



Universidade Federal
de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática – CEEI
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica – UAEE

Hortência Diniz Dutra e Silva

Estudo de circuitos de comando para conversores CA-CC a SCR utilizando AmpOps

Campina Grande, Paraíba

Novembro de 2024

Hortência Diniz Dutra e Silva

Estudo de circuitos de comando para conversores CA-CC a SCR utilizando AmpOps

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenadoria de Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina
Grande como parte dos requisitos necessários
para a obtenção do grau de Bacharel em En-
genharia Elétrica

Orientador: Talvanes Meneses Oliveira

Campina Grande, Paraíba

Novembro de 2024

Hortência Diniz Dultra e Silva

Estudo de circuitos de comando para conversores CA-CC a SCR utilizando AmpOps

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenadoria de Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina
Grande como parte dos requisitos necessários
para a obtenção do grau de Bacharel em En-
genharia Elétrica

Trabalho aprovado. Campina Grande, Paraíba, 04 de Novembro de 2024:

Talvanes Meneses Oliveira
Orientador

Alexandre Cunha Oliveira
Avaliador

Campina Grande, Paraíba
Novembro de 2024

À minha querida mãe, Maria Dalva, e ao amor da minha vida, Arthur Sales, por todo o apoio e paciência.

Agradecimentos

Arthur Sales, meu marido, que tem sido uma presença essencial ao longo desta jornada. Nossos últimos anos, juntos, foram marcados por grandes vitórias e desafios superados, fortalecendo ainda mais nosso amor. Seu apoio emocional, aliados à sua compreensão, paciência e respeito, foram fundamentais para que eu pudesse concluir esta fase da minha vida, com conforto e dedicação total ao curso. Desde que o conheci, meu amor e admiração por você só crescem.

À minha mãe, Maria Dalva, que sempre confiou em mim e nunca hesitou em apoiar os meus estudos, e à minha irmã, Alynnye, expresse minha sincera gratidão por terem contribuído financeiramente para minha educação durante o ensino médio, pré-vestibular e início do ensino superior, mesmo diante de todas as dificuldades.

Ao meu sobrinho Moisés, cujo amor pelos números é admirável, expresse meu profundo carinho. Sua pureza e alegria contagiante iluminam os momentos de brincadeira, tornando-os ainda mais especiais.

Também expresse minha gratidão à minha avó paterna, Terezinha, por suas constantes orações em meu favor, e aos meus tios maternos - Leila e Júnior, Francisca e Josenildo, Jacira e Zé, Francileide e Idinho - que, de diversas maneiras, contribuíram para minha educação na infância. À minha tia paterna, Lutinha, agradeço pelo seu apoio financeiro durante o ensino fundamental e pré-vestibular.

À minha amiga de infância, Júlia, aos meus amigos de longa data em Campina Grande - Maitê, Bruno, Bia, Amanda, Letícia Marinho, Manu e Larissa - além de Vanessa, amiga quando morei em Nova Iorque. Agradeço por estarem sempre presentes e por acreditarem em mim, independentemente da distância.

Ao meu professor, Talvanes, expresse minha profunda gratidão. Seu entusiasmo e dedicação à profissão me inspiraram e me fizeram encarar essa jornada com determinação, acreditando que era possível alcançar meus objetivos. Agradeço pelo apoio nos momentos difíceis e por sempre me encorajar a seguir em frente.

Expresse minha sincera gratidão ao meu amigo de longa data, Ícaro Meneses, que tem sido uma fonte constante de apoio, orientação e conhecimento desde o início do curso. Também gostaria de agradecer profundamente a Lucas Lobo, cuja presença foi sempre marcada pelo apoio, compartilhamento de conhecimento e dedicação aos estudos.

Por fim, aos amigos e colegas que conheci ao longo do curso - Lara, Marina, Juliana, Nívia, Leiry, Caio - agradeço pela companhia e pelo apoio que tornaram essa jornada mais leve.

*O sucesso é ir de fracasso em fracasso sem perder o entusiasmo.
(Winston Churchill)*

Lista de ilustrações

Figura 1 – Símbolo do SCR e as três junções <i>pn</i>	13
Figura 2 – Modelo de um SCR com dois transistores.	15
Figura 3 – Representações distintas dos AmpOps.	18
Figura 4 – Características de AmpOps das entradas.	19
Figura 5 – AmpOp com terminais de alimentação.	20
Figura 6 – Circuito com impedâncias genéricas relacionadas ao AmpOp.	20
Figura 7 – Integrador.	20
Figura 8 – Resposta de frequência do integrador.	21
Figura 9 – Circuito integrador e circuito RC.	22
Figura 10 – Excitação no terminal do <i>gate</i>	23
Figura 11 – Parâmetros de execução do <i>software</i> para todos os circuitos.	24
Figura 12 – Diagrama de blocos.	25
Figura 13 – Visão geral do <i>schematic</i> com identificação de cada AmpOp.	25
Figura 14 – <i>Schematic</i> do circuito de acionamento do conversor CA-CC utilizando TL082.	26
Figura 15 – A senoide e a referência zero são as entradas e a onda quadrada é o sinal de saída do AmpOp TL082.	27
Figura 16 – A onda quadrada e a referência zero são as entradas e a onda dente de serra é o sinal de saída do AmpOp TL082.	28
Figura 17 – Terceira dupla de AmpOps TL082 responsável por comparar o o sinal dente de serra e a referência.	29
Figura 18 – Comportamento dos sinais relacionados ao AmpOp3, mostrando sincronia entre a senoide, o dente de serra e o PWM.	30
Figura 19 – Quarta dupla de AmpOps TL082 responsável por comparar o sinal de impulsos positivos e negativos e a referência.	30
Figura 20 – Sinais relacionados à quarta dupla de AmpOps.	31
Figura 21 – Dupla de chaves (Q1 e Q2) e de transformadores (TX1 e TX2) no <i>Schematic</i> do circuito de acionamento de conversores CA-CC.	32
Figura 22 – Sinal de saída sincronizado com a fonte senoidal.	32
Figura 23 – <i>Schematic</i> do circuito de acionamento do conversor CA-CC utilizando TL084.	33
Figura 24 – A senoide e a referência zero são as entradas e a onda quadrada é o sinal de saída do AmpOp TL084.	34
Figura 25 – A onda quadrada e a referência em zero são as entradas e a onda dente de serra é o sinal de saída do AmpOp TL084.	35
Figura 26 – Sinais relacionados à dupla de AmpOp3.	36

Figura 27 – Sinais relacionados ao AmpOp4 superior, sincronizado com o semiciclo positivo da senoide.	37
Figura 28 – Sinais relacionados ao AmpOp4 inferior, sincronizado com o semiciclo negativo da senoide.	38
Figura 29 – Sinal de saída do AmpOp4.	39
Figura 30 – Sinal de saída para ativar o gate dos SCRs em sincronia com a fonte CA.	40
Figura 31 – <i>Schematic</i> do circuito de acionamento do conversor CA-CC utilizando LM324.	41
Figura 32 – Sinais relacionados aos AmpOps 1 e 2.	42
Figura 33 – Sinal roxo representando a saída do AmpOp3.	43
Figura 34 – Sinais relacionados à dupla de AmpOps3.	43
Figura 35 – Sinais relacionados ao AmpOp4 superior.	44
Figura 36 – Sinais relacionados ao AmpOp4 inferior.	45
Figura 37 – Pulso de gatilho sincronizado com a fonte CA.	46
Figura 38 – <i>Schematic</i> do circuito de acionamento do conversor CA-CC utilizando LM358.	47
Figura 39 – Sinais relacionados aos AmpOps 1 e 2.	48
Figura 40 – Sinal PWM gerado pelo AmpOp3.	49
Figura 41 – Sinais referentes ao semiciclo positivo da fonte CA envolvidos no AmpOp4.	50
Figura 42 – Sinais referentes ao semiciclo negativo da fonte CA envolvidos no AmpOp4.	50
Figura 43 – Pulsos gerados para acionar o gate do SCR.	51

