADOR CONTROLADO	49
4.2 OPERAÇÃO EM MALHA ABERTA	50
5 CONCLUSÃO	57

1 INTRODUÇÃO

O sistema elétrico de distribuição fornece tensão alternada devido à vantagens na transmissão. No entanto, muitos aparelhos utilizam tensões contínuas necessitando assim que se faça a conversão da tensão alternada para tensão contínua. Essa conversão é feita através de conversores CA-CC, também conhecidos como retificadores.

Os retificadores podem fornecer uma tensão contínua de saída fixa ou ajustável, dependendo dos elementos utilizados na retificação. O diodo é utilizado quando não se necessita variar o valor médio da tensão de saída. Entretanto, quando é necessário controlar a tensão de saída utiliza-se transistores ou tiristores. Desta forma, classificamos os retificadores em não-controlados, onde apenas o diodo realiza a retificação, e em controlados, nos quais se faz uso de dispositivos controláveis (tiristores ou transistores). Há ainda retificadores híbridos que mesclam dispositivos controlados e não controlados (POMILIO, 2006).

Em muitas aplicações é necessário controlar o valor médio da tensão de saída dos retificadores. Destacam-se aplicações tais como carregamento de baterias, controle de velocidade de motores CC, acionamento de algumas máquinas CA e retificação em sistemas de transmissão em corrente contínua. O controle da tensão de saída se torna possível através dos retificadores controlados por fase, nos quais o tiristor é o elemento retificador. Atualmente retificadores a tiristor são utilizados principalmente em aplicações de alta potência, devido a sua robustez em comparação com outras alternativas.

O primeiro dispositivo capaz de realizar a retificação controlada era uma válvula com um determinado tipo de gás em seu interior chamada de Thyatron, no entanto, as válvulas de modo geral, traziam várias limitações, (DIAS, 2010). Com o desenvolvimento dos semicondutores surgiu o tiristor, o que representou um grande avanço para a eletrônica de potência.

Os tiristores são uma família de dispositivos semicondutores formados por quatro camadas, de estrutura PNPN, contendo três terminais: anodo, catodo e gatilho. O tiristor é ligado por um pulso enviado ao gatilho, no qual, pode-se controlar o ângulo de disparo deslocando este pulso no tempo. O tiristores são desligados através da comutação natural da rede ou de outro tiristor.

Os retificadores controlados são simples, baratos e na maioria dos casos possuem uma eficiência acima de 95%, sendo assim, extremamente utilizados nas indústrias, destacando-se o caso de acionamento de motores de corrente contínua com velocidade variável, na faixa de potência fracionária ao nível de megawatts, (MOHAN TORE M. UNDELAND, 2003).

Diante da grande importância dos retificadores para eletrônica de potência, esse trabalho propõe a implementação de uma fonte de tensão ajustável baseada em um reti-

ficador monofásico com tiristores.

1.1 JUSTIFICATIVA

Os retificadores controlados com tiristores são amplamente utilizados em aplicações industriais e comerciais, principalmente no acionamento de máquinas CC com velocidade variável. Assim, justifica-se o estudo e implementação destes conversores estáticos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem por objetivo geral estudar e projetar uma fonte de tensão regulável baseada em um retificador monofásico de ponte completa com tiristores.

O projeto consiste na implementação de um retificador monofásico regulável de ponte completa com carga resistiva utilizando tiristores. A ponte de tiristores será acionada através do circuito integrado TCA 785, o qual gera pulsos de disparo em sincronia com a tensão de rede. O ajuste do ângulo de disparo e conseqüentemente da tensão de saída, é feito através da regulagem da tensão de referência no pino 11 do TCA 785. O circuito de acionamento será conectado ao circuito de potência através de um transformador de pulsos com o objetivo de isolá-los galvanicamente. O diagrama de blocos do projeto é mostrado na figura [1](#).



**Figura 1 – Diagrama de blocos do retificador de onda completa.
Fonte: Autoria Própria.**

1.2.2 Objetivos específicos

Através deste trabalho busca-se alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Realizar um estudo sobre o funcionamento dos retificadores controlados com tiris-

tores afim de adquirir embasamento teórico para a confecção do circuito;

- Apresentar a fundamentação teórica elaborada por meio de revisão bibliográfica;
- Confeccionar a placa da fonte regulável;
- Analisar os resultados obtidos.

1.3 METODOLOGIA

O planejamento é indispensável na elaboração de qualquer projeto eletrônico, pois, permite identificar quais esforços serão necessários em cada etapa e quais os possíveis problemas serão enfrentados na implementação do circuito. No intuito de alcançar todos os objetivos, este trabalho foi dividido nas seguintes etapas:

- **Etapa 1:** Nesta etapa serão estudados textos acerca dos retificadores, dando sustentação teórica ao trabalho.
- **Etapa 2:** Cálculos dos componentes utilizados na confecção do circuito.
- **Etapa 3:** Nesta etapa será feito o desenho elétrico e a confecção das placas para a implementação do circuito.
- **Etapa 4:** Teste e ajuste das placas.
- **Etapa 5:** Nesta etapa será feita a análise dos resultados obtidos verificando se os objetivos desse trabalho foram alcançados.
- **Etapa 6:** Na última etapa será feita a redação do relatório final.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 INTRODUÇÃO

Um retificador é uma estrutura que converte tensão alternada em tensão contínua. Pode-se classificar os retificadores através do número de fases da tensão alternada de entrada (monofásico, trifásico, hexafásico, etc); da capacidade de ajustar a tensão de saída (controlado, não-controlado ou semi-controlado); e por meio da configuração dos dispositivos retificadores (meia onda, ponte completa).

2.2 TIRISTORES

O termo tiristor refere-se a uma família de dispositivos semicondutores compostos por quatro camadas do tipo PNPN. Os tiristores podem conduzir altas correntes e bloquear tensões de valores elevados sendo ideais para aplicações de alta potência. Alguns membros dessa família são: o TRIAC, DIAC , GTO, MOS e o SCR.

O SCR (silicon controlled rectifier) é o elemento mais importante dessa família, sendo este termo muitas vezes usado como sinônimo de Tiristor. Os SCRs são amplamente utilizados em aplicações de eletrônica de potência, sendo o controlador elétrico de uso mais difundido (AHMED, 2000).

Os tiristores possuem três terminais, que são: anodo, catodo e gatilho. A figura 2 mostra a simbologia do dispositivo, as suas camadas e os terminais.

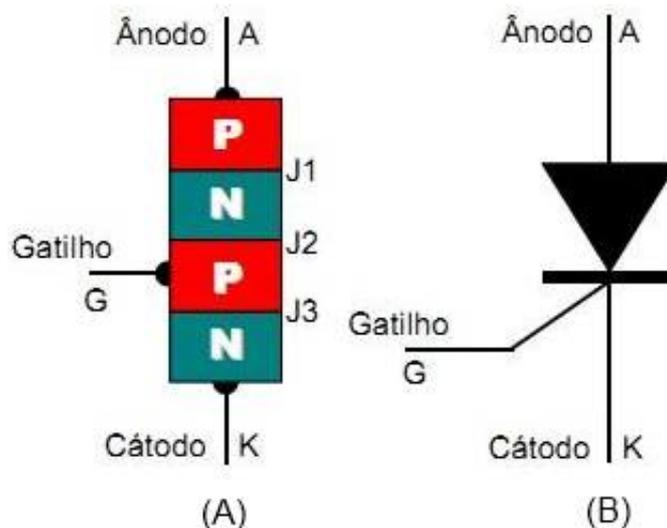


Figura 2 – Simbologia do SCR e suas junções.
Fonte: (SANTOS, 2013).

Para que um tiristor conduza é necessário que se aplique uma corrente no gatilho, gerada pela diferença de potencial entre o gatilho e o catodo, quando a tensão entre anodo-catodo for positiva. A partir do momento que o tiristor está no estado ligado, não é necessário manter um sinal no gatilho para que haja corrente entre o anodo e o catodo. Os tiristores são desligados somente quando a corrente no anodo for interrompida ou menor que um certo valor, chamado de corrente de manutenção (HART, 2012).

Segundo (Júnior, 2005), pode-se destacar algumas características dos tiristores:

- São chaves estáticas bi-estáveis, ou seja, trabalham em dois estados: não condução e condução, com a possibilidade de controle da entrada em condução;
- Em muitas aplicações podem ser modelados como chaves ideais, mas há limitações no uso deste modelo na prática;
- São semicondutores de silício. O silício é empregado devido à sua alta capacidade de potência e capacidade de suportar altas temperaturas;
- Possuem resistência elétrica variável com a temperatura;
- São aplicados em fontes de tensão reguladas, controles de motores e relés, Choppers (variadores de tensão CC), Inversores CC-CA, Ciclo-conversores (variadores de frequência), carregadores de baterias, circuitos de proteção, controles de iluminação, aquecedores e de fase, entre outras.

2.2.1 Modelo ideal do tiristor

No modelo ideal, mostrado na figura 3, desde que não haja sinal de disparo no gatilho, o tiristor é capaz de bloquear altos valores de tensão reversa e direta. Quando acionado pelo gatilho, passa para o estado ligado e funciona como um diodo ideal, ou seja, bloqueia valores altos de tensões reversa e conduz correntes elevadas sem perdas quando polarizado diretamente.

2.2.2 Curva característica do tiristor

O modelo ideal muitas vezes não é suficiente para descrever o comportamento do tiristor, dessa forma, é necessário considerar mais parâmetros para sua modelagem.

A figura 4 mostra a curva característica do tiristor.

Ao se aplicar uma tensão positiva entre o anodo e o catodo, as junções J1 e J3 ficam diretamente polarizadas e a junção J2 fica reversamente polarizada. Desta forma, o

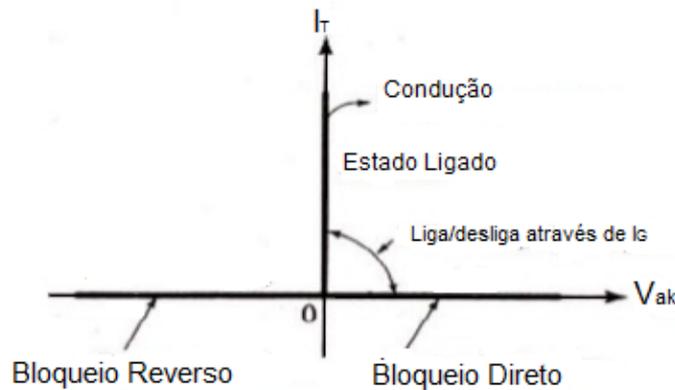


Figura 3 – Curva ideal do tiristor.

Fonte: (AHMED, 2000).

tiristor encontra-se no estado desligado e apenas uma pequena corrente de fuga flui entre o anodo e o catodo. Quando essa tensão direta (V_{AK}) atinge o valor da tensão de ruptura direta (V_{BO}), ocorre a chamada ruptura por avalanche, promovendo o movimento livre dos portadores de carga e conseqüentemente uma grande corrente entre anodo e catodo, fazendo com que o tiristor passe para o estado ligado.

O tiristor continua no estado ligado enquanto há fluxo de portadores na junção J2. Dessa maneira, para que o tiristor se mantenha no estado ligado é necessário que a corrente de anodo esteja acima do valor conhecido como corrente de travamento (I_L), caso contrário, o dispositivo desliga quando a tensão V_{AK} for reduzida. Assim, I_L é a mínima corrente de anodo para que o tiristor continue no estado de condução imediatamente após ter sido ligado.

Uma região de depleção aparece em torno de J2 caso a corrente direta de anodo esteja abaixo da corrente de manutenção (I_H). Portanto, pode-se definir a corrente de manutenção (I_H) como a mínima corrente necessária para manter o tiristor no estado de condução. A corrente de travamento (I_L) é maior que a corrente de manutenção (I_H).

Quando o tiristor é reversamente polarizado pela aplicação de uma tensão positiva entre o catodo e o anodo, apenas a junção J2 está diretamente polarizada e o tiristor entra no estado de bloqueio reverso. Uma corrente de fuga reversa flui através do dispositivo.

Ligar o tiristor aplicando uma tensão direta maior que V_{AK} danifica o componente, (RASHID, 1999). Por isso, usualmente o tiristor é ligado aplicando uma tensão positiva entre o gatilho e o catodo e assim, desde que a corrente de anodo seja maior que I_H , o dispositivo ficará ligado ainda que o sinal de gatilho seja removido. Esse comportamento do tiristor pode ser entendido através do modelo de dois transistor exibido na figura 5.

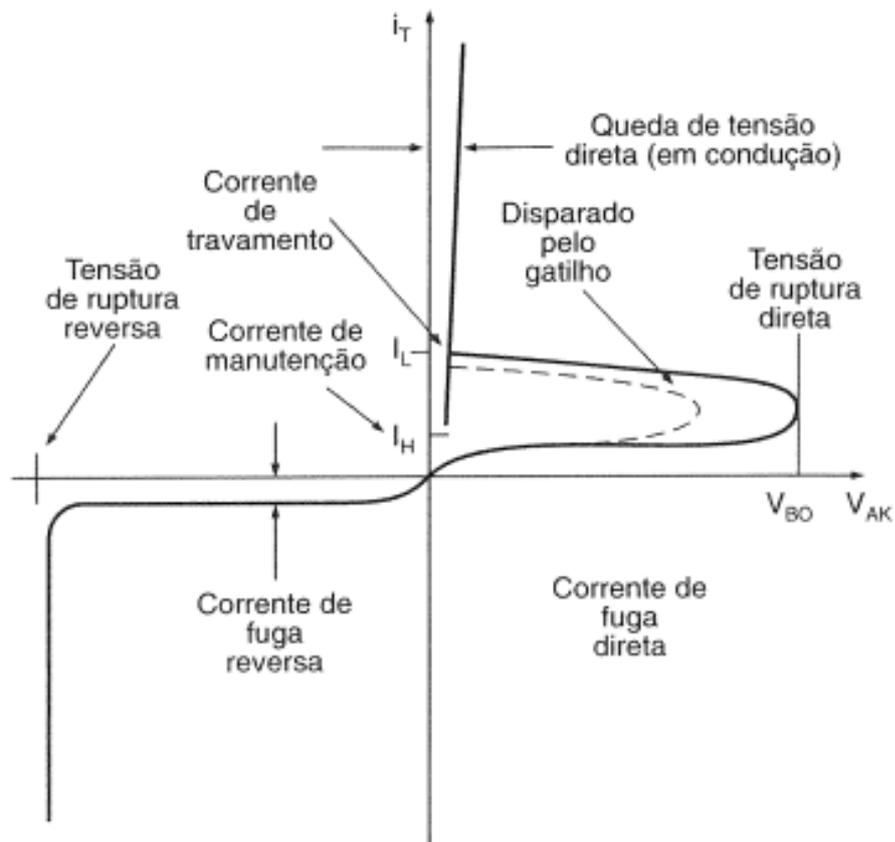


Figura 4 – Curva característica do tiristor.

Fonte: (AHMED, 2000).

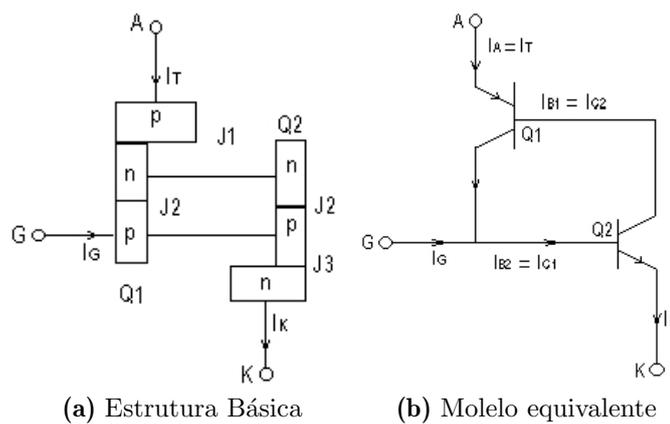


Figura 5 – Modelo com dois transistores de um tiristor.

Fonte: (RASHID, 1999).

Nos transistores, a corrente de coletor (I_C) é dada pela equação 2.1.

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO} \quad (2.1)$$

(I_E) é a corrente de emissor, (I_{CBO}) é a corrente de fuga da junção base coletor

e a constante α é definida pela relação [2.2](#)

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} \quad (2.2)$$

Analisando a figura [5](#), nota-se que a relação de corrente de anodo (I_A) e a corrente I_{C1} do transistor Q_1 pode ser relacionada por [2.3](#).

$$I_{C1} = \alpha_1 I_A + I_{CBO1} \quad (2.3)$$

Já para Q_2 a corrente de coletor é dada pela equação [2.4](#).

$$I_{C2} = \alpha_2 I_K + I_{CBO2} \quad (2.4)$$

Como a corrente I_A é a soma das correntes I_{C1} e I_{C2} , tem-se a equação [2.5](#).

$$\begin{aligned} I_A &= I_{C1} + I_{C2} \\ &= \alpha_1 I_A + \alpha_2 I_K + I_{CBO2} + I_{CBO1} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Ao aplicar uma corrente de gatilho I_G , a corrente de catodo passa a ser expressa pela relação [2.6](#).

$$I_k = I_A + I_G \quad (2.6)$$

Assim, resolvendo a equação [2.5](#) para I_A obtêm-se a equação [2.7](#).

$$I = \frac{\alpha_2 I_G + I_{CBO1} + I_{CBO2}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (2.7)$$

Por meio da equação [2.7](#) observa-se que há um efeito regenerativo ou de realimentação positiva, pois, α_1 varia com a corrente de emissor Q_1 , I_A ; e α_2 varia com a corrente de emissor de Q_2 : $I_K = I_A + I_G$. Desta maneira, quando a corrente de gatilho I_G aumenta, imediatamente I_A também aumenta e eleva os valores de α_1 e α_2 , onde o aumento do valor dessas constantes aumenta ainda mais I_A .

Uma vez que a soma de α_1 e α_2 se aproxima da unidade, o denominador da equação [2.7](#) tende a zero, resultando em uma grande corrente de anodo e assim, o tiristor é disparado com uma pequena corrente de gatilho.

2.2.3 Efeitos das capacitâncias

As capacitâncias das junções influenciam a curva característica do tiristor no regime transitório. Uma vez que o tiristor esteja no estado de bloqueio, a aplicação de uma

tensão com crescimento rápido causa um grande fluxo de corrente através das capacitâncias das junções. Expressa-se a corrente na junção j_2 através da equação [2.8](#)

$$i_{j2} = \frac{d(q_{j2})}{dt} = \frac{d}{dt}C_{j2}V_{j2} = V_{j2}\frac{dC_{j2}}{dt} + C_{j2}\frac{dV_{j2}}{dt} \quad (2.8)$$

Portanto, se a taxa de crescimento da tensão $\frac{dv}{dt}$ for elevada, i_{j2} será grande, ocasionando altas correntes de fuga I_{CBO1} e I_{CBO2} . Como visto na equação [2.7](#), valores elevados de I_{CBO1} e I_{CBO2} , podem fazer com que $(\alpha_1 + \alpha_2)$ tenda a unidade, levando ao disparo indesejado do dispositivo.

2.2.4 Disparo do tiristor

O tiristor é disparado quando a corrente de ânodo assume valores acima da corrente de manutenção (i_H). Além do disparo pela injeção de sinal no gatilho, o tiristor pode ser disparado de outras formas, o que geralmente é indesejado pois pode danificar o dispositivo.

- **Disparo por sobretensão:** Se a tensão direta entre o anodo e catodo assumir valores acima da tensão de ruptura direta, V_{BO} , o tiristor é disparado mesmo sem a aplicação de corrente no gatilho. Na prática, esse método de disparo é raramente utilizado pois pode levar a destruição do componente.
- **Disparo por variação de tensão:** Pode haver o efeito de cargas ou descargas entre as junções, fazendo com que circule corrente no ânodo mesmo com a ausência de sinal de disparo gatilho. Esse disparo normalmente é indesejado e é evitado utilizando um circuito *Snubber*.
- **Sobretensão:** O aumento de temperatura pode aumentar a corrente de fuga no tiristor, o que pode levar o denominador da equação [2.7](#) tender a zero, causando assim o disparo. Este tipo de disparo deve ser evitado pois danifica o dispositivo.
- **Incidência de Luz ou radiação:** O tiristor pode entrar em condução caso seja permitida a entrada de luz ou radiação no dispositivo. Um dispositivo chamado LASCR, faz uso dessa propriedade, permitindo o disparo por luz e pelo gatilho.
- **Disparo por corrente no gatilho:** Quando o tiristor está diretamente polarizado, o disparo pode ser feito pela injeção de corrente no gatilho, a qual é a gerada através da aplicação de tensão entre o gatilho e o catodo. Quanto maior a corrente no gatilho, menor será a tensão de bloqueio direto como pode-se ver na figura [6](#).

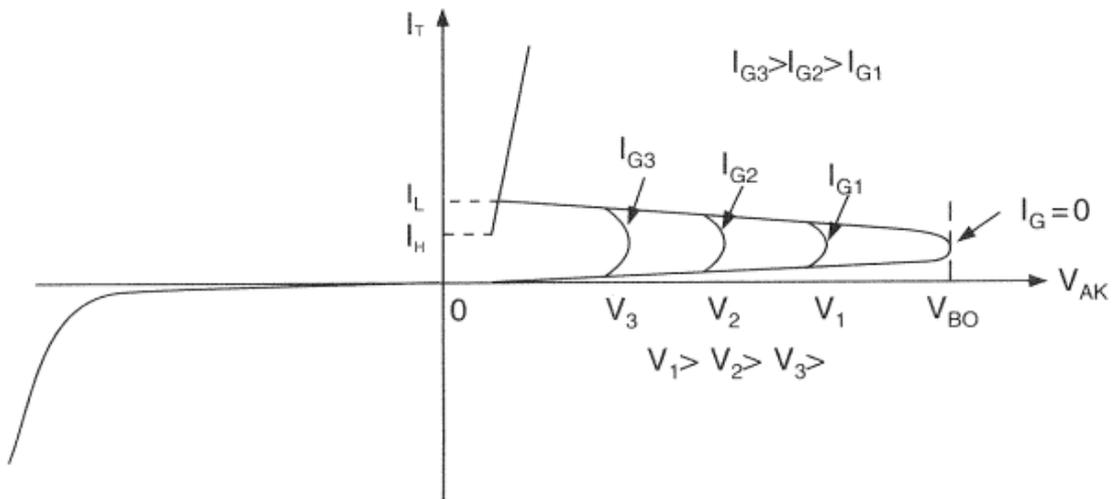


Figura 6 – Efeitos da corrente no gatilho na tensão de bloqueio.

Fonte: (RASHID, 1999).

2.3 RETIFICADORES CONTROLADOS

Os retificadores controlados por fase são projetados substituindo o diodo do circuito dos retificadores não-controláveis por tiristores. Este circuito passa a produzir uma tensão CC variável, através do ajuste do ângulo de disparo através de um sinal enviado ao gatilho do tiristor (AHMED, 2000).

Segundo (AHMED, 2000), pode-se classificar os retificadores controlados em dois tipos: totalmente controlados e semi-controlados. O totalmente controlado utiliza apenas tiristores para efetuar a retificação e, ao aplica-se uma tensão CA na entrada consegue controlar a tensão média CC de saída (V_O), desde um valor máximo positivo até um valor mínimo que pode ser inclusive, negativo. Porém a corrente (i_O) é unidirecional não podendo haver inversão no sentido da mesma, mesmo que por poucos instantes. Desta forma, é dito que estes retificadores operam em dois quadrantes do plano tensão x corrente (POMILIO, 2006).

Nota-se que quando a retificação implica em valores positivos de V_O , o fluxo de energia parte do lado CA para o lado CC operando em um processo chamado retificação. Já para os valores negativos de V_O o fluxo de energia se dá no sentido inverso, ou seja, a potência é transferida do lado CC para o lado CA. Este modo de operação é denominado inversão e só será possível se houver fontes de energia no lado CC.

Em aplicações onde é preciso operar em quatro quadrantes é feita a conexão em antiparalelo, ou costa para costa, de dois retificadores operando em dois quadrantes. Um exemplo dessa situação é o controle de motores CC com frenagem regenerativa (MOHAN TORE M. UNDELAND, 2003).

Se metade dos tiristores de um circuito retificador for substituída por diodos, ele

passa a ser chamado de retificador semi-controlado. Esses circuitos permitem o ajuste da amplitude da tensão média de saída (V_O) apenas para valores positivos, no qual novamente a corrente não pode ter a polaridade invertida sendo assim, estes conversores operam somente em um quadrante (AHMED, 2000).

Analisou-se a topologia de meia onda e de onda completa dos circuitos retificadores controlados, diante das diferentes cargas acopladas a eles.

2.3.1 Retificadores controlados de meia onda

A topologia de meia onda raramente é utilizada, pois a corrente média de entrada desses circuitos não é nula causando uma iteração indesejada com os elementos magnéticos do circuito e assim, provocando a saturação dos mesmos. No entanto, sua análise oferece embasamento para configurações mais complexas.

- **Carga Resistiva:** A figura 7, mostra um retificador de meia onda com carga puramente resistiva e suas respectivas formas de onda, figura 8.

Diferentemente do comportamento do diodo, ao aplicar uma tensão positiva nos terminais do tiristor, este não conduz imediatamente. Para que haja condução é necessário que um impulso de corrente seja aplicado ao gatilho do tiristor. Este impulso é deslocado no tempo e aplicado em $\omega t = \alpha$, determinando o ângulo de disparo. Portanto, no intervalo de tempo $(0, \alpha)$ o tiristor encontra-se bloqueado (corrente na carga é nula) e no período (α, π) o tiristor conduz, e a tensão na carga é a mesma da fonte. No intervalo $(\pi, 2\pi)$ a tensão na fonte passa a ser negativa e o diodo fica bloqueado. O tiristor volta a conduzir no ciclo seguinte quando $\omega t = \alpha$ (BARBI, 2005). Desta forma, pode-se concluir que a partir da variação do ângulo de disparo, varia-se a tensão média na carga.

A tensão média na carga ($V_{O_{med}}$) pode ser descrita em função de do ângulo α e da tensão de pico da rede (V_m), resultando da expressão 2.9.

$$V_{O_{med}} = \frac{V_m}{2\pi} [1 + \cos(\alpha)] \quad (2.9)$$

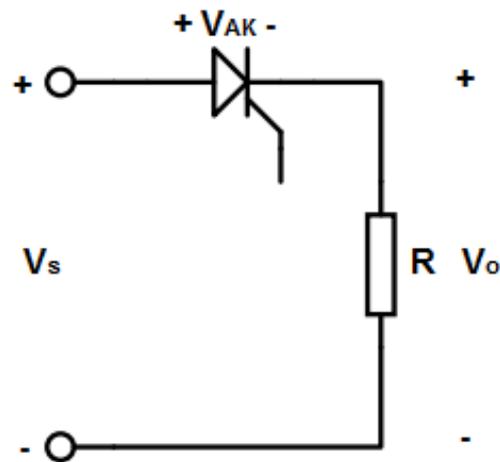


Figura 7 – Retificador monofásico de meia onda com carga puramente resistiva.
Fonte: Fonte: Autoria própria.

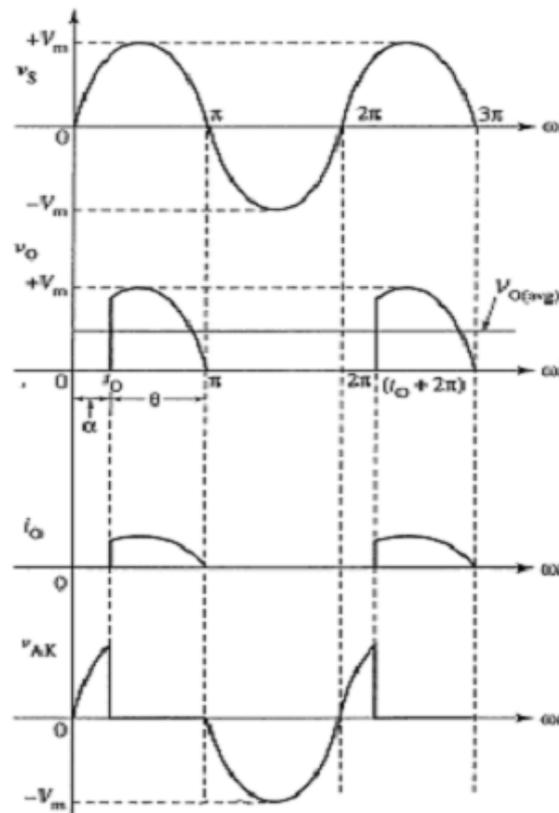


Figura 8 – Formas de onda do retificador de meia onda com carga resistiva.
Fonte: (AHMED, 2000)

- Carga Indutiva** Um retificador de meia onda com carga indutiva é mostrado na figura 9 e a sua forma de onda na figura 10. O tiristor é acionado com o ângulo de disparo α , porém a indutância forçará a corrente na carga a aumentar lentamente, defasando-se em relação à tensão. Quando a tensão aplicada é positiva, o tiristor está polarizado diretamente e o indutor armazenará energia. No semiciclo negativo, o indutor retornará a energia armazenada no campo, mantendo uma corrente direta

sobre a carga e a tensão igual a da fonte. Essa corrente flui através da carga até $\omega t = \beta$, denominado ângulo de extinção, a partir do qual o tiristor é bloqueado. Portanto no intervalo (π, β) a tensão na carga assume valores negativos (AHMED, 2000).

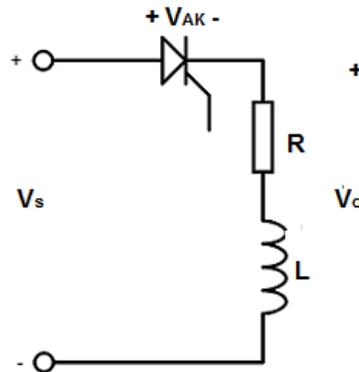


Figura 9 – Retificador controlado monofásico de meia onda com carga indutiva.