Lista de tabelas

Tabela 1 – Variáveis analisadas para diferentes AmpOps.	53
---	----

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivos	11
1.1.1	Objetivo Geral	11
1.1.2	Objetivos Específicos	11
1.2	Metodologia	12
1.3	Organização do Trabalho	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	SCR (<i>Silicon Controlled Rectifier</i>)	13
2.1.1	Características	13
2.1.2	Disparo de um SCR	16
2.1.3	Tipos de Tiristores	17
2.1.3.1	Tiristores de Controle de Fase	17
2.2	Amplificador Operacional	18
2.2.1	Circuitos Baseados em AmpOps	20
2.2.1.1	Integrador	20
2.3	Isolação das Excitações no Terminal do <i>Gate</i>	22
2.3.1	Transformadores de Pulsos	22
3	SOFTWARE	24
3.1	OrCAD	24
4	ATIVIDADES DESENVOLVIDAS	25
4.0.1	Diagrama de Blocos	25
4.0.2	TL082	26
4.0.2.1	<i>Schematic</i>	26
4.0.2.2	AmpOp1	27
4.0.2.3	AmpOp2	27
4.0.2.4	AmpOp3	28
4.0.2.5	AmpOp4	30
4.0.2.6	Sinal de Saída	31
4.0.3	TL084	33
4.0.3.1	<i>Schematic</i>	33
4.0.3.2	AmpOp1	34
4.0.3.3	AmpOp2	34
4.0.3.4	AmpOp3	35

4.0.3.5	AmpOp4	37
4.0.3.6	Sinal de Saída	39
4.0.4	LM324	40
4.0.4.1	<i>Schematic</i>	41
4.0.4.2	AmpOp1 e AmpOp2	41
4.0.4.3	AmpOp3	42
4.0.4.4	AmpOp4	44
4.0.4.5	Sinal de Saída	45
4.0.5	LM358	47
4.0.5.1	<i>Schematic</i>	47
4.0.5.2	AmpOp1 e AmpOp2	47
4.0.5.3	AmpOp2 e AmpOp3	49
4.0.5.4	AmpOp4	49
4.0.5.5	Sinal de Saída	51
5	ANÁLISE DE RESULTADOS	53
6	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

Os circuitos de acionamento exercem uma função vital na regulação e controle de dispositivos elétricos, sendo essenciais em uma gama de aplicações, desde sistemas domésticos até processos industriais (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2003). Sua importância reside na capacidade de controlar o funcionamento de dispositivos, otimizar o consumo de energia, garantir a segurança operacional, facilitar a automatização de processos e integrar-se a sistemas de controle mais amplos. Neste trabalho, serão realizados estudos de circuitos de acionamento de conversores CA-CC, usando SCR como dispositivo do circuito de potência com o auxílio de amplificadores operacionais na geração do sinal de gatilho.

Os amplificadores operacionais destacam-se pela capacidade de amplificar sinais elétricos, apropriado, também, para performar outras funções mais elaboradas (RAZAVI, 2013). Sua versatilidade permite diversas configurações, adaptando-se às necessidades específicas de cada sistema. A acessibilidade e o custo relativamente baixo tornam-nos amplamente disponíveis para uma variedade de aplicações. Dessa forma, sua capacidade de integração com outros componentes eletrônicos permite a construção de sistemas de acionamento mais sofisticados, eficientes e precisos.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

- Estudo de circuito de comando para conversores CA-CC, utilizando SCR como dispositivo de potência e o auxílio de AmpOps.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Estudo de amplificadores de tensão;
- Análise de técnicas para sincronização de sinais;
- Análise do tempo de atraso para geração de pulsos de comando utilizando diferentes AmpOps.

1.2 Metodologia

A princípio, a plataforma de *software* de simulação de circuitos será o Orcad, pois ela é amplamente empregada na indústria eletrônica para facilitar o projeto e teste de circuitos eletrônicos antes da fabricação física. Sua interface é intuitiva para o desenho de esquemas elétricos e sua biblioteca tem uma grande variedade de componentes eletrônicos.

Além disso, o Orcad permite que o projetista identifique potenciais problemas no circuito, para que sejam corrigidos antes da fabricação física. Este *software* é frequentemente integrado a outras ferramentas de *Electronic Design Automation*, como ferramentas de *layout* de placa de circuito impresso, facilitando a transição do *design* do circuito para sua fabricação.

Com esta ferramenta, será possível analisar o comportamento do circuito de acionamento utilizando diferentes tipos de amplificadores operacionais aplicados à geração do sinal de comando. Assim, o resultado obtido com cada simulação poderá ser comparado, levando em consideração a funcionalidade e a velocidade da geração para aplicação do pulso do circuito de comando e acionamento das chaves controladas no circuito de potência.

1.3 Organização do Trabalho

O trabalho está estruturado em 6 capítulos, sendo o primeiro introdutório.

O capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura relacionada ao objetivo deste trabalho.

O capítulo 3 descreve a tecnologia utilizada no desenvolvimento da aplicação.

No capítulo 4 são apresentadas as atividades desenvolvidas neste trabalho.

No capítulo 5 estão as análises dos resultados obtidos das atividades desenvolvidas.

Por fim, no capítulo 6, têm-se as considerações finais e os pontos de continuidade do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

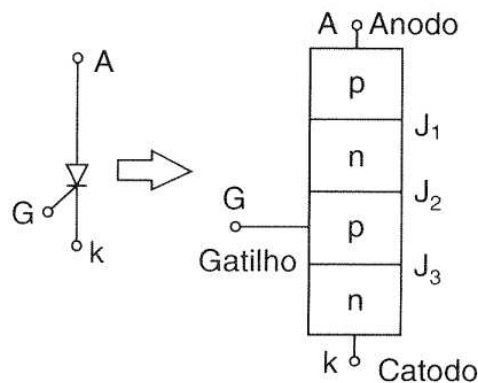
2.1 SCR (*Silicon Controlled Rectifier*)

É um dispositivo semicondutor de potência da família tiristor amplamente utilizado em circuitos de eletrônica de potência. Eles são operados como chaves biestáveis, indo do estado de não-condução para o estado de condução e, na aplicação prática, exibem limitações. Neste trabalho, os SCRs da família 100 (TIC 106 à 126) estão sendo utilizados.

2.1.1 Características

O SCR é um dispositivo semicondutor de quatro camadas, de estrutura *pnpn*, com três junções *pn* que tem como característica estática ser bidirecional em tensão e unidirecional em corrente e, como característica dinâmica, tem disparo controlado e bloqueio espontâneo. Ele tem três terminais: anodo, catodo e gatilho (*gate*). A figura 1 ilustra o símbolo do SCR e uma vista da seção transversal das três junções *pn*. Sendo eles fabricados quase exclusivamente por difusão.

Figura 1 – Símbolo do SCR e as três junções *pn*.



Fonte: (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2003).

Os modos de condução do SCR estão citados a seguir.

- Estado de bloqueio direto/*forward blocking* ou estado desligado/*off-state*
 - Quando a tensão anodo é positiva em relação ao catodo, as junções J_1 e J_3 estão polarizadas diretamente. A junção J_2 está reversamente polarizada e apenas uma pequena corrente de fuga flui do anodo para o catodo. Essa corrente de fuga é conhecida como *corrente de estado desligado* I_D .

- Estado de condução, estado ligado ou *on-state*
 - Quando a tensão anodo-catodo V_{Ak} for aumentada a um valor suficientemente grande, a junção reversamente polarizada J_2 romperá, isso é conhecido como ruptura por avalanche (*avalanche breakdown*) e a correspondente é chamada tensão de ruptura direta (*forward breakdown voltage* - V_{BO}). Como as junções J_1 e J_3 já estão diretamente polarizadas, haverá um grande movimento livre de portadores através de todas as três junções, resultando em uma grande corrente de anodo no sentido direto.

No estado de condução, a corrente de anodo é limitada por uma impedância ou uma resistência externa. A corrente de anodo tem de estar acima de um valor conhecido como corrente de travamento (*latching current* - I_L), a fim de manter a quantidade necessária do fluxo de portadores na junção. De outra forma, o dispositivo voltará à condição de bloqueio quando a tensão anodo-catodo for reduzida. A corrente de travamento I_L é a mínima corrente de anodo necessária para manter o SCR no estado de condução imediatamente após um SCR ter sido ligado e o sinal de gatilho ter sido removido.

Uma vez que o SCR conduz, ele se comporta como um diodo em condução e não há controle sobre o dispositivo. Ele continuará conduzindo porque não há camada de depleção devido ao movimento livre de portadores na junção J_2 . Entretanto, se a corrente direta de anodo for reduzida abaixo de um nível conhecido como corrente de manutenção (*holding current* - I_H), uma região de depleção se desenvolverá em torno da junção J_2 , devido ao reduzido número de portadores e assim, o SCR estará no estado de bloqueio.

A corrente de manutenção está na ordem de miliamperes e é menor que a corrente de travamento I_L , ou seja, $I_L > I_H$. A corrente de travamento (I_L) é a mínima corrente de anodo para manter o SCR no estado de condução.