Fonte: (AHMED, 2000)

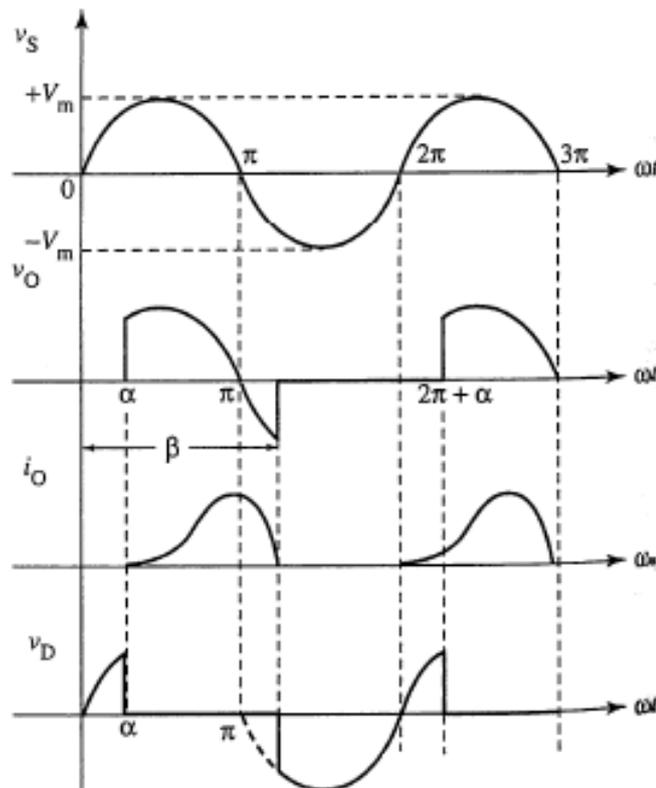


Figura 10 – Formas de onda do retificador de meia onda com carga indutiva.

Fonte: Autoria Própria

A tensão média na carga é descrita pela equação 2.10

$$V_{O_{med}} = \frac{V_m}{2\pi} [\cos(\alpha) - \cos(\beta)] \quad (2.10)$$

O ângulo de extinção β é obtido através do emprego da expressão abaixo (BARBI, 2005).

$$0 = \sin(\beta - \phi) - \sin(\alpha - \phi)e^{\frac{R}{wL}(\beta - \alpha)} \quad (2.11)$$

Onde ϕ pode ser escrito pela equação 2.12.

$$\phi = \arctan\left(\frac{wL}{R}\right) \quad (2.12)$$

A solução implícita da equação 2.11 nos permite extrair β em função de α e $\frac{R}{wL}$. No entanto, a solução analítica é impossível, sendo necessário utilizar um método numérico de solução de equações algébricas. Como método alternativo pode-se encontrar β através do ábaco de Pushlowski (BARBI, 2005).

Nota-se que a tensão média de saída é dependente da tensão de entrada, do ângulo de disparo α e do ângulo de extinção β sendo ele dependente da carga. Assim, ao variar a carga, varia-se o ângulo de extinção e conseqüentemente a tensão de saída.

- **Carga Indutiva com diodo de circulação:** O diodo de retorno também chamado de diodo de “Roda Livre”, corta a parte negativa da tensão de saída retirando a dependência entre a carga e o ângulo de extinção. O circuito e as formas de onda do retificador de meia onda controlado com diodo de circulação estão representados na figura 11 e figura 12 respectivamente.

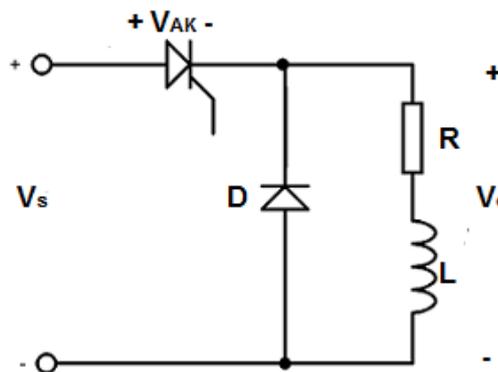


Figura 11 – Circuito retificador de meia onda controlado com diodo de circulação.

Fonte: Autoria própria.

O tiristor permanece bloqueado e a tensão na carga é zero no intervalo $(0, \alpha)$, até que seja enviado o sinal de disparo ao gatilho do tiristor. No intervalo (α, π) , a tensão na carga é igual a da fonte e o indutor armazena energia. No semiciclo negativo o tiristor é bloqueado, e o diodo de retorno é polarizado diretamente, fornecendo um caminho para a energia liberada pelo indutor. A corrente que circula através do diodo decai exponencialmente e a tensão na carga permanece nula. Este circuito

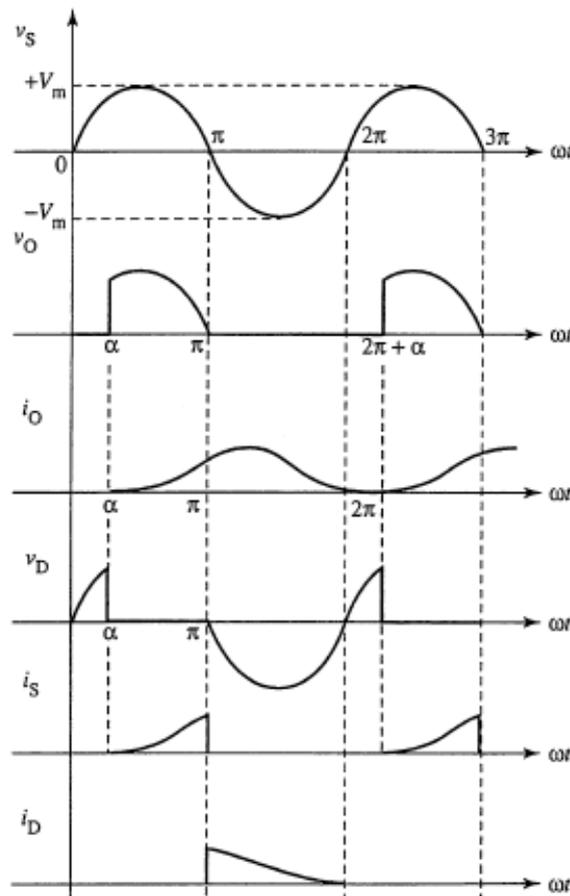


Figura 12 – Formas de ondas do retificador de meia onda com diodo de circulação.

Fonte: (AHMED, 2000).

opera no modo de condução descontínua caso o ângulo de disparo seja muito grande ou se a constante de tempo ($\frac{L}{R}$) for muito pequena, levando a corrente da carga a se anular antes do próximo disparo. A tensão média na carga depende apenas do ângulo α , sendo a mesma do retificador controlado com carga puramente resistiva. Desta forma, a tensão de saída neste retificador é independente do ângulo de extinção β e da da carga acoplada a ele. A tensão na carga é descrita por [2.13](#).

$$V_{O_{med}} = \frac{V_m}{2\pi} [1 + \cos(\alpha)] \quad (2.13)$$

2.3.1.1 Curva característica de um retificador de meia onda

Nota-se que as maiores variações ocorrem em $\alpha = 0$, obtendo $V_{O_{med_{max}}} = \frac{V_m}{\pi}$ no qual a tensão de saída é a mesma dos retificadores de meia onda com diodo. A tensão

média normalizada para a operação em modo contínuo dada por [2.14](#)

$$\begin{aligned}
 V_n &= \frac{V_{O_{med}}}{V_{O_{med_{max}}}} \\
 V_n &= \frac{V_m [1 + \cos(\alpha)]}{2\pi} / \left(\frac{V_m}{\pi} \right) \\
 V_n &= \frac{1 + \cos(\alpha)}{2}
 \end{aligned}
 \tag{2.14}$$

A expressão V_n é a função de α denominada característica de controle do retificador monofásico . A figura [13](#) mostra essa função.

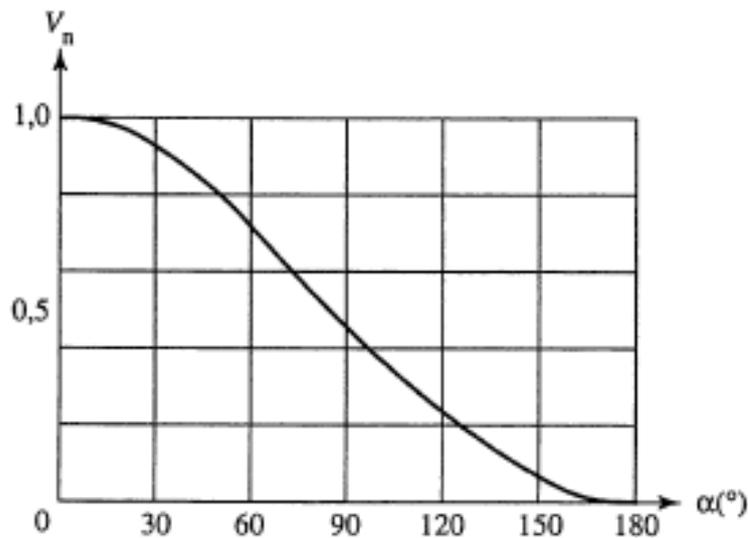


Figura 13 – Característica de controle do retificador monofásico com carga resistiva.
Fonte: (AHMED, 2000).

2.3.2 Retificadores totalmente controlados de Ponte Completa

Os retificadores controlados de ponte completa possuem várias vantagens quando comparados com os retificadores controlados de meia onda. Produzem menos ondulações na tensão de saída e principalmente possuem corrente média de saída nula o que evita iterações indesejadas com as partes magnéticas do circuito ([POMILIO, 2006](#)). Neste capítulo, abordou-se os retificadores totalmente controlados de ponte completa.

2.3.2.1 Operação com carga Resistiva

A ponte retificadora é composta por quatro tiristores que são acionados aos pares. A figura [14](#) mostra um retificador totalmente controlado de ponte completa e as formas de onda, são mostradas na figura [15](#).

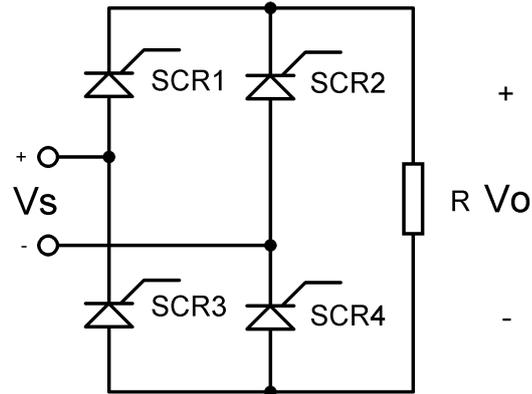


Figura 14 – Retificador controlado em ponte completa com carga resistiva.
 Fonte: (AHMED, 2000).

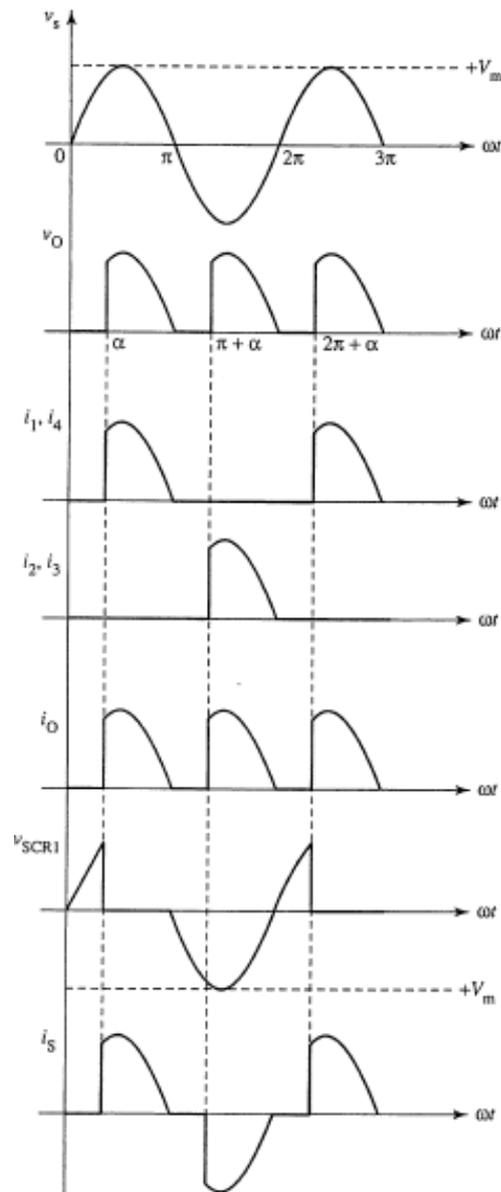


Figura 15 – Formas de onda do retificador controlado em ponte com carga resistiva.
 Fonte: (AHMED, 2000).

Os tiristores SCR1 e SCR4 são disparados em $\omega t = \alpha$. A tensão de saída acompanha a tensão da fonte chegando a zero em $\omega t = \pi$, momento em que os tiristores SCR1 e SCR4 são bloqueados. Nota-se que devido a natureza resistiva da carga, a corrente se anula junto com a tensão.

Os tiristores SCR2 e SCR3 são acionados no semiciclo negativo, em $\omega t = \pi + \alpha$. Este par de tiristores fornece um caminho entre a fonte e a carga de maneira que a tensão na carga seja sempre positiva. A expressão da tensão média na carga é descrita por [2.15](#) e a tensão RMS é dada por [2.17](#).

$$V_{O_{med}} = \frac{V_m}{\pi} [1 + \cos(\alpha)] \quad (2.15)$$

$$V_{O_{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} [V_m \cdot \sin(\theta)]^2 \cdot d\theta} \quad (2.16)$$

$$V_{O_{RMS}} = V_m \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{4\pi}} \quad (2.17)$$

A partir da expressão acima concluí-se que a tensão de saída pode ser controlada através da variação do ângulo de disparo α .

2.3.2.2 Operação com Carga Indutiva

Um retificador controlado em ponte completa com carga indutiva é representado na figura [16](#) e suas formas de onda estão representados na figura [17](#). Os tiristores SCR1 e SCR4 são acionados quando $\omega t = \alpha$ e a tensão de saída passa a acompanhar a tensão da fonte no entanto, devido a natureza indutiva da carga, a corrente tende a se atrasar em relação a tensão fluindo até $\omega t = \beta$, momento em que os dois tiristores são bloqueados.

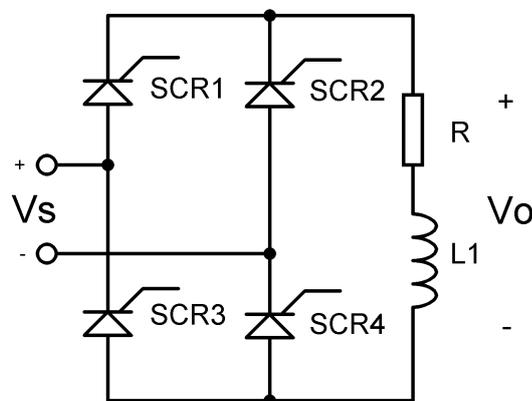


Figura 16 – Retificador em ponte operando em condução descontínua.
 Fonte: [\(AHMED, 2000\)](#).

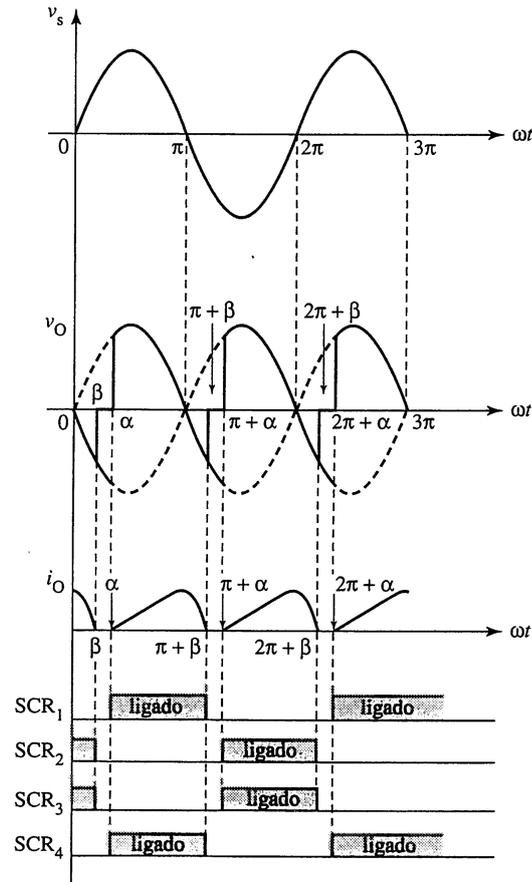


Figura 17 – Formas de onda do retificador operando em condução descontinua.
Fonte: (AHMED, 2000).