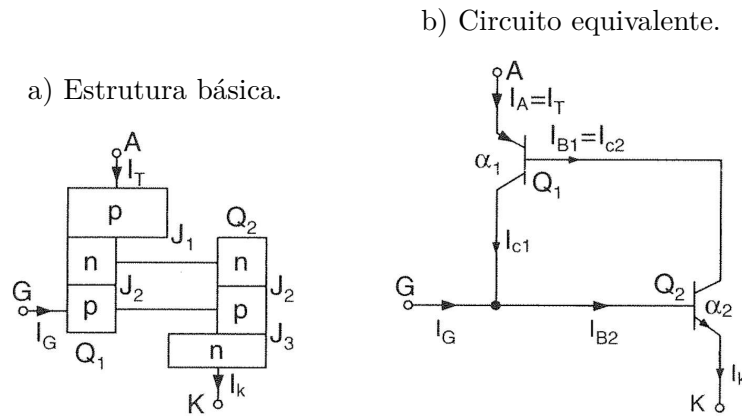
Quando a tensão de catodo é positiva em relação ao anodo, a junção J_2 está diretamente polarizada, mas as junções J_1 e J_3 estão reversamente polarizadas. Isto é, como dois diodos conectados em série, com tensão reversa sobre eles. O SCR estará no estado de bloqueio reverso e uma corrente de fuga reversa, conhecida como corrente reversa I_R , fluirá através do dispositivo.

Um SCR pode ser ligado pelo aumento da tensão direta V_{Ak} além de V_{BO} , mas tal forma de ligá-lo pode ser destrutiva. Na prática, a tensão direta é mantida abaixo de V_{BO} e o SCR é ligado (disparado) pela aplicação de um pulso de tensão positiva entre seus terminais de gatilho e catodo, na condição de ter o caminho da malha fechada de modo a criar corrente de gatilho.

Uma vez que o SCR seja disparado por um sinal de gatilho e sua corrente de anodo seja maior que a corrente de manutenção, o dispositivo continua a conduzir devido à realimentação positiva, mesmo que o sinal de gatilho seja removido.

Além disso, um SCR pode ser considerado como dois transistores complementares, um *pnp*, o transistor Q_1 , e o outro *npn*, o transistor Q_2 , como ilustra a figura 2(a).

Figura 2 – Modelo de um SCR com dois transistores.



Fonte: (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2003).

A corrente de coletor I_C de um SCR é relacionada, em geral, à corrente de emissor I_E e à corrente de fuga da junção base-coletor, I_{CBO} e o ganho de corrente em base comum é definido como $\alpha = I_C/I_E$, como na equação 2.1.

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

Para o transistor Q_1 , a corrente de emissor é a corrente de anodo I_A e a corrente do coletor I_{C1} pode ser encontrada a partir da equação (2.2), em que o α_1 é o ganho de corrente e I_{CBO1} é a corrente de fuga para Q_1 .

$$I_{C1} = \alpha_1 I_A + I_{CBO1}. \quad (2.2)$$

De forma similar, para o transistor Q_2 , a corrente de coletor I_{C2} pode ser encontrada a partir da equação (2.3), em que o α_2 é o ganho de corrente e I_{CBO2} é a corrente de fuga para Q_2 .

$$I_{C2} = \alpha_2 I_K + I_{CBO2}. \quad (2.3)$$

Combinando I_{C1} e I_{C2} , obtém-se

$$I_A = I_{C1} + I_{C2} = \alpha_1 I_A + I_{CBO1} + \alpha_2 I_K + I_{CBO2}. \quad (2.4)$$

Para uma corrente de gatilho de I_G , $I_K = I_A + I_G$ e resolvendo a equação (2.4) para I_A , obtém-se:

$$I_A = \frac{\alpha_2 I_G + I_{CBO1} + I_{CBO2}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}. \quad (2.5)$$

O ganho de corrente α_1 varia com a corrente de emissor $I_A = I_E$ e α_2 varia com $I_K = I_A + I_G$ (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2003).

2.1.2 Disparo de um SCR

Um SCR é disparado ou entra em estado de condução aumentando-se a corrente de anodo e isso pode ser conseguido por meio de uma das seguintes formas citadas a seguir:

- Térmica
 - Se a temperatura de um SCR for elevada, haverá um aumento no número de pares elétrons-lacunas que aumentará as correntes de fuga. Este aumento causará o aumento de α_1 e α_2 (ganhos dos transistores) e o SCR poderá ser disparado. Esse tipo de disparo pode causar agitação térmica e é normalmente evitado.
- Luz
 - Se for permitido que a luz atinja as junções de um SCR, os pares elétrons-lacunas aumentarão e ele poderá ser disparado. Os SCRs ativados por luz são disparados permitindo-se que a luz atinja a pastilha de silício.
- Tensão elevada ou sobretensão
 - Se a tensão direta anodo-catodo for maior que a tensão direta de ruptura V_{BO} , fluirá uma corrente de fuga suficiente para iniciar o disparo regenerativo. Este tipo de disparo pode ser destrutivo e deve ser evitado.
- dv/dt
 - Se a taxa de crescimento da tensão anodo-catodo for elevada, a corrente de carga das junções capacitivas pode ser suficiente para disparar o SCR. Um valor elevado de corrente de cargas pode danificá-lo e, por isso, o dispositivo tem que ser protegido contra dv/dt elevado e os fabricantes têm que especificar o dv/dt máximo permitido.

- Corrente de gatilho
 - Se o SCR estiver diretamente polarizado, a injeção da corrente de gatilho pela aplicação de tensão positiva entre os terminais de gatilho e catodo irá dispará-lo, ou seja, colocá-lo em estado de condução.

2.1.3 Tipos de Tiristores

A família de tiristores possui nove categorias de chaves semicondutoras, cada uma com suas características próprias. A seguir, elas estão listadas:

- Tiristor de controle de fase (*phase-control*), como os SCRs;
- Tiristor de chaveamento rápido (*fast-switching*);
- Tiristor de desligamento pelo gatilho (*gate-turn-off* - GTOs);
- Tiristores triodos bidirecionais (*bidirectional triode* - TRIACs);
- Tiristores de condução reversa (*reverse-conducting* - RCTs);
- Tiristores de indução estática (*static induction* - SITHs);
- Retificadores controlados de silício ativados por luz (*light-activated silicon-controlled rectifiers* - LASCRs);
- Tiristores controlados por FET (*FET-controlled* - FET-CTHs);
- Tiristores controlados por MOS (*MOS-controlled* - MCTs).

Este trabalho tem como foco o estudo de circuito de comando aplicado ao tiristor de controle da fase, conhecido também como SCR. A seguir, serão exploradas mais algumas características deste componente.

2.1.3.1 Tiristores de Controle de Fase

Este tipo de tiristor geralmente opera na frequência da rede e é desligado por comutação natural. O tempo de desligamento t_q é da ordem de 50 a 100us. Como se trata de um dispositivo controlado, feito de silício, ele também é conhecido como retificador controlado de silício ou *silicon-controlled rectifier* (SCR) (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2003).

A Eletrônica Industrial (nomeada Eletrônica de Potência em 1969) recebeu um grande impulso a partir de 1957, quando apareceu o primeiro retificador controlado de silício (SCR), desenvolvido pela *General Electric Company*, nos Estados Unidos (OLIVEIRA, 1989). Entre todos os dispositivos de potência semicondutores convencionais, o SCR tem o menor custo por kVA, além de ser capaz de controlar maior quantidade de potência (ERICKSON; MAKSIMOVIC, 2001).

2.2 Amplificador Operacional

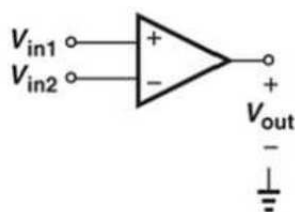
Os AmpOps são frequentemente utilizados em circuitos de acionamento de SCRs para realizar várias funções que asseguram um controle preciso e eficiente. Eles são componentes versáteis, essenciais e ideais para muitos circuitos de acionamento, aplicações que exigem controle rigoroso e funções críticas como amplificação, comparação e filtragem de sinais.

A expressão “amplificador operacional” (AmpOp) foi cunhada nos anos 1940, muito antes da invenção do transistor e de circuitos integrados. AmpOps realizados com válvulas a vácuo eram o núcleo de “integradores” e “diferenciadores” eletrônicos e de outros circuitos que formavam sistemas cujo comportamento seguia certas equações diferenciais. Esses circuitos, chamados “computadores analógicos”, eram usados para o estudo da estabilidade de equações diferenciais que surgiam em áreas como sistemas de controle ou de potência. Como cada AmpOp implementava uma operação matemática (por exemplo, integração), foi criada a expressão “amplificador operacional”.

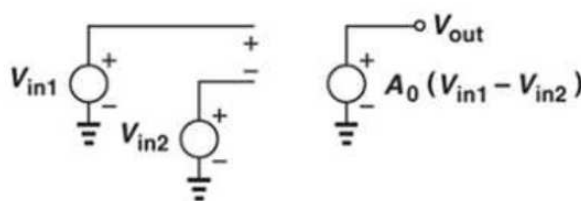
Este dispositivo pode ser representado, de maneira abstrata, como uma caixa-preta com duas entradas e uma saída. O símbolo de AmpOp, ilustrado na figura 3(a), distingue as duas entradas pelos sinais mais e menos, V_{in1} e V_{in2} são chamadas, respectivamente, entradas “não inversora” e “inversora”. Vê-se o AmpOp como um circuito que amplifica a diferença entre as duas entradas e obtêm-se o circuito equivalente ilustrado na figura 3(b). O ganho de tensão é representado por A_0 .

Figura 3 – Representações distintas dos AmpOps.

a) Símbolo do AmpOp.



b) Circuito equivalente.



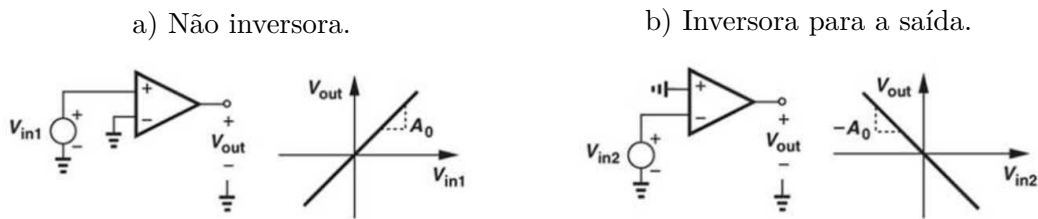
Fonte: (RAZAVI, 2013).

$$V_{out} = A_0(V_{in1} - V_{in2}). \quad (2.6)$$

É interessante desenhar o gráfico de V_{out} em função de uma entrada, enquanto a outra permanece em zero. Com $V_{in2} = 0$, têm-se $V_{out} = A_0 V_{in1}$, o que resulta no comportamento ilustrado na figura 4(a). A inclinação positiva (ganho) é coerente com o rótulo “não inversora” dado a V_{in1} . Se, por sua vez, $V_{in1} = 0$, $V_{out} = -A_0 V_{in2}$ (figura 4(b)) o que revela uma inclinação negativa e, portanto, um comportamento de “inversão”.

A principal propriedade de AmpOps, $V_{out} = A_0(V_{in1} - V_{in2})$, constitui a base de diversas topologias de circuitos, isso é característica do AmpOp com duas entradas.

Figura 4 – Características de AmpOps das entradas.



Fonte: (RAZAVI, 2013).

Um AmpOp ideal provê ganho de tensão infinito, impedância de entrada infinita, impedância de saída nula e velocidade infinita. Pode-se considerar, depois, o efeito das “não idealidades” do AmpOp no desempenho do circuito. O ganho muito alto do AmpOp leva a uma observação importante. Como os circuitos reais produzem excursões de saída finitas, por exemplo, $2v$, a diferença entre V_{in1} e V_{in2} , na figura 3(a), é sempre pequena:

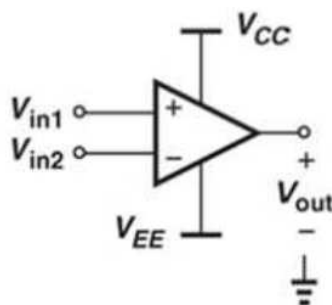
$$V_{in1} - V_{in2} = \frac{V_{out}}{A_0} \quad (2.7)$$

Portanto, o AmpOp e os circuitos que o envolvem tornam as entradas V_{in1} e V_{in2} próximas uma da outra. Então, se o ganho for infinito, têm-se $V_{in1} = V_{in2}$.

Porém, um erro comum consiste nessa interpretação ($V_{in1} = V_{in2}$), como se os dois terminais V_{in1} e V_{in2} estivessem conectados um ao outro em curto-circuito. A diferença $V_{in1} - V_{in2}$ se torna apenas infinitamente pequena a medida que $A_0 \rightarrow \infty$, e não se pode supor que seja exatamente igual a zero.

Os amplificadores operacionais são, às vezes, representados como a ilustração da figura 5, para indicar as tensões de alimentação, V_{EE} e V_{CC} , de maneira explícita. Por exemplo, um AmpOp pode operar entre o terra e a entrada positiva, neste caso, $V_{EE} = 0$ (RAZAVI, 2013).

Figura 5 – AmpOp com terminais de alimentação.



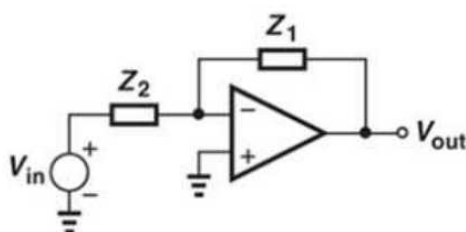
Fonte: (RAZAVI, 2013).

2.2.1 Circuitos Baseados em AmpOps

2.2.1.1 Integrador

Admitindo que impedâncias complexas estejam relacionadas ao AmpOp que está ilustrado na figura 6, se Z_1 ou Z_2 for um capacitor, duas funções interessantes resultam desta análise.

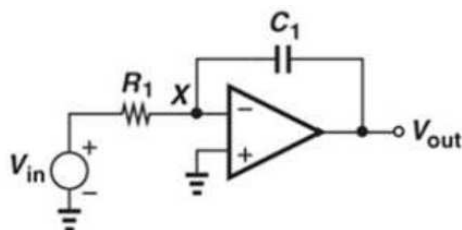
Figura 6 – Circuito com impedâncias genéricas relacionadas ao AmpOp.



Fonte: (RAZAVI, 2013).

Se Z_1 for um capacitor e Z_2 um resistor, ou seja, $Z_1 = (C_1s)^{-1}$ e $Z_2 = R_1$, com um AmpOp ideal, obtém-se o circuito ilustrado na figura 7 e a equação (2.8):

Figura 7 – Integrador.



Fonte: (RAZAVI, 2013).

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{\frac{1}{C_1s}}{R_1} = -\frac{1}{R_1C_1s} \quad (2.8)$$

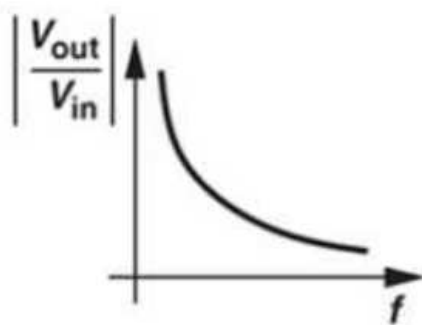
A análise da operação do circuito da figura 7 e a equação resultante permite verificar que existe um polo na origem e funciona como um integrador (e filtro passa-baixas). Já a figura 8, ilustra o gráfico da magnitude de $\frac{V_{out}}{V_{in}}$ em função da frequência. O cálculo anterior também pode ser feito no domínio do tempo. Igualando as correntes que fluem por R_1 e C_1 , obtém-se:

$$\frac{V_{in}}{R_1} = -C_1 \frac{dV_{out}}{dt} \quad (2.9)$$

então,

$$V_{out} = -\frac{1}{R_1 C_1} \int V_{in} dt. \quad (2.10)$$

Figura 8 – Resposta de frequência do integrador.



Fonte: (RAZAVI, 2013).

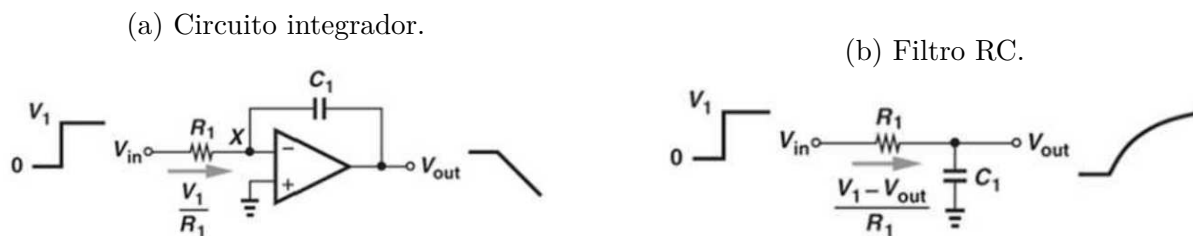
A equação 2.8 indica que $\frac{V_{out}}{V_{in}}$ tende ao infinito à medida que a frequência de entrada tende a zero. Isso era de se esperar, pois a impedância do capacitor se torna muito grande nas frequências baixas, tendendo a um circuito aberto.