O disparo dos tiristores SCR2 e SCR3 ocorre em $\omega t = \beta + \pi$, os quais são bloqueados quando a corrente na carga for nula, ou seja, em $\omega t = \beta + 2\pi$.

Novamente, assim como no retificador controlado de meia onda, a tensão de saída depende do ângulo de extinção β como segue na expressão 2.18. A tensão de saída RMS é constante, independentemente do ângulo de disparo, e igual ao valor RMS da tensão de alimentação se a corrente de saída for contínua definida pela equação 2.19.

$$V_{O_{med}} = \frac{V_m}{\pi} [\cos(\alpha) - \cos(\beta)] \quad (2.18)$$

$$V_{O_{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} 2 \int_{\alpha}^{\beta} [V_P \sin(\omega t)]^2 d\omega t} \quad (2.19)$$

O valor de β pode ser encontrado por meio da resolução da expressão 2.20 ou através do ábaco de Puschowski (BARBI, 2005).

$$0 = \sin \beta - \phi - \sin(\alpha - \phi) e^{\frac{R}{\omega L}(\beta - \alpha)} \quad (2.20)$$

Onde:

$$\phi = \arctan\left(\frac{\omega L}{R}\right) \quad (2.21)$$

Essa topologia pode operar em modo contínuo ou descontínuo. Se o valor da indutância for baixo e o ângulo de disparo for mantido alto, a corrente se anulará antes do disparo do próximo par de tiristores. Desta forma, há um período em que nenhum tiristor está ligado e o retificador opera em modo descontínuo. Para altos valores de indutância ou para pequenos valores de α , a corrente na carga não se anula antes do próximo disparo e o retificador opera em modo contínuo. A figura 18 mostra as formas de onda de um retificador controlado de onda completa operando em modo contínuo (AHMED, 2000).

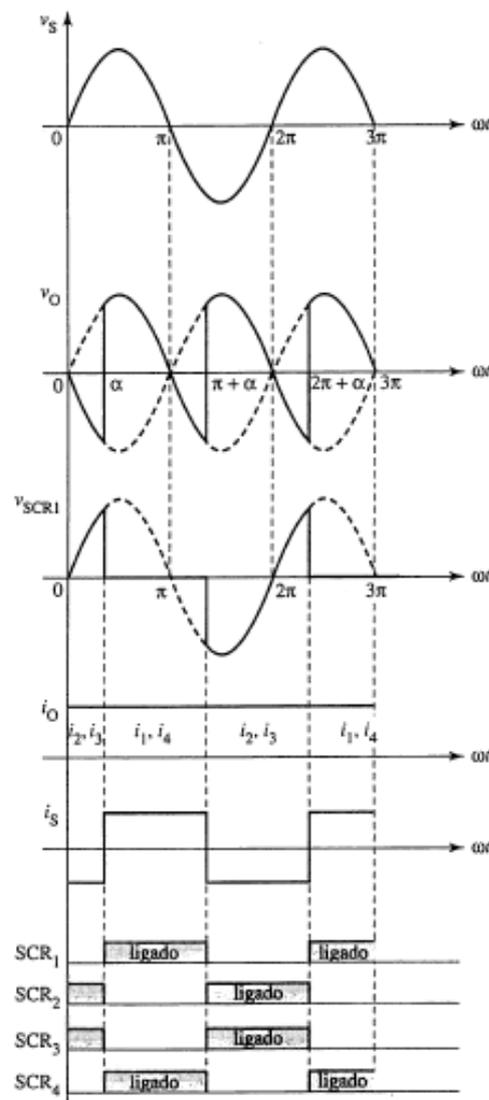


Figura 18 – Formas de onda de um retificador em ponte operando em modo contínuo.

Fonte: (AHMED, 2000).

2.3.2.3 Curva característica de um retificador em ponte completa

A tensão normalizada (V_n) dos retificadores em ponte com condução contínua é dado pela expressão [2.22](#).

$$V_n = \frac{V_{Omed}}{V_{Omax}} = \cos(\alpha) \quad (2.22)$$

$$V_{Omed} = \frac{2}{\pi} V_m [\cos(\alpha)] \quad (2.23)$$

$$V_{Omax} = \frac{2}{\pi} V_m \quad (2.24)$$

A curva característica da tensão média normalizada é dada pela figura [19](#).

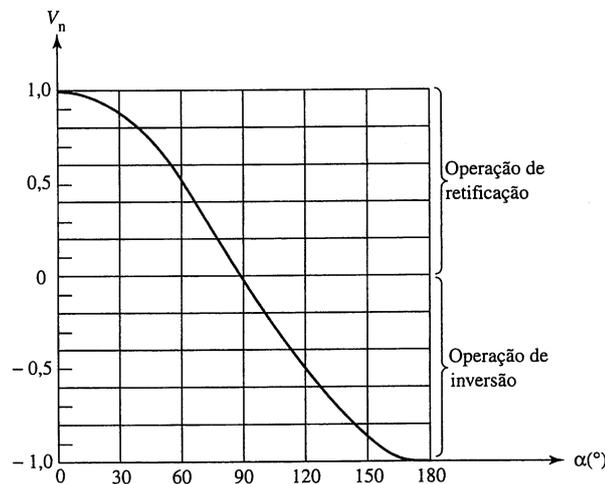


Figura 19 – Característica de controle de um retificador em ponte em condução contínua.

Fonte: [\(AHMED, 2000\)](#).

2.3.3 Circuito de Acionamento

Os circuitos pulsados são os mais usados para o disparo de tiristores pois, além de reduzirem a dissipação de calor no gatilho, permitem um controle mais preciso sobre o ponto de disparo do dispositivo. O isolamento e o acoplamento dos circuitos pulsados é simples quando comparado com disparos com sinais CC, visto que, o acoplamento magnético é inviável com esse tipo de sinal devido a possível saturação do transformador de pulso.

Os circuitos com tiristores são amplamente utilizados, assim dando a oportunidade do aparecimento de circuito integrados de acionamento, e desta forma, tornando os projetos mais compactos e confiáveis. Dentre esses circuitos, pode-se destacar o circuito

integrado TCA 785. A figura 20 mostra pinagem e a figura 21 o diagrama de blocos do TCA 785.

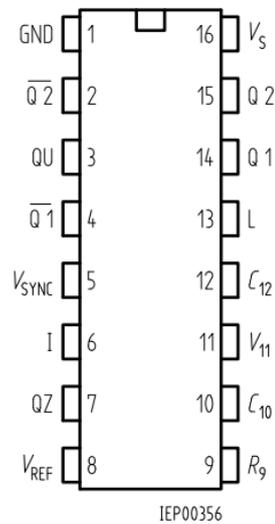


Figura 20 – Pinagem do CI TCA 785.

Fonte: (ALMEIDA, 2014)

Segundo (ALMEIDA, 2014), para o correto controle de fase, o circuito de disparo necessita ser sincronizado com a tensão da rede e assim evitar que o disparo dos tiristores ocorra aleatoriamente. O ponto de referência para o sincronismo é a passagem por zero. Em redes de 60 Hz isso ocorre a cada 8,33 ms. O TCA 785 detecta a passagem por zero (bloco DPZ), gerando um pulso de sincronismo toda vez que a tensão da rede passa por zero. A tensão de referência de sincronismo é inserida no pino 5, como mostra a figura 22.

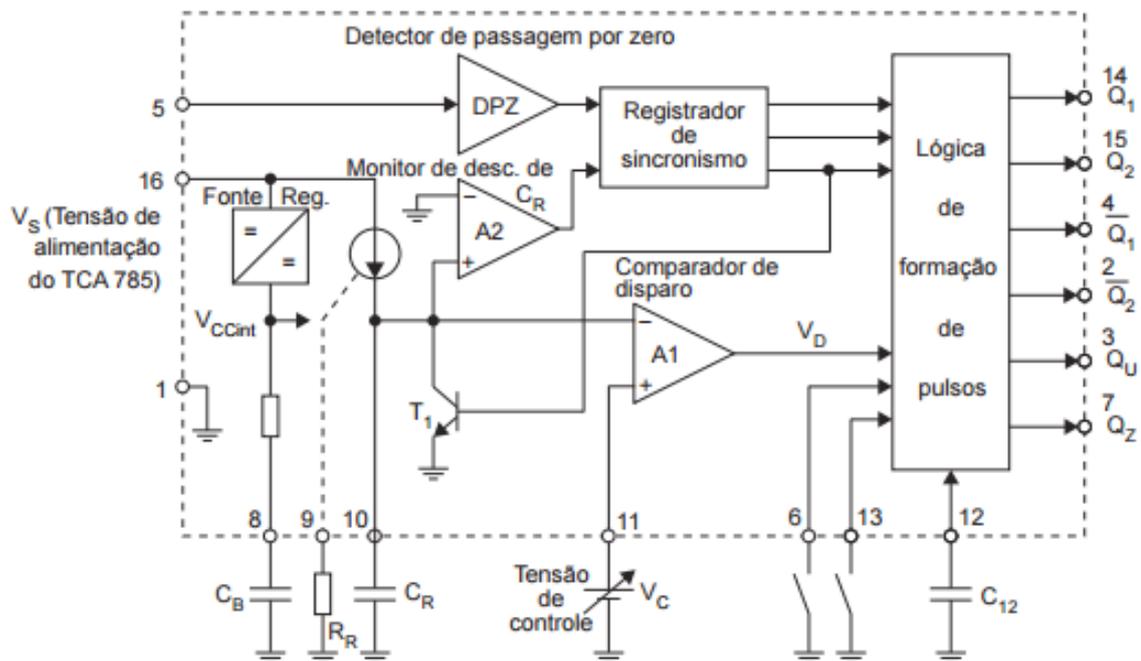


Figura 21 – Diagrama de blocos do CI TCA 785.

Fonte: (ALMEIDA, 2014).

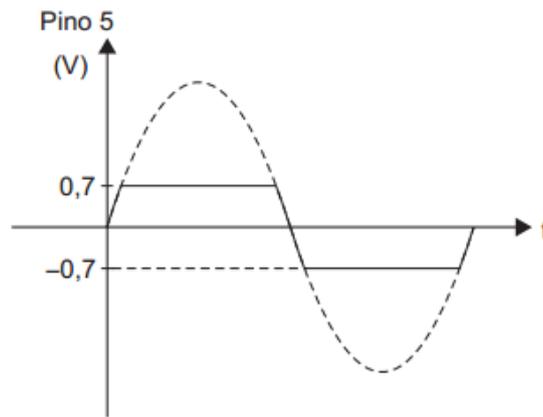


Figura 22 – Tensão de referência de sincronismo.

Fonte: (ALMEIDA, 2014).

A base do sincronismo é um gerador de rampa que fornece uma tensão proporcional ao aumento do tempo. O ajuste da rampa é feito através dos componentes R_r e C_r , nos pinos 9 e 10 respectivamente. Na figura 23 é mostrada a saída do gerador de rampa.

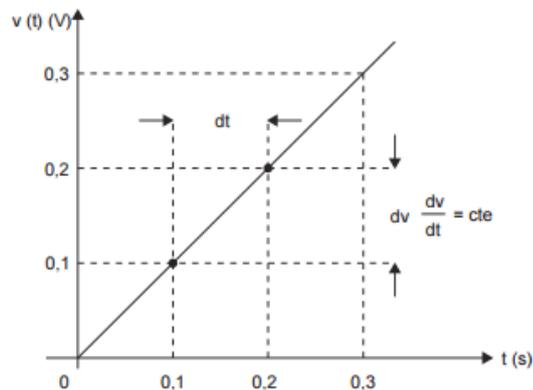


Figura 23 – Rampa de sincronismo.

Fonte: (ALMEIDA, 2014).

O capacitor, quando percorrido por uma corrente constante varia sua tensão proporcionalmente à variação do tempo. No TCA 785, o capacitor C_r é carregado linearmente por uma fonte de corrente constante controlada por R_r , de acordo com a expressão abaixo:

$$I_{CR} = \frac{K}{R_R} V_{CCINT} \quad (2.25)$$

Sendo:

$$V_{CCINT} = 3.1 \text{ V} \quad (2.26)$$

$$K = 1.1 \text{ V} \quad (2.27)$$

O valor da tensão V_{CR} da rampa cresce linearmente com o tempo de acordo com a expressão abaixo:

$$V_{CR} = \frac{I_{CR}}{C_R} t \quad (2.28)$$

O próximo passo é definir o ponto de disparo, para isso compara-se a tensão V_{CR} da rampa com a tensão de controle V_C no pino 11, conforme ilustra a figura 24.

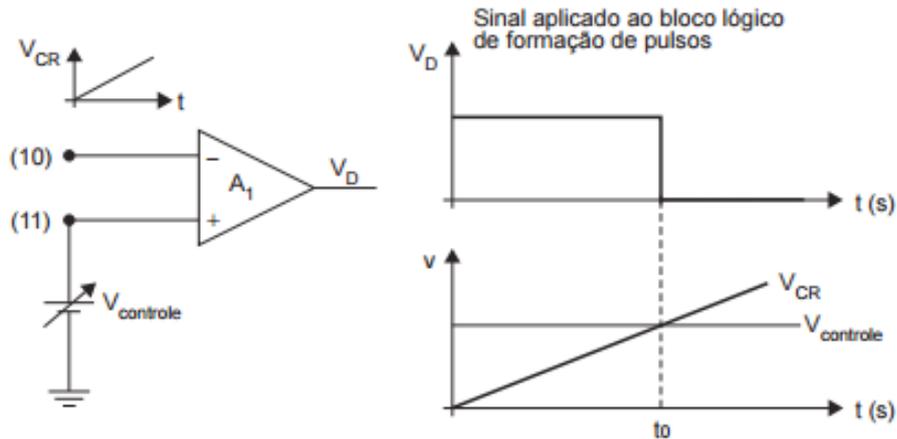


Figura 24 – Circuito que define ponto de disparo.

Fonte: (ALMEIDA, 2014).

O ângulo de disparo é definido no instante t_0 quando as tensões V_{CR} e V_C se igualam, e então a mudança no estado de V_d indicará ao bloco lógico de formação de pulsos que um pulso de sinal de disparo deve ser enviado.

A tensão da rampa V_{CR} está limitada a 2V abaixo da tensão de alimentação.

Capacitor se carrega até o próximo cruzamento de zero, onde o detector de passagem por zero informa o evento ao registrador de sincronismo, que gera um pulso de sincronismo que satura T1. Com T1 saturado, o capacitor C_r descarrega-se rapidamente, preparando-se para o início da próxima rampa. A informação de passagem por zero só é liberada após a descarga de C_r , monitorada pelo bloco A2, e monitor de descarga de C_r .

O TCA 785 possui uma saída Q1 (pino 14) e outra Q2 (pino 15) defasada em 180° . Enquanto Q1 serve para disparar um tiristor no semiciclo positivo, Q2 é usado para disparar um segundo tiristor no semiciclo negativo.

Por meio das informações anteriores, o bloco lógico de formação de pulsos coloca nas saídas a forma de pulso selecionada. A duração dos pulsos dependerá de C12 e do coeficiente B.

Trata-se a seguir dos circuitos necessários para a proteção, acoplamento e disparo do tiristor.

2.3.4 Circuitos de proteção

- **Proteção contra $\frac{di}{dt}$:** No início da condução do tiristor, a corrente de anodo fica concentrada em uma pequena área de semiconductor até que se espalhe por igual por todo dispositivo. Quando a taxa de crescimento da corrente é muito maior que a taxa de espalhamento da corrente ocorre um superaquecimento na área inicial onde a corrente flui. A taxa máxima de variação da corrente tolerada pelo componente é disponibilizada pelo fabricante. Em algumas aplicações é necessário inserir uma indutância em série para proteger o tiristor de altas taxas $\frac{di}{dt}$.
- **Proteção contra a $\frac{dv}{dt}$:** A aplicação de uma tensão entre o anodo e o catodo com uma taxa $\frac{dv}{dt}$ muito alta pode disparar erroneamente o tiristor, pois, quando diretamente polarizado, a junção J2 funciona como um capacitor carregado, na qual irá circular uma corrente no gatilho proporcional a variação da tensão no tempo. Conforme a equação [2.7](#), isto pode ser suficiente para disparar ou até mesmo danificar o componente. Para evitar os efeitos negativos de altos valores $\frac{dv}{dt}$, utilizou-se o circuito de proteção chamado *Snubber*, como exemplificado na figura [25](#).

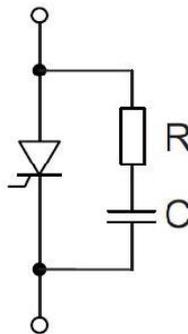


Figura 25 – Circuito Snubber RC.

Fonte: [\(AHMED, 2000\)](#).

Segundo [\(AHMED, 2000\)](#), os valores do circuito Snubber RC podem ser estimados através das equações [2.29](#), [2.30](#) e [2.31](#).

$$C = \frac{T}{R} \quad (2.29)$$

$$T = \frac{V_{Mx}}{\frac{dv}{dt}} \quad (2.30)$$

$$R = \frac{V_{Mx}}{I_D} \quad (2.31)$$

Onde V_{Mx} é a tensão máxima sob o qual o tiristor será submetido, R é a resistência da Carga e I_D é a corrente de descarga do Snubber.

- **Proteção do gatilho:** O gatilho do transistor precisa ser protegido de sobretensões, isto é feito colocando uma resistência em série com o gatilho. Esta resistência deve ser dimensionada para que a corrente de disparo fique entre os valores I_{Gmax} e I_{Gmin} fornecidos pelo fabricante.

$$R_G = \frac{V_G - V_{jgk}}{I_G} \quad (2.32)$$

No qual, V_{jgk} é a queda de tensão na junção entre a anodo e catodo.

2.3.5 Circuitos de Acoplamento

O tiristor é um dispositivo que controla correntes e tensões altas, enquanto o circuito de acionamento trabalha com pequenos sinais, para que as altas tensões e correntes do circuito de potência não interfiram no circuito de acionamento, é necessário isolar eletricamente o tiristor e seu circuito de controle mantendo-os acoplados. A isolação pode ser feita através do acoplamento óptico ou magnético.

- **Acoplamento Óptico:** Os acopladores ópticos são formados por uma fonte de radiação, denominada foto-emissor, e um por um elemento fotorreceptor. O fotorreceptor pode ser um Triac, um transistor ou até mesmo um SCR, arranjados em um mesmo encapsulamento.

A desvantagem desse circuito é a necessidade de uma fonte auxiliar para alimentar o opto acoplador. O optotriac, MOC 3011, ou similares, pode ser empregado como uma boa solução para esse problema.

- **Acoplamento Magnético:** O acoplamento magnético pode ser feito utilizando transformadores de pulso. O projeto do transformador deve garantir que o secundário e o primário sejam devidamente acoplados para transmitir os pulsos ao gatilho do tiristor e que a isolação entre os enrolamentos seja elevada (da ordem de KV).

Os transformadores de pulso garantem a isolação de dois ou mais enrolamentos com relação 1:1. Para sua construção pode-se utilizar núcleos toroidais de ferrite. A forma dos núcleos toroidais reduz a dispersão do campo magnético como pode-se observar na figura [26](#). Desta forma, pode-se instalar bobinais toroidais próximas de outras bobinas e de outros componentes sem que ocorram problemas com interação magnética.

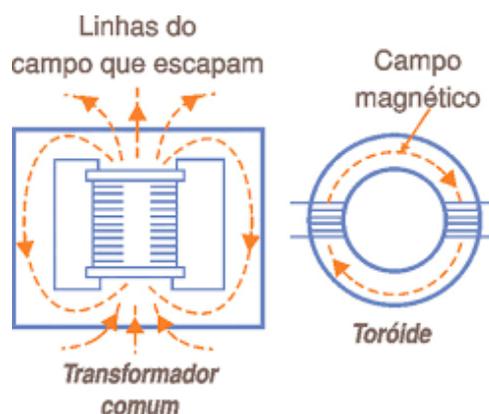


Figura 26 – Campos magnéticos em um núcleo EE e em um núcleo toroidal.
Fonte: (SANTOS, 2009).

2.3.6 Circuito de Disparo

O circuito de disparo, também conhecido como circuito de ataque, é responsável por enviar o sinal de acionamento ao gatilho do tiristor. O circuito de disparo deve atender aos seguintes requisitos:

- Isolar o circuito de comando e potência;
- Assegurar que o acionamento não ocorra em decorrência de sinais falsos ou ruídos;
- Em aplicações CA deve assegurar que o sinal no gatilho seja aplicado quando o tiristor estiver diretamente polarizado;
- Impedir tensões negativas entre o gatilho e o catodo;
- Assegurar o acionamento simultâneo dos tiristores ligados em série e paralelo;
- Evitar a saturação do transformador de pulso.

Segundo (WILLIAMS, 2006), o circuito da figura 27 pode ser utilizado para disparar o tiristor. Neste circuito, o diodo e o zener colocados em anti-série fornecem um caminho para o fluxo magnético no estado desligado, protegendo o transistor de uma possível saturação. Pode-se observar o circuito de proteção do gatilho, no qual o resistor $R2$ limita a corrente e o diodo protege contra uma possível inversão da tensão na porta.

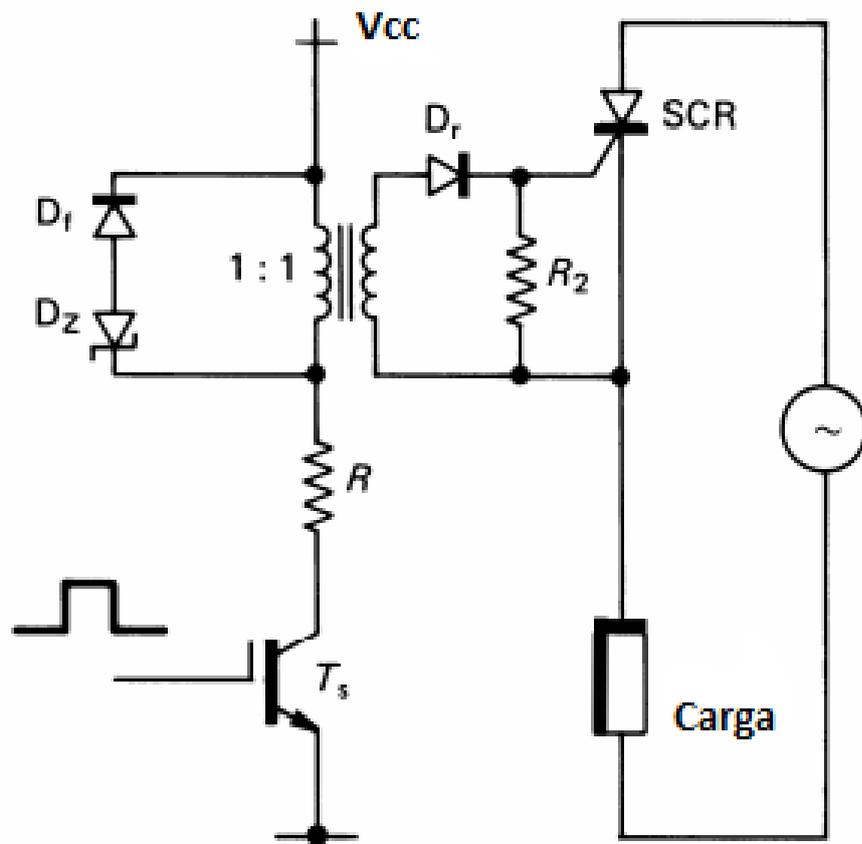


Figura 27 – Circuito com transformador de pulso para disparo do tiristor.

Fonte: Fonte: (WILLIAMS, 2006).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 INTRODUÇÃO

Após o estudo teórico dos principais elementos do retificador monofásico controlado, apresenta-se neste capítulo todos os métodos e materiais utilizados para a implementação de uma fonte de tensão controlada baseada em um retificador monofásico com tiristores.

A elaboração do protótipo se dividiu nas seguintes partes:

- Escolha do tiristor;
- Projeto do circuito de acionamento;
- Projeto do circuito de acoplamento dos sinais de disparo;

3.2 ESCOLHA DO TIRISTOR

O objetivo deste trabalho é projetar uma fonte que pode ser ligada a rede de distribuição de energia elétrica. Dessa maneira, o retificador deve ser capaz de operar em 60 Hz com uma tensão de entrada de 127 V . Afim de atender as especificações do projeto, foi escolhido o tiristor TIC 126D. Por possuir uma tensão de ruptura direta e reversa superior ao pico da rede (180 V). A tabela [1](#), que contém algumas informações extraídas da folha de dados do fabricante [\(LIMITED, 2001\)](#). A figura [28](#) mostra o encapsulamento do TIC 126D.

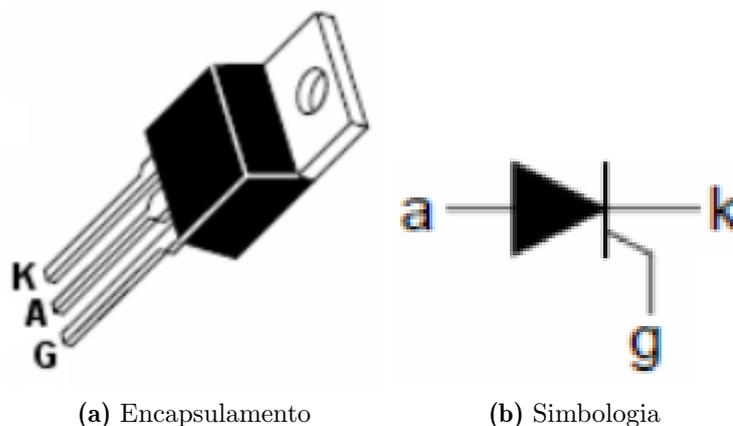


Figura 28 – Encapsulamento TIC 126.

Fonte: [\(LIMITED, 2001\)](#).

Tabela 1 – Dados do TIC 126D.

Fonte: (LIMITED, 2001)

Descrição	Valor	Unidade
Tensão de Ruptura Direta	400	V
Tensão de Ruptura Inversa	400	V
Corrente de Manutenção	100	mA
Corrente Típica de Disparo	5	mA
Corrente Média de anodo admissível	7,5	A
Degrau de Tensão máxima ($\frac{dv}{dt}$)	400	$\frac{V}{\mu s}$

3.3 PROJETO DO CIRCUITO DE ACIONAMENTO

Os pulsos de acionamento dos tiristores são gerados pelo circuito integrado TCA 785. Conforme já abordado neste trabalho, este CI é capaz de gerar dois pulsos defasados em 180° em sincronia com a rede. Um no semiciclo positivo (pino 15) e outro no semiciclo negativo (pino 14) da rede. A tabela 2 descreve as funções de cada pino deste circuito integrado e o encapsulamento pode ser visto na figura 20.

Tabela 2 – Descrição dos pinos do TCA785.

Fonte: (SIEMENS, 2005)

Pino	Simbolo	Função
1	GND	Referência
2	Q2	Saída 2 invertida
3	QU	Saída U
4	Q1	Saída 1 invertida
5	V_{SYNC}	Tensão de sincronismo
6	I	Inibidor
7	QZ	Saída Z
8	V_{REF}	Voltagem estabilizada
9	R_9	Resistência da rampa
10	C_{10}	Capacitância da rampa
11	V_{11}	Tensão de controle
12	C_{12}	Extensão do pulso
13	L	Pulso longo
14	Q1	Saída 1
15	Q2	Saída 2
16	V_S	Tensão de alimentação

Para que o TCA 785 consiga sincronizar os pulsos, é necessário utilizar um circuito ceifador. Os diodos D_1 e D_2 , que geram um sinal semelhante à forma de onda quadrada com amplitude variando entre +0,7 V e -0,7 V. As bordas de decida e subida sinalizam o cruzamento por 0 V e conseqüentemente dão início à rampa de sincronismo. A figura 29 mostra o circuito completo de acionamento que será usado no projeto. Os componentes

R_1 e C_1 formam um filtro passa-baixas usado para eliminar ruídos de alta frequência que poderiam ocasionar falsas detecções de passagem por zero.

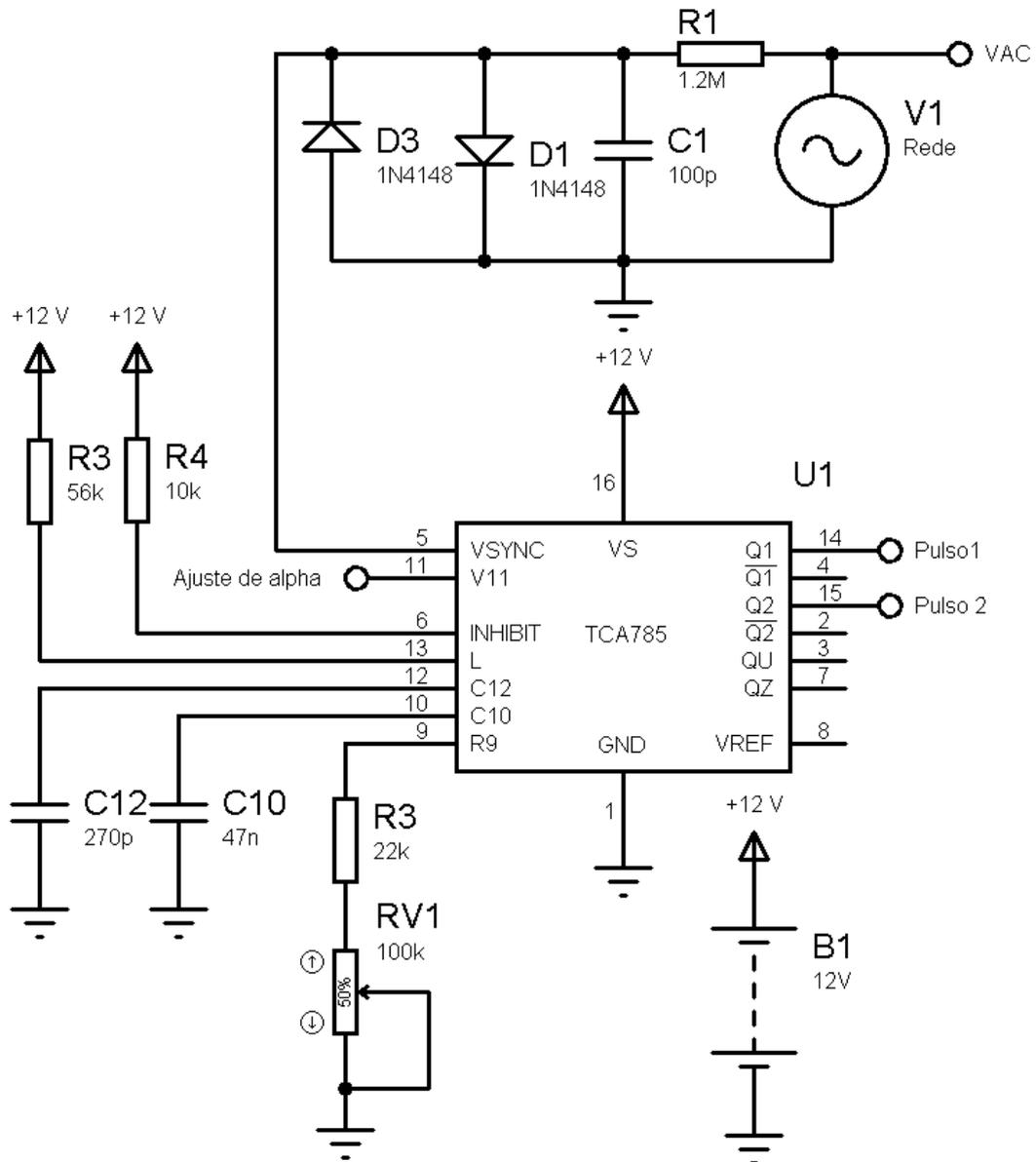


Figura 29 – Esquema de Disparo TCA 785.
Fonte: Autoria Própria.