Inicialmente, integradores surgiram em computadores analógicos para simular equações diferenciais. Atualmente, integradores eletrônicos são usados em filtros analógicos, sistemas de controle (que é o caso deste trabalho) e em outras aplicações.

A relação entre circuitos integradores e filtros analógicos é esclarecida a seguir, pois, ao comparar a resposta de uma função degrau a um integrador, como ilustrado na figura 9(a), com a de um filtro RC de primeira ordem, como ilustrado na figura 9(b), o circuito integrador força o fluxo de uma corrente constante (igual a $\frac{V_1}{R_1}$) pelo capacitor. Por outro lado, o filtro RC gera uma corrente igual a $(V_{in} - V_{out})/R_1$, que diminui à medida que V_{out} aumenta, resultando em uma variação de tensão cada vez mais lenta em C_1 .

Portanto, podemos considerar o filtro RC como uma aproximação "passiva" do integrador. Na verdade, para um produto R_1C_1 grande, a resposta exponencial da figura 9(b) se torna suficientemente lenta para poder ser aproximada por uma rampa.

Figura 9 – Circuito integrador e circuito RC.



Fonte: (RAZAVI, 2013)

2.3 Isolação das Excitações no Terminal do *Gate*

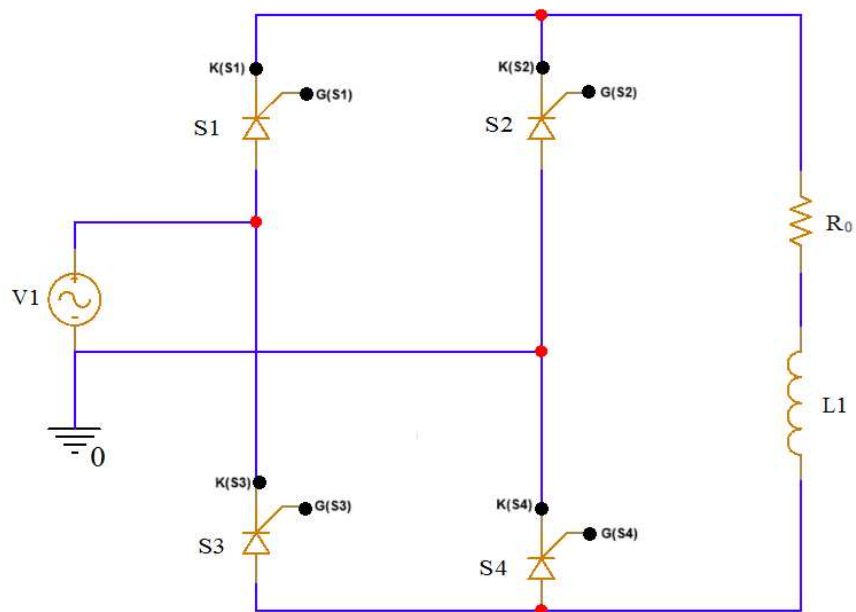
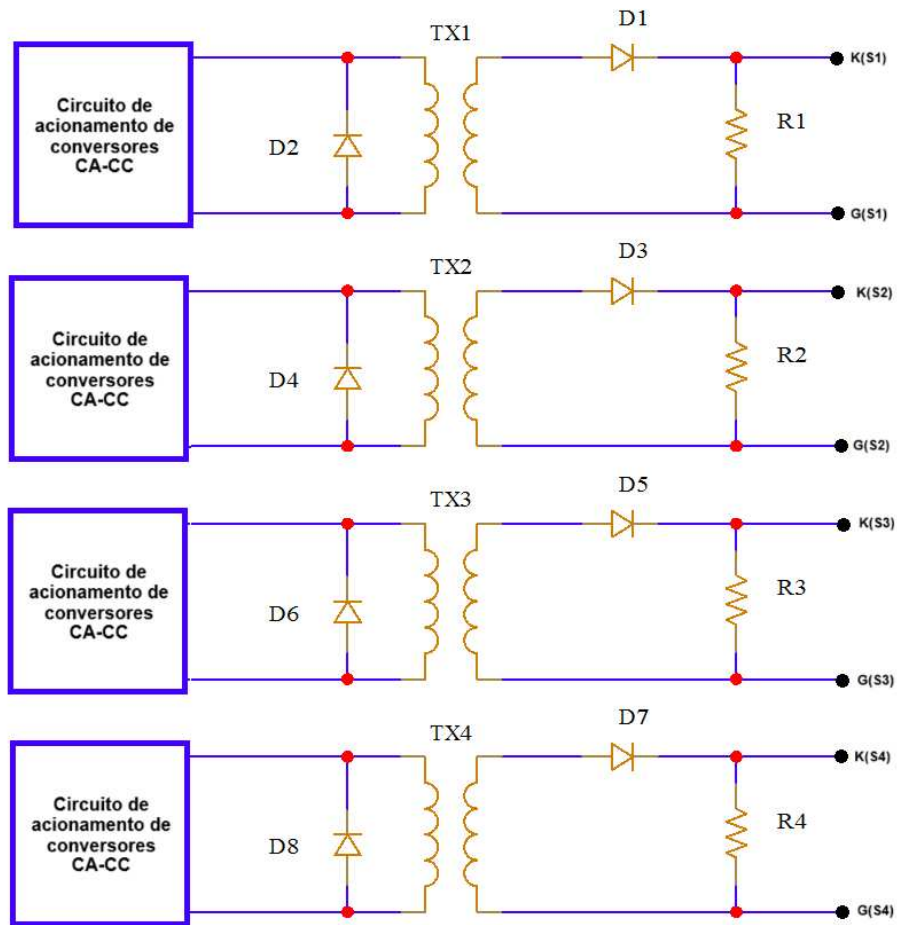
Há, basicamente, duas maneiras de se isolar os sinais de controle em relação ao circuito de potência, são eles os transformadores de pulso e os opto-acopladores. Neste trabalho, a primeira opção estará sendo utilizada.

2.3.1 Transformadores de Pulsos

A utilização do transformador de pulso no circuito que está sendo analisado neste trabalho, tem como objetivo isolar o circuito de controle/comando do circuito de força/potência e está ilustrado na figura 10 por TX1, TX2, TX3 e TX4, sendo configurado com $L_1 = L_2 = 10mH$ e, conseqüentemente, uma relação de transformação de 1:1.

Além disso, na mesma figura, é possível observar o circuito de potência, onde há um conversor monofásico totalmente controlado, com uma carga indutiva. Nela, observam-se os SCRs S1, S2, S3, e S4, em que, durante o semiciclo positivo da fonte de tensão, S1 e S4 estão diretamente polarizados e, quando disparados simultaneamente em $\omega t = \alpha$, a carga é conectada à rede de alimentação de entrada através de S1 e S4. Por outro lado, durante o semiciclo negativo de V_1 , S2 e S3 estão diretamente polarizados e, os disparos desses SCRs, em $\omega t = \pi + \alpha$, aplicará tensão da rede de alimentação sobre S1 e S4 como tensão reversa de bloqueio, assim, estes SCRs serão desligados e a corrente de carga será transferida de S1 e S4 para S2 e S3.

Figura 10 – Excitação no terminal do *gate*.



Fonte: autoria própria.

3 SOFTWARE

3.1 OrCAD

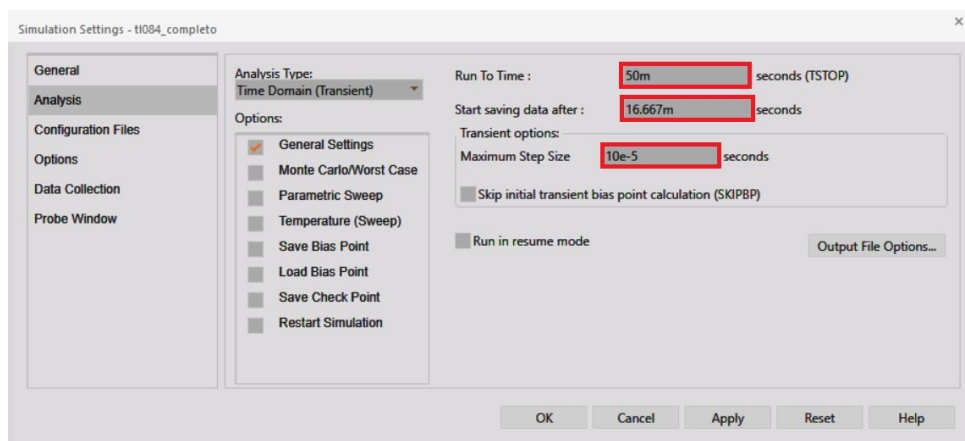
O OrCAD representa um conjunto de software de renome utilizado para o projeto e análise de circuitos eletrônicos, desenvolvido pela *Cadence Design Systems*, este conjunto de ferramentas é reconhecido pela sua versatilidade e robustez em múltiplas vertentes do design de eletrônica.