No diagrama de blocos da figura 21 nota-se que o TCA 785 possui uma fonte de corrente constante que inicia o carregamento do capacitor externo do pino 10 quando é detectado o cruzamento por zero. Devido a ser carregado por uma fonte de corrente constante, a tensão sobre este capacitor apresenta o formato de uma rampa crescente que ascende até o próximo cruzamento por zero. Quando é novamente detectado o cruzamento por zero o transistor interno T_1 é saturado, provocando a abrupta descarga do capacitor. Imediatamente depois, o capacitor começa novamente a se carregar repetindo a rampa periodicamente, formado assim a onda dente de serra.

Segundo (ALMEIDA, 2014), o valor do capacitor C_3 deve estar entre 500 pF e $1 \text{ }\mu\text{F}$, já o resistor conectado no pino 9 deve ter valor entre $3 \text{ k}\Omega$ e $300 \text{ k}\Omega$. Desta maneira, foi escolhido um capacitor de 47 nF e através da manipulação das equações 2.28 e 2.25 foi calculado o valor da resistência do pino 9. Como $V_{CR_{max}}$ é limitado pela tensão de alimentação V_{cc} menos 2 V , tem-se:

$$\begin{aligned} V_{CR_{max}} &= V_{cc} - 2 \\ &= 12 - 2 \\ &= 10\text{V} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Pela equação 2.28 podemos encontrar a máxima corrente de descarga do capacitor.

$$\begin{aligned} \frac{i_{CR_{max}}}{47\text{n}}(8,33\text{m}) &= 8 \\ i_{CR_{max}} &= 45,14\mu\text{A} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Substituindo o valor da corrente na equação 2.25:

$$\begin{aligned} R_R &= \frac{1,1}{33,85\mu}(3,1) \\ &= 75,54\text{k}\Omega \end{aligned} \quad (3.3)$$

Para obter maior flexibilidade controle na calibração da rampa, no pino 9 foi colocado um resistor R_2 de $22 \text{ k}\Omega$ em série com um potenciômetro (RV1) de $100 \text{ k}\Omega$. A rampa gerada no pino 10 será comparada com a tensão de referência definindo assim, o momento do disparo.

A duração dos pulsos de disparo é determinada pela escolha do capacitor C_2 . De acordo com (ALMEIDA, 2014), se o pino 12 não for conectado teremos a largura de pulsos padrão do TCA 785 que é $30 \text{ }\mu\text{s}$. O aumento da duração do pulso pode ser feito inserindo um capacitor entre o pino 12 e o terra. Para um capacitor de 220 pF a largura de pulso é de $136 \text{ }\mu\text{s}$.

3.4 PROJETO DO CIRCUITO DE ACOPLAMENTO DOS SINAIS DE DISPARO

A figura 30 mostra o circuito de disparo dos tiristores.

O sinal de disparo proveniente do TCA 785 deve chegar aos gatilhos dos tiristores de maneira que não passe pela zona de disparo. Como anteriormente discutido, o circuito de acionamento deve ser isolado do circuito de potência. Os transformadores de pulso

fazem a isolamento galvânica, tendo assim um acoplamento magnético. O transformador de pulso foi construído utilizando núcleo de ferrite no formato de toroide.

Nos transformadores de pulso a relação de transformação é 1:1. Portanto, a tensão V_s sobre o secundário é igual a tensão sobre o primário V_p . O primário será alimentado com uma tensão próxima de V_{cc} , havendo uma queda provocada pela pequena resistência R_1 inserida no circuito para proteger o transistor TIP 31C.

$$\begin{aligned} V_p &= V_{cc} + 0,1 \\ &= 12 - 0,1 \\ &= V_s = 11,9 V \end{aligned} \quad (3.4)$$

Utilizaremos o transistor TIP31C operando na região de corte e saturação. As equações usadas para polarizar o transistor são:

$$V_{cc} = R_1 i_c + V_p + V_{ce} \quad (3.5)$$

$$V_{bb} = R_b(i_b + i_{r2}) + V_{be} \quad (3.6)$$

No estado de saturação a tensão entre coletor e emissor (V_{ce}) é zero. Substituindo o valor de V_{ce} na equação de saturação [3.5](#), obtêm-se a equação [3.9](#).

$$V_{cc} = (R_1)i_c + V_p + V_{ce} \quad (3.7)$$

$$V_{ce} = 0 V \quad (3.8)$$

$$V_{cc} = (R_1)i_c + V_p \quad (3.9)$$

Foi utilizado uma corrente no gatilho típica de 5 mA , que ao ser substituída na equação [3.9](#) resulta em uma resistência de 20Ω , como mostrado na equação [3.10](#).

$$\begin{aligned} 12 &= R_1(5m) + 11.9 \\ R_1 &= \frac{0,1}{5m} \\ R_1 &= 20 \Omega \end{aligned} \quad (3.10)$$

No secundário a tensão V_{GK} é de aproximadamente $12 V$ a resistência R_{GK} limita a corrente em 5 mA .

$$R_{GK} = \frac{12}{5m} = 2400 \Omega \quad (3.11)$$

A figura [30](#) mostra o circuito de acoplamento dos sinais de disparo. Foram utilizados valores comerciais para os componentes.

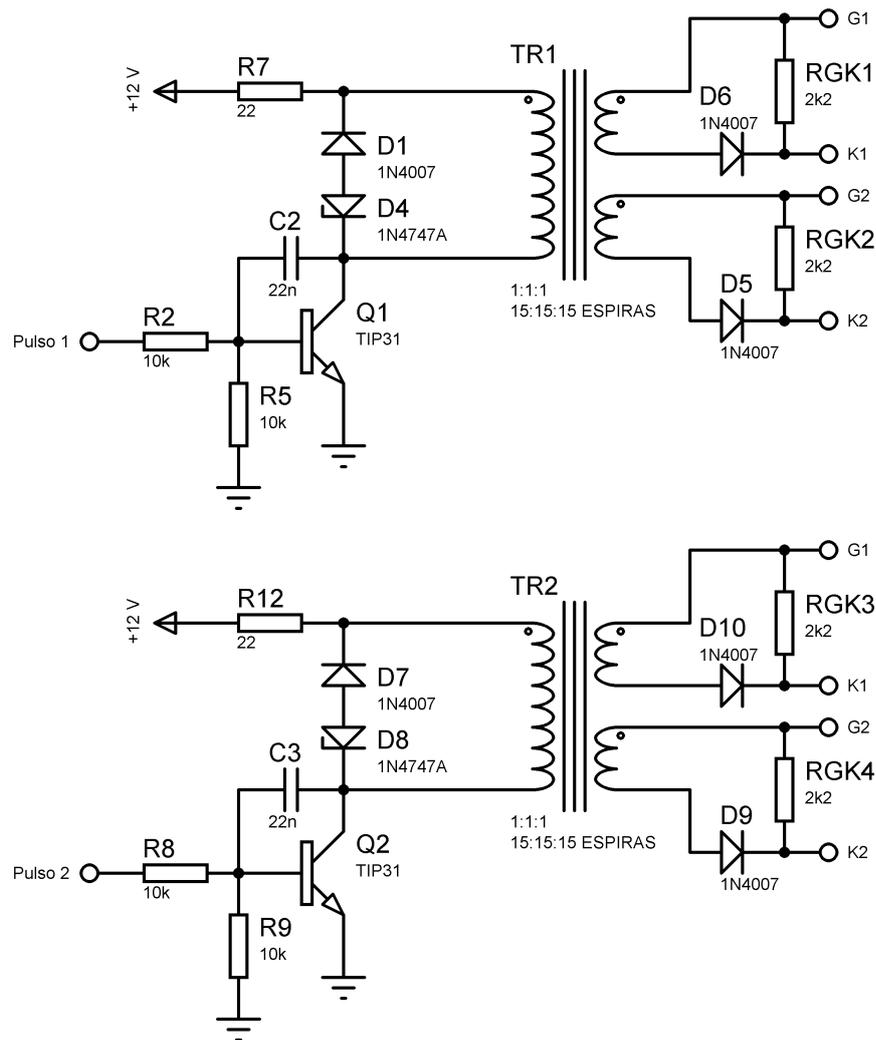


Figura 30 – Circuito de acoplamento dos sinais de disparo.
Fonte: Autoria própria.

3.5 PROJETO DO CIRCUITO DE ÂNGULO DE DISPARO

A tensão de controle do pino 11 é fornecida pelo circuito mostrado na figura [31](#). Como dito anteriormente, para o correto funcionamento do sistema, a máxima tensão sobre o potenciômetro POT2, de $10\text{ k}\Omega$ deverá ser de 10 V , pois o pico da onda triangular foi ajustado para 10 V . Logo a corrente através do potenciômetro é de 1 mA , como mostrado a equação [3.12](#).

$$\begin{aligned}
 V_{POT2} &= I_{POT2} R_{POT2_{max}} \\
 10 &= 10k (i_{POT2}) \\
 I_{POT2} &= \frac{10}{10k} \\
 I_{POT2} &= 1\text{ mA}
 \end{aligned}
 \tag{3.12}$$

Utilizando a lei de Kirchhoff para tensões, temos que a tensão sobre o resistor R_{C1} deverá ser de 2 V, como provado na equação 3.13.

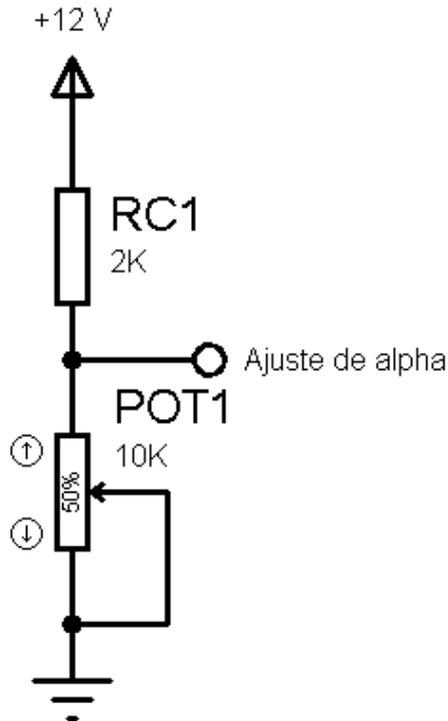


Figura 31 – Controle em malha aberta.
Fonte: Autoria própria.

$$\begin{aligned}
 V_{CC} &= V_{RC1} + V_{POT2} \\
 12 &= V_{RC1} + 10 \\
 V_{RC1} &= 12 - 10 \\
 V_{RC1} &= 2 \text{ V}
 \end{aligned}
 \tag{3.13}$$

Conhecendo a tensão e a corrente sobre o resistor, pode-se determinar sua resistência como demonstrado na equação 3.14.

$$\begin{aligned}
 V_{RC1} &= R_{C1} i_{RC1} \\
 R_{C1} &= \frac{V_{RC1}}{i_{RC1}} \\
 R_{C1} &= 2k\Omega
 \end{aligned}
 \tag{3.14}$$

Utilizando uma resistência R_{C1} de 2 k Ω , um potenciômetro de 10 k Ω e a tensão de alimentação V_{CC} de 12 V, podemos descrever a tensão aplicada no pino 11 através da

equação do divisor de tensão descrita em [3.15](#).

$$V_{Controle} = \frac{V_{CC}(V_{POT_2})}{V_{POT_2} + R_{C_1}} \quad (3.15)$$

Quando o potenciômetro POT_2 estiver com sua resistência igual a $10k\Omega$, teremos o valor máximo da tensão no pino 11, descrito pela equação [3.16](#).

$$\begin{aligned} V_{Controle} &= \frac{12 * 10k}{10k + 2k} \\ &= \frac{120k}{12k} \\ &= 10 V \end{aligned} \quad (3.16)$$

Porém, quando a resistência do potenciômetro POT_2 for ajustada para 0Ω , teremos o valor mínimo da tensão no pino 11, será dado por:

$$\begin{aligned} V_{Controle} &= \frac{12}{0 + 100} \\ &= \frac{0}{100} \\ &= 0 V \end{aligned} \quad (3.17)$$

A tensão de controle fornecida ao pino 11 é comparada com a rampa do pino 10 e assim, podemos ajustar linearmente ângulo de disparo e conseqüentemente a tensão de saída do retificador como mostra a tabela [3](#).

Tabela 3 – Saída do conversor em malha aberta.
Fonte: Autoria própria.

Resistência POT_2	Tensão de controle	Ângulo de disparo	Tensão média de Saída
10000 Ω	10 V	180°	0 V
3333 Ω	7,5 V	135°	16,64 V
1428 Ω	5 V	90°	57,17 V
526 Ω	2,5 V	45°	97,59 V
0 Ω	0 V	0°	114,34 V

O circuito completo do protótipo do retificador é mostrado na figura [32](#). O circuito será usado como base para demonstrar os resultados experimentais.