Este *software* oferece uma gama de funcionalidades que abrangem desde a fase esquemática até a análise de sinais, passando pelo layout de PCB (Placa de Circuito Impresso) e simulação. Essas ferramentas são essenciais para engenheiros eletrônicos, projetistas de hardware e outros profissionais da indústria, permitindo-lhes conceber e testar circuitos complexos antes da prototipagem e produção em massa.

Outro fato a ser observado é que esta plataforma destaca-se pela sua extensa biblioteca de componentes eletrônicos padrão, simplificando consideravelmente o processo de concepção de projetos. Além disso, a sua capacidade de integração com outros softwares de CAD (Computer-Aided Design) e CAE (Computer-Aided Engineering) oferece um fluxo de trabalho contínuo, desde a fase inicial de concepção até a etapa final de fabricação do produto. Isso proporciona aos profissionais as ferramentas necessárias para traduzir conceitos em realidade de forma eficiente e precisa.

Neste trabalho, os parâmetros de execução para todos circuitos, como *Run To Time* (o programa executa até o tempo de 50ms), *Start saving data after* (o programa começa a gravar dados a partir do primeiro período) e *Maximum Step Size* (passo de cálculo máximo de 10us) estão mostrados na figura 11.

Figura 11 – Parâmetros de execução do *software* para todos os circuitos.



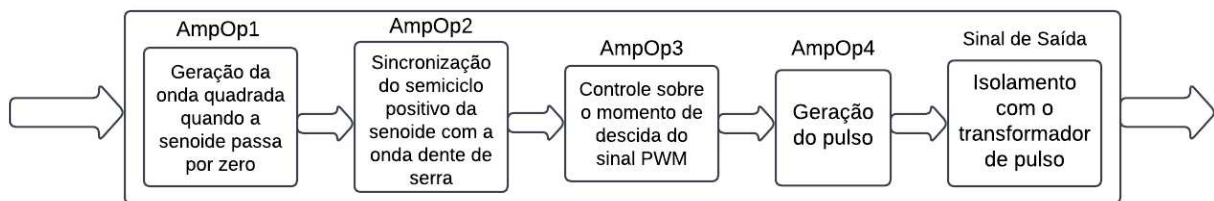
Fonte: autoria própria.

4 ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

4.0.1 Diagrama de Blocos

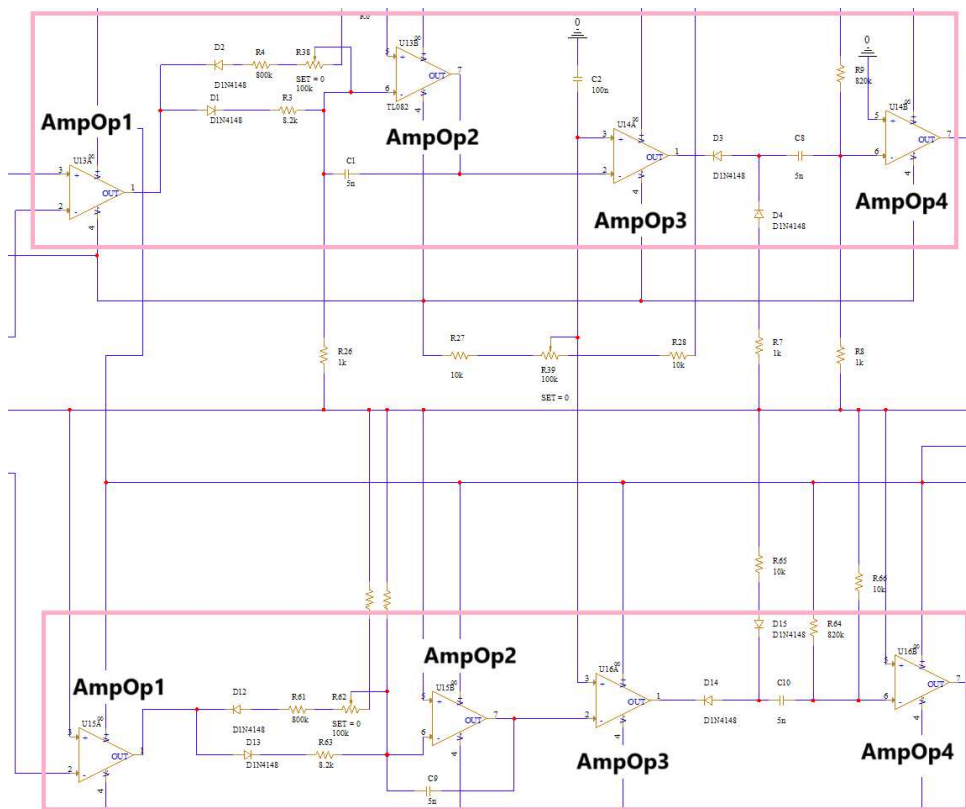
O diagrama de blocos ilustrado na figura 12, explica a funcionalidade de cada AmpOp que está localizado na figura 13. Elas têm como propósito dar uma visão geral de como o esquemático do circuito de comando foi dividido.

Figura 12 – Diagrama de blocos.



Fonte: autoria própria.

Figura 13 – Visão geral do *schematic* com identificação de cada AmpOp.



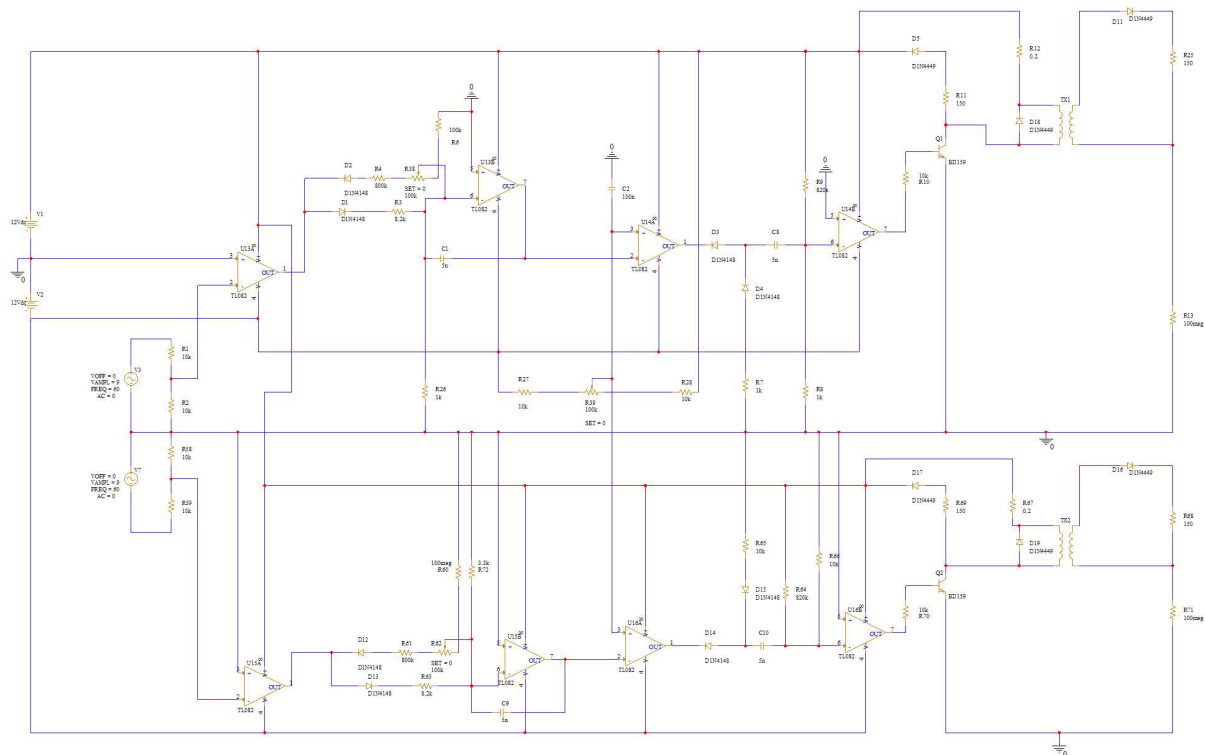
Fonte: autoria própria.

4.0.2 TL082

O TL082 é um amplificador operacional da família TL08x fabricado pela *Texas Instruments*. Ele possui dois canais, o que significa que contém dois AmpOps independentes em um único encapsulamento. Isso é importante, pois oferece flexibilidade para aplicações que exigem múltiplos AmpOps. Além disso, possui uma alta impedância de entrada, o que o torna adequado para aplicações onde é necessário minimizar a carga sobre os circuitos de entrada e também é adequado para aplicações sensíveis ao ruído, como amplificação de sinais de baixo nível em sistemas de áudio e instrumentação. Outro fato interessante é sua compatibilidade com uma variedade de fontes de alimentação, pois pode ser alimentado com uma faixa de tensão de $\pm 5V$ a $\pm 15V$.

4.0.2.1 Schematic

Figura 14 – Schematic do circuito de acionamento do conversor CA-CC utilizando TL082.

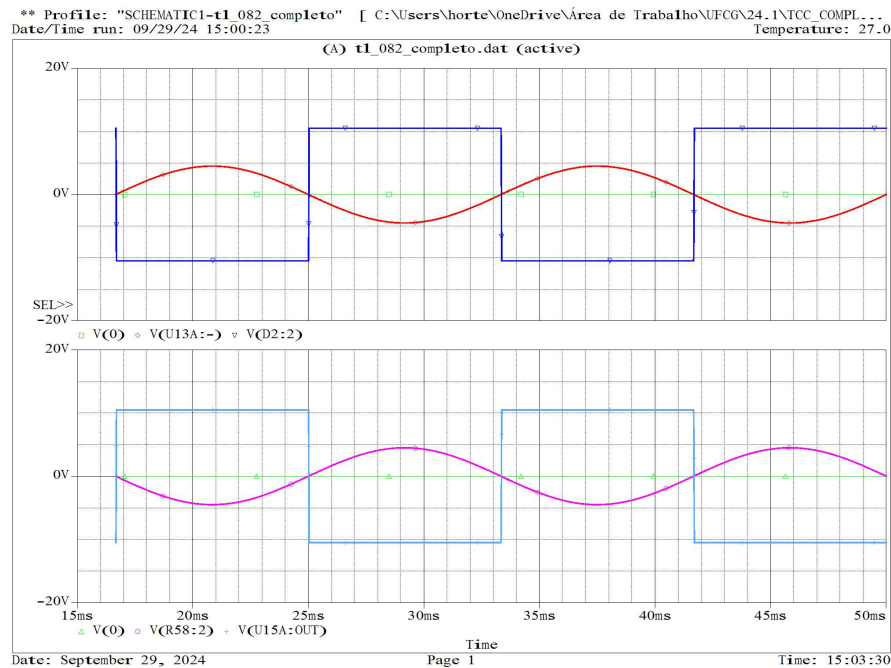


Fonte: autoria própria.

4.0.2.2 AmpOp1

Compara a senoide que vem da fonte CA com a referência em zero (terra), resultando em uma onda quadrada formada pelo cruzamento da senoide com o zero, como ilustrado na figura 15.

Figura 15 – A senoide e a referência zero são as entradas e a onda quadrada é o sinal de saída do AmpOp TL082.



Fonte: autoria própria.

Portanto, quando:

- Entrada inversora (senoide) > entrada não-inversora (terra):
 - A saída é a fonte de alimentação V-
- Entrada inversora (senoide) < entrada não-inversora (terra):
 - A saída é a fonte de alimentação V+

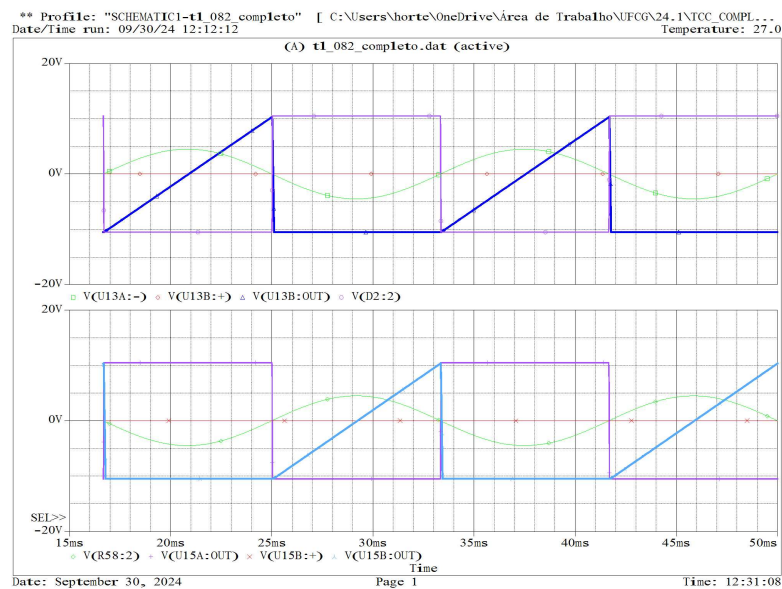
4.0.2.3 AmpOp2

Nesta etapa, tem-se um circuito integrador, em que o amplificador operacional é projetado para realizar a integração do sinal de alimentação V+ ao longo do tempo, sobretudo a partir do segundo período, ou seja, 16,667ms e, por esta razão, a simulação só é gravada a partir deste tempo. Esse tipo de circuito é útil para sistemas de controle e por isso ele é utilizado neste trabalho.

Portanto, levando em consideração a figura 16, têm-se que quando:

- Entrada inversora (onda quadrada) < entrada não-inversora (terra):
 - Tem-se a integral do sinal V_+ da fonte de alimentação, ou seja, uma reta com coeficiente positivo, sendo representada por um sinal dente de serra.
- Entrada inversora (onda quadrada) > entrada não-inversora (terra):
 - A saída é a fonte de alimentação V_- .

Figura 16 – A onda quadrada e a referência zero são as entradas e a onda dente de serra é o sinal de saída do AmpOp TL082.



Fonte: autoria própria.

Outro fato a ser observado é a permanência do sinal senoidal, pois, por ele ser a referência principal analisada para que o pulso de gatilho seja dado o mais próximo possível de zero graus, é importante que seja mantido. Dessa forma, é possível analisar com mais precisão o circuito, percebendo-se que o sinal dente de serra está sincronizado com o semiciclo positivo da senoide.

4.0.2.4 AmpOp3

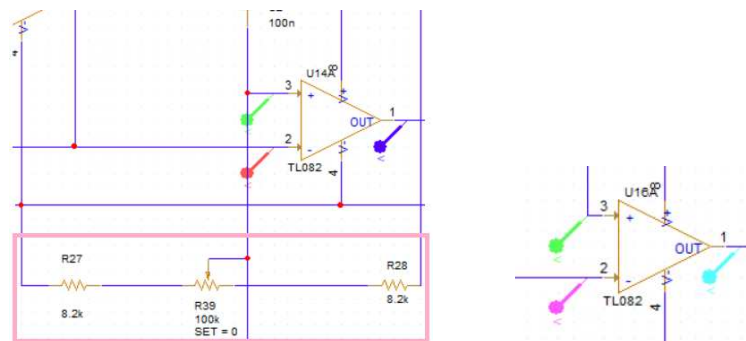
Nesta terceira dupla de AmpOps, a entrada inversora está conectada à saída do segundo AmpOp, ou seja, o sinal dente de serra. A comparação, neste circuito, ocorre em relação à referência, que está conectada à entrada não-inversora e relacionada ao potenciômetro R39.

Além disso, é importante observar que, no potenciômetro R39, existe uma variável chamada *set* e dois resistores laterais (R27 e R28, veja a figura 17), para R27 e para R28, o valor atribuído foi de $8,2k\Omega$.

Outro fato a ser observado é que, ao variar continuamente o *set* de 0 para 1, percebe-se que a saída do AmpOp3 comporta-se como uma modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation* - PWM). Dessa forma, ao proceder o ajuste desse parâmetro do potenciômetro e os resistores laterais, consegue-se variar a largura de pulso da saída deste AmpOp3. Por fim, o *set* do potenciômetro ilustrado na figura 17 é mantido em zero, sendo este o momento mais importante da análise, pois, é o mais próximo de quando a tensão da senoide passa por zero, sendo possível de realizar sincronia entre o pulso que está sendo gerado e a senoide.

- Entrada inversora (dente de serra) > entrada não-inversora:
 - A saída é a fonte de alimentação V-.
- Entrada inversora (dente de serra) < entrada não-inversora:
 - A saída é a fonte de alimentação V+.