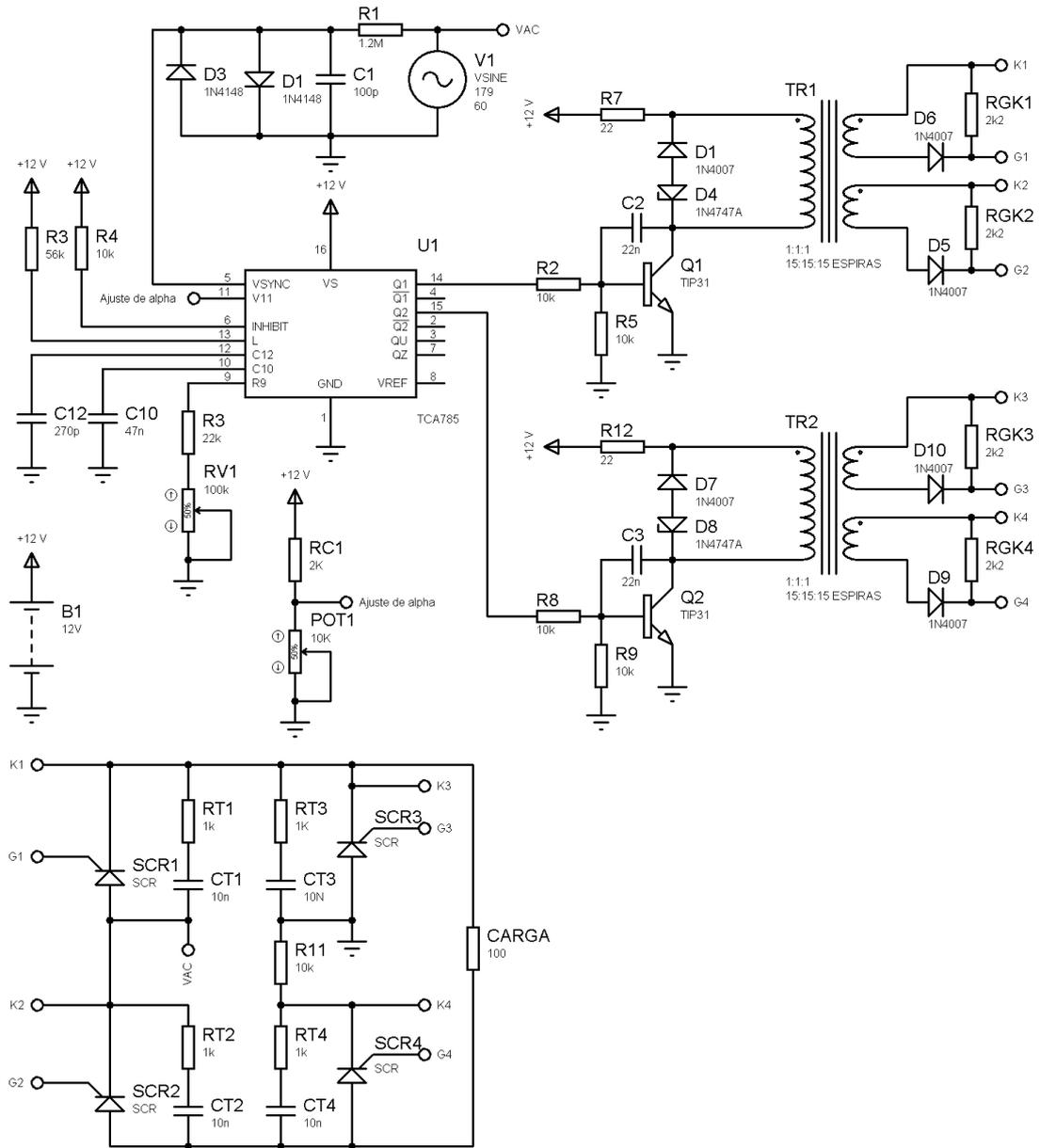


Figura 32 – Circuito Completo do protótipo do retificador.

Fonte: Autoria própria.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nessa seção são mostrados os resultados obtidos através da implementação do retificador monofásico com tiristores. O retificador foi acoplado à uma carga resistiva 100Ω e ligado à rede $127 V$ de frequência $60 Hz$.

4.1 PROTÓTIPO DO RETIFICADOR CONTROLADO

Para este trabalho foram confeccionadas duas placas, a primeira exibida na figura [33](#) contém o circuito de acionamento, acoplamento e o circuito de potência. A segunda placa acomoda o circuito de ajuste do ângulo de disparo, além da fonte de tensão CC de $12 V$, conforme figura [34](#).

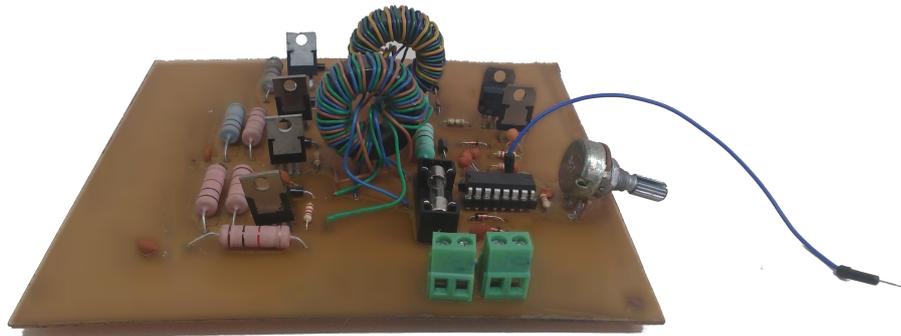


Figura 33 – Foto da placa de potência.
Fonte: Autoria própria.



Figura 34 – Foto da placa de ajuste do ângulo de disparo e fonte 12 V.
Fonte: Autoria própria.

A tabela [4](#) resume as principais características da fonte ajustável:

Tabela 4 – Características da fonte ajustável.
Fonte: Autoria Própria

Descrição	Valor	Unidade
Tensão eficaz de rede	127	V
Frequência de rede	60	Hz
Tensão média máxima	114,34	V
Corrente média máxima	5	A
Potência máxima	571,7	W

4.2 OPERAÇÃO EM MALHA ABERTA

Primeiramente foi testado o sincronismo do TCA 785 (pino 5), em relação a tensão da rede, que entrega uma tensão senoidal com 180 V de pico à uma frequência de 60 Hz.

O teste é realizado comparando a onda de sincronismo ceifada com a tensão da rede, como pode ser visto na figura 35. Se ambos os cruzamentos por zeros forem coincidentes, o circuito estará em sincronia, caso contrário, o sistema apresentará um erro no ângulo de disparo proporcional ao tempo de atraso dos cruzamentos.

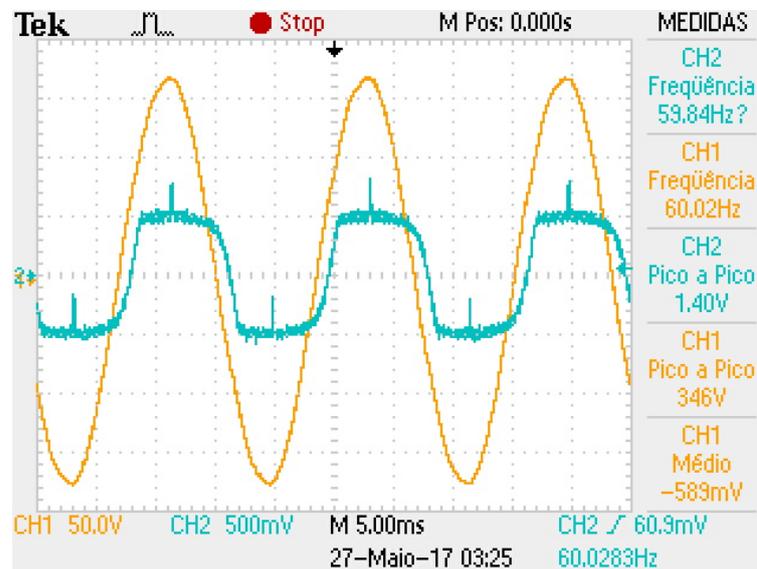


Figura 35 – Comparação entre a tensão de rede e a forma de onda no pino 5.
Fonte: Autoria própria.

Pode-se notar através da figura 35 que há um atraso de aproximadamente 1 ms entre a onda de sincronia e a tensão de rede. O qual é causado pelo filtro passa-baixa, através da equação 4.1 constatamos que estão dessincronizada causando um atraso de

21,6° no ângulo de disparo.

$$\begin{aligned}
 16.663 \text{ ms} &= 360^\circ \\
 1 \text{ ms} &= x \\
 \frac{x}{60} &= 0.36 \\
 x &= 21.6^\circ
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Por meio da figura 36 observamos que a rampa sobre o capacitor C_{10} tem início quando ocorre o primeiro cruzamento por zero da tensão de sincronismo, aumentando linearmente até um novo cruzamento por 0 V. A figura 37 mostra os pulsos gerados nos dois semiciclos, defasados em 180°.

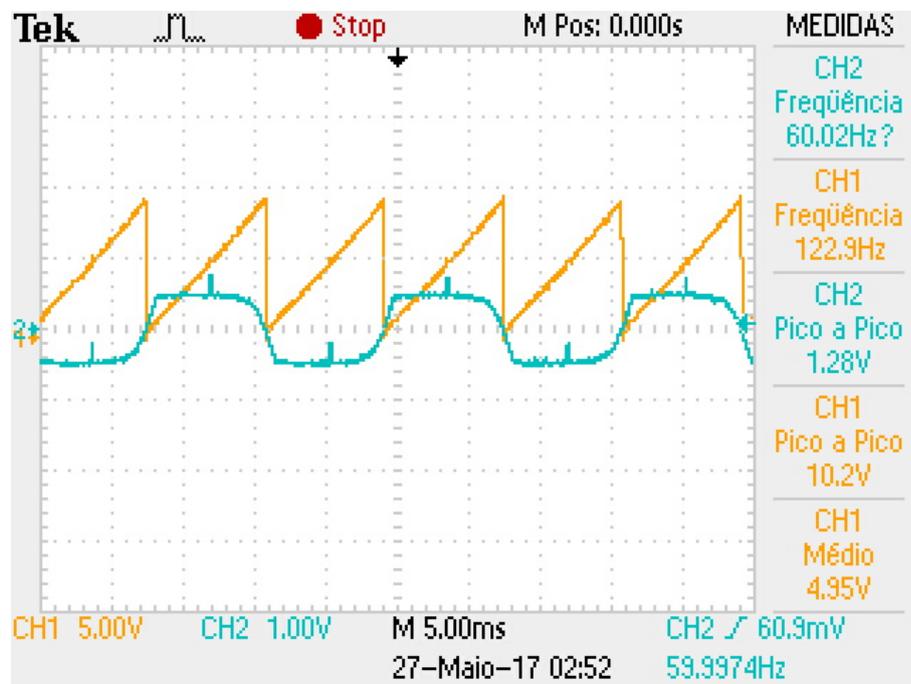


Figura 36 – Comparação entre a rampa sobre o capacitor e a onda no pino 5.
Fonte: Autoria própria.

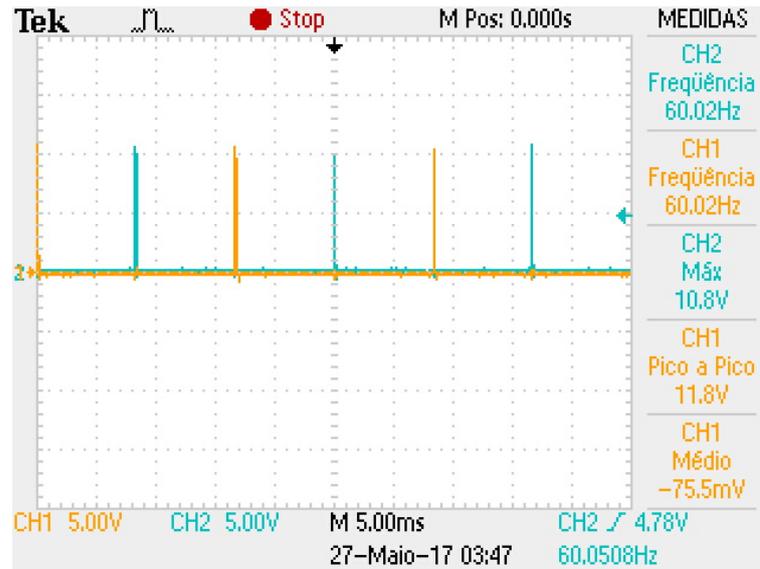


Figura 37 – Pulso no semiciclo positivo, no canal 1, e negativo, no canal 2.
Fonte: Autoria própria.

Também foi testado o comportamento da rampa de sincronismo e da tensão de controle do pino 11. A excursão do sinal de controle da base da onda triangular até o topo, indica que podemos controlar o ângulo de disparo de 0° até 180° em relação à onda de sincronismo do pino 5. Verificamos através das figuras 38 e 39 um comportamento satisfatório do circuito, no qual a tensão no pino 10 e a tensão no pino 11 variam de 0 V até 10 V.

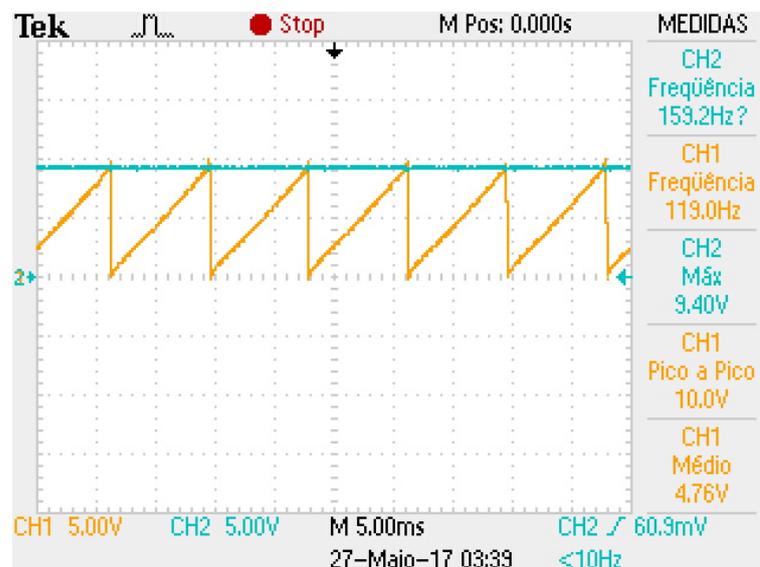


Figura 38 – Rampa de sincronismo 1 e tensão de controle com o valor no máximo .
Fonte: Autoria própria.

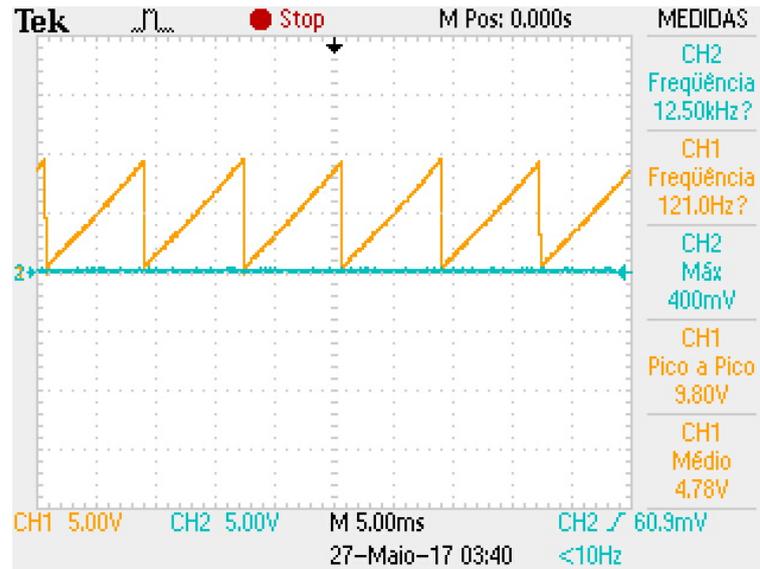


Figura 39 – Comparação da rampa de sincronismo com a tensão de controle a 0 V.
Fonte: Autoria própria.

Ao ajustarmos a tensão de referência para 10 V, o cruzamento com a rampa de sincronismo, figura 40, gera um ângulo de disparo de 180° e uma tensão média de saída de 0 V, como mostra a figura 41.

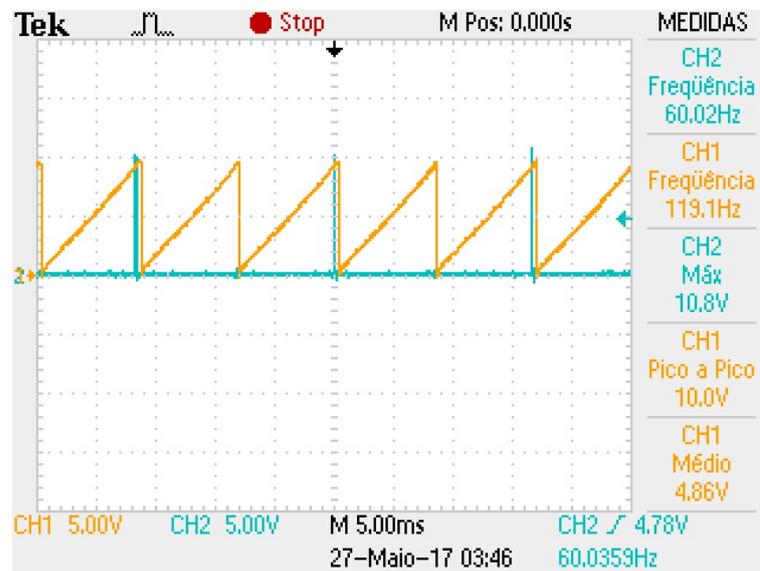


Figura 40 – Rampa de sincronismo, no canal 1, e pulso no pino 15, no canal 2.
Fonte: Autoria própria.

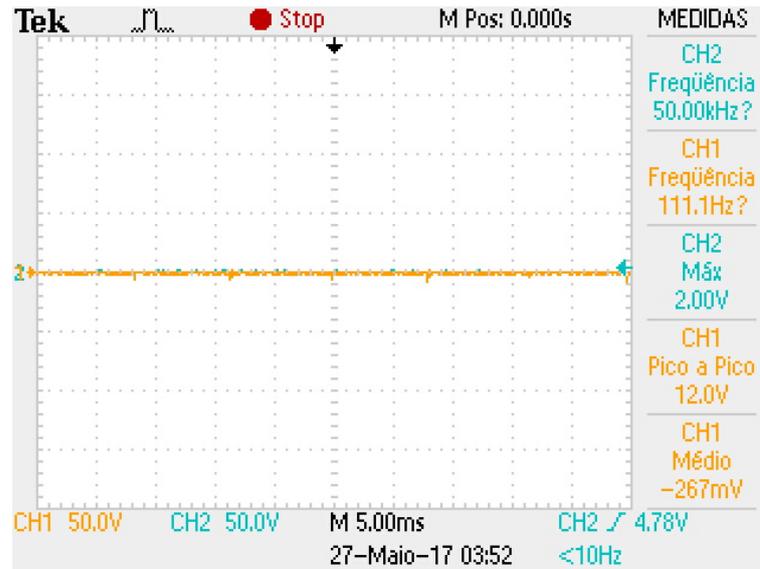


Figura 41 – Saída do circuito no canal 1.

Fonte: Autoria própria.

O mesmo procedimento foi realizado para os ângulos de disparo de 0° obtendo a comparação mostrada na figura 42 e a tensão de saída média máxima, teoricamente de 110 V, como visto na figura 43.

Vale ressaltar que o mínimo ângulo de disparo é efetivamente $21,6^\circ$, devido ao atraso de onda de sincronismo causado pelo filtro passa-baixa.

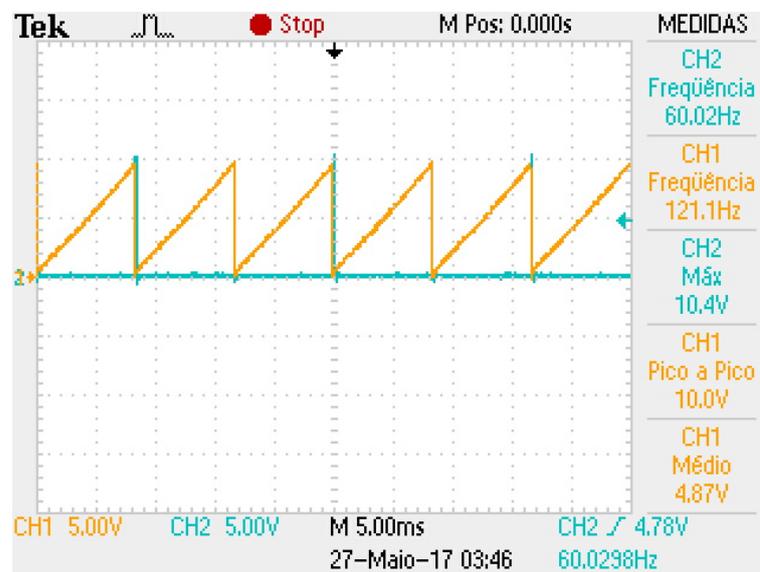


Figura 42 – Comparação da rampa de sincronismo com o pulso em 0°

Fonte: Autoria própria.

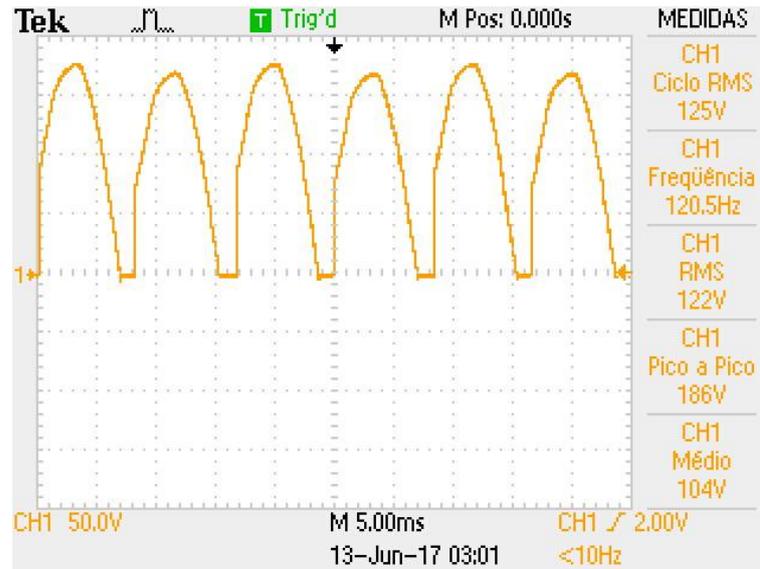


Figura 43 – Saída do circuito com ângulo de 0° no canal 1.
Fonte: Autoria própria.

Por fim, foi realizado um terceiro teste para tensão de controle ajustada em metade do valor máximo da rampa de sincronismo, ou seja, tensão de controle igual a 5 V , resultando em um ângulo de disparo de 90° mostrado na figura 44. Como relatado anteriormente, quando a rampa de sincronismo atinge o mesmo valor da tensão de controle no pino 11, é gerado um pulso no pino 15 quando a senoide da rede está em seu semiciclo negativo e outro pulso no pino 14 quando a rede está em seu semiciclo positivo, como podemos observar em 45, ocasionando na saída um valor de tensão média de $57,1\text{ V}$, conforme mostra a figura 46.

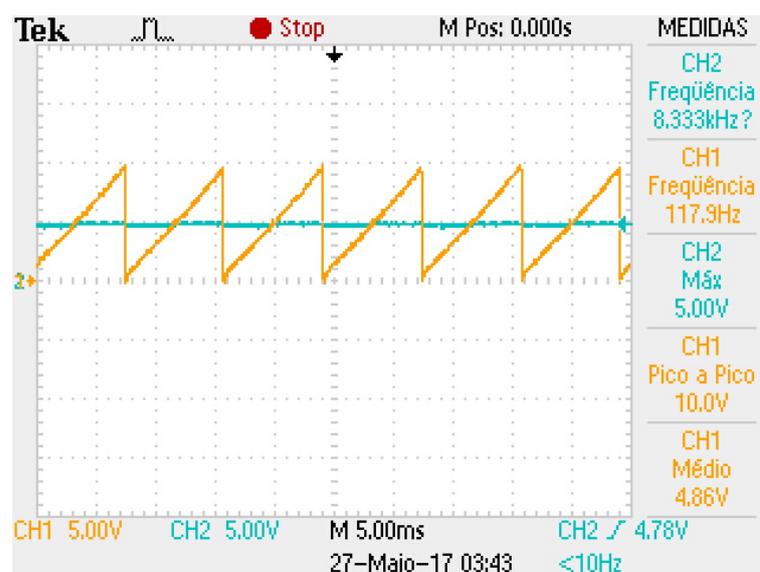


Figura 44 – Comparação da rampa de sincronismo com a tensão de controle a 5 V .
Fonte: Autoria própria.

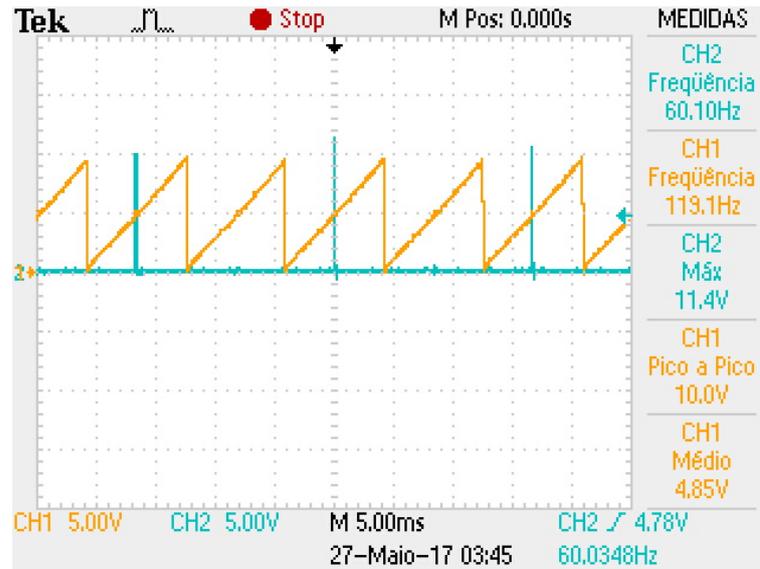


Figura 45 – Comparação da rampa de sincronismo com o pulso em 90° .

Fonte: Autoria própria.

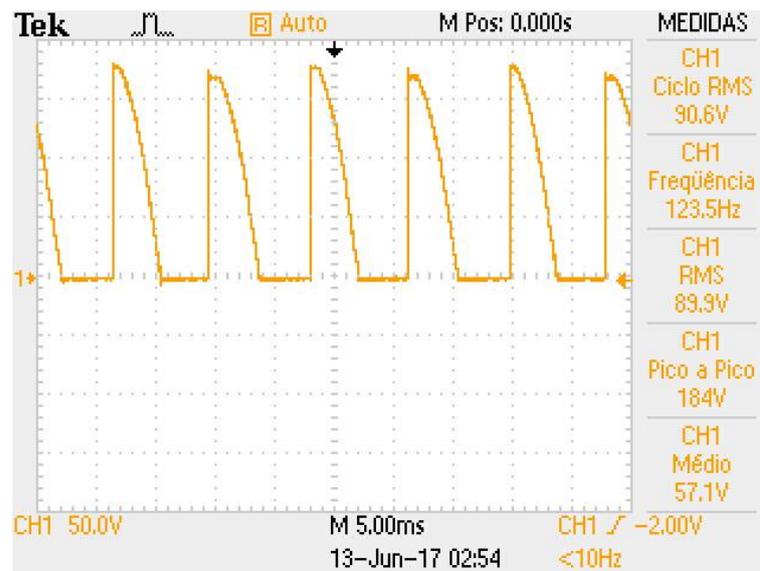


Figura 46 – Saída do circuito com ângulo de 90° .

Fonte: Autoria própria.

Os testes foram realizados utilizando um reostato ajustado em 100Ω . Já que estamos operando com tensão de rede de pico de $180 V$, a corrente de pico na carga variou de $0 A$ à $1,8 A$.

5 CONCLUSÃO

O objetivo principal deste trabalho é a implementação de uma fonte regulável baseada em um retificador monofásico de ponte completa com tiristores. Para esse fim, primeiramente foi feito um estudo sobre o comportamento dos tiristores e das diferentes configurações dos conversores CA/CC. Posteriormente, inciou-se o projeto dos circuitos de acionamento, potência, acoplamento e controle.

Após a fundamentação teórica e o projeto dos circuitos, o próximo passo foi confecção do protótipo, afim de obter os resultados práticos. O conversor operando em malha aberta alcançou desempenho satisfatório, sendo possível o ajuste da tensão de saída através da variação do ângulo de disparo α . No entanto, houve dificuldade na aferição do ângulo α . Para melhorar o desempenho do retificador, uma alternativa seria fazer o tratamento de ruídos e o controle de maneira digital.

De maneira geral, os objetivos deste trabalho foram alcançados, no qual o protótipo conversor CA/CC obteve resultados condizentes com a teoria. Como sugestão para futuros trabalhos propõe-se:

- Aplicar o conversor no controle de velocidade de motores CC;
- Fazer controle em malha fechada utilizando técnicas de controle digital;

REFERÊNCIAS

- AHMED, A. **Eletrônica de Potência**. 1. ed. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2000. v. 1.
- ALMEIDA, J. L. A. de. **Eletrônica industrial: Conceitos e aplicações com SCRS e TRIACS**. 1. ed. [S.l.]: John Wiley e Sons Inc, 2014.
- BARBI, I. **Eletrônica de Potência**. 5. ed. [S.l.: s.n.], 2005.
- DIAS, B. **Cérebro eletrônico**. 2010. Disponível em: <http://www.osetoreletrico.com.br/web/a-empresa/452-cerebro-eletronico.html>.
- HART, D. W. **Eletrônica de Potência: análise e projetos de circuitos**. 1. ed. [S.l.]: AMGH editora, 2012.
- JÚNIOR, R. C. **Tiristor SCR Retificador Controlado de Silício**. 2005. Disponível em: http://www.corradi.junior.nom.br/Apostila_Tiristor_SCR.pdf.
- LIMITED, P. I. **TIC 126 SERIES**: Silicon controlled rectifiers. [S.l.], 2001. 6 p.
- MOHAN TORE M. UNDELAND, W. P. R. N. **Power Electronics: Converters, Applications, and Design**. 3. ed. [S.l.]: Érica Ltda, 2003.
- POMILIO, J. A. **Eletrônica de Potência – Cap. 3**. 2006. Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdffiles/eltpot/cap3.pdf>.
- RASHID, M. H. **Eletrônica de Potência: Circuitos, Dispositivos e Aplcações**. 1. ed. [S.l.]: Makron Booksl, 1999. v. 1.
- SANTOS, E. **Toroídes**. 2009. Disponível em: <http://engenhariaeletricaa.blogspot.com.br/2009/01/toroides.html>.
- SANTOS, G. V. **SCR - Retificador Controlado de silício: funcionamento básico**. 2013. Disponível em: <http://eletronicaemcasa.blogspot.com.br/2013/08/Como-funciona-um-SCR.html>.
- SIEMENS. **Phase Control IC**: Tca 785. [S.l.], 2005. 15 p.
- WILLIAMS, B. W. **Principles and Elements of Power Eletronics**. 1. ed. [S.l.]: Barry W Williams, 2006.