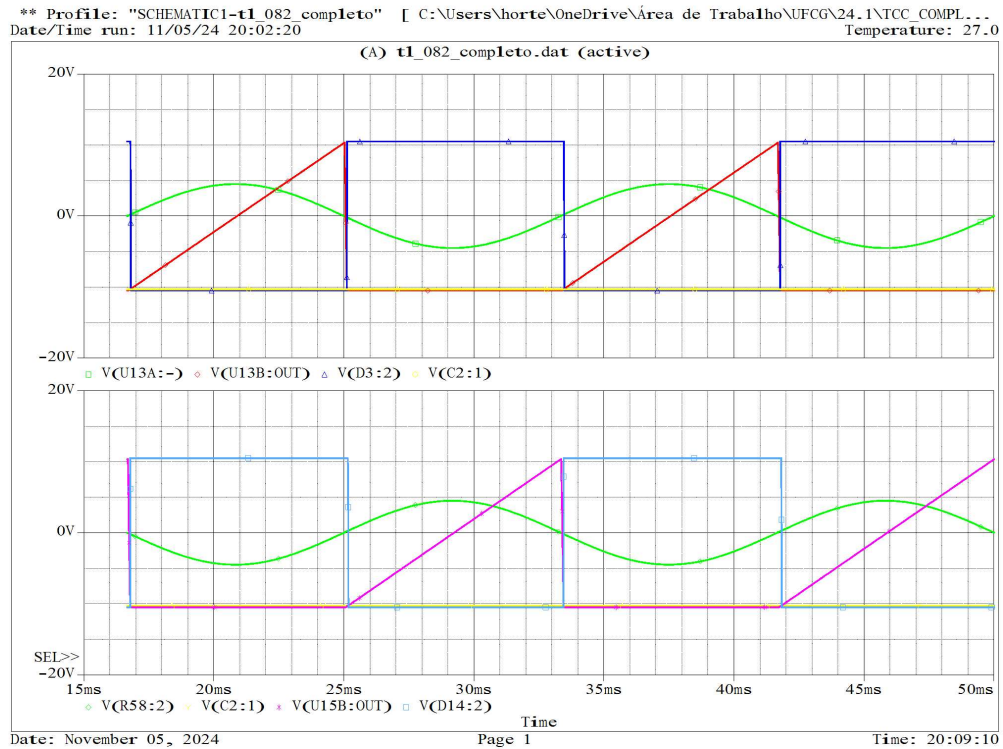
Figura 17 – Terceira dupla de AmpOps TL082 responsável por comparar o o sinal dente de serra e a referência.



Fonte: autoria própria.

A partir de 16.667ms, percebe-se que, quando o sinal dente de serra é maior que o sinal de referência, que tem valor aproximado de -10V, a saída tem a queda de tensão em quase 0 graus da senoide, mostrando que foi possível tornar este sinal sincronizado, como mostrado na figura 18.

Figura 18 – Comportamento dos sinais relacionados ao AmpOp3, mostrando sincronia entre a senoide, o dente de serra e o PWM.

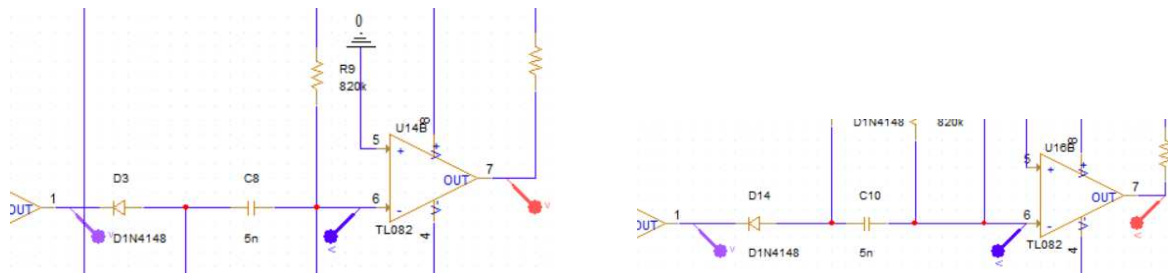


Fonte: autoria própria.

4.0.2.5 AmpOp4

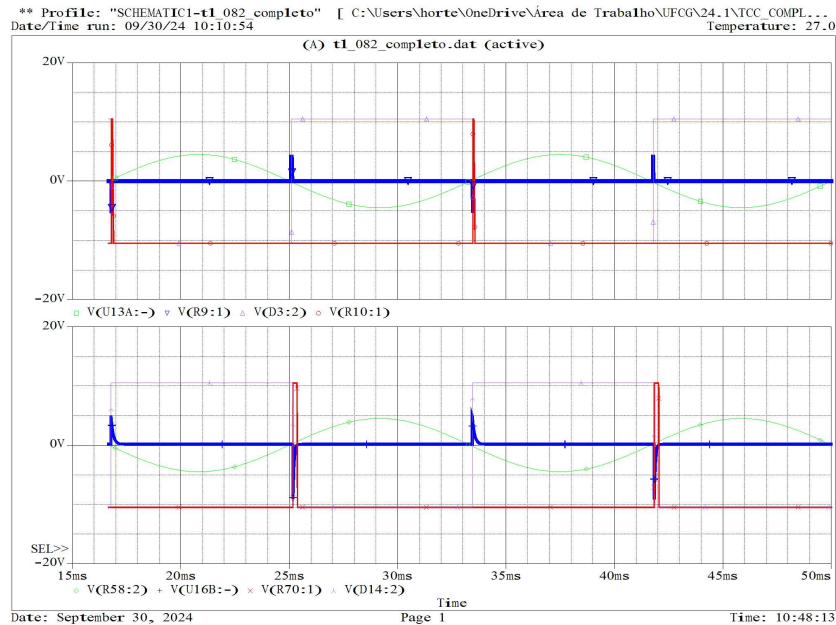
Nesta dupla de AmpOps, os capacitores C8 e C10 (veja a figura 19) estão derivando os sinais que saem da dupla de AmpOps3. Dessa forma, os sinais nas entradas inversoras que chegam na dupla de AmpOps4 está representado em azul na figura 20, sendo estes a derivada do sinal de saída do AmpOp3 (PWM), o que resulta em impulsos positivos e negativos.

Figura 19 – Quarta dupla de AmpOps TL082 responsável por comparar o sinal de impulsos positivos e negativos e a referência.



Fonte: autoria própria.

Figura 20 – Sinais relacionados à quarta dupla de AmpOps.



Fonte: autoria própria.

Portanto, quando:

- Entrada inversora > entrada não-inversora:
 - A saída é a fonte de alimentação V-.
- Entrada inversora < entrada não-inversora:
 - A saída é a fonte de alimentação V+.

Estando representado em vermelho da figura 20 o sinal que vai alimentar o transistor bipolar de junção.

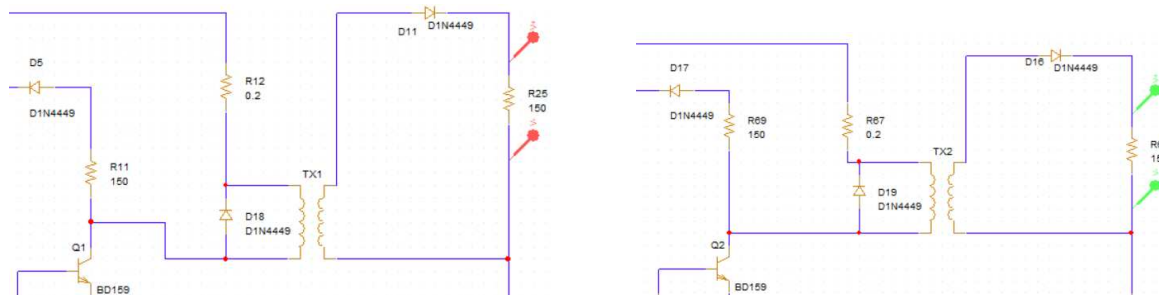
4.0.2.6 Sinal de Saída

As chaves Q1 e Q2 são transistores bipolares de junção (*Bipolar Junction Transistor - BJT*) do tipo NPN e têm como função amplificar o sinal do pulso gerado pelos AmpOps4.

Observa-se a necessidade de uso dos diodos D18 e D19 para servirem de caminho para a corrente quando o TBJ entra em estado de bloqueio, devido a energia armazenada no enrolamento do transformador. O uso do transformador de pulso se justifica pela necessidade de isolamento do circuito de comando do circuito de potência, uma vez que quase na totalidade das topologias dos conversores o catodo do SCR é conectado em um potencial, cuja tensão é diferente de zero, ou está flutuante, com relação ao nó de referência

(ou terra) da fonte de potência. Já os resistores R25 e R68, estão conectados entre o *gate* e o catodo do SCR, de modo que seja aplicado o pulso da tensão V_{gk} entre os terminais de *gate* e catodo do SCR, permitindo a aplicação do pulso de corrente I_g .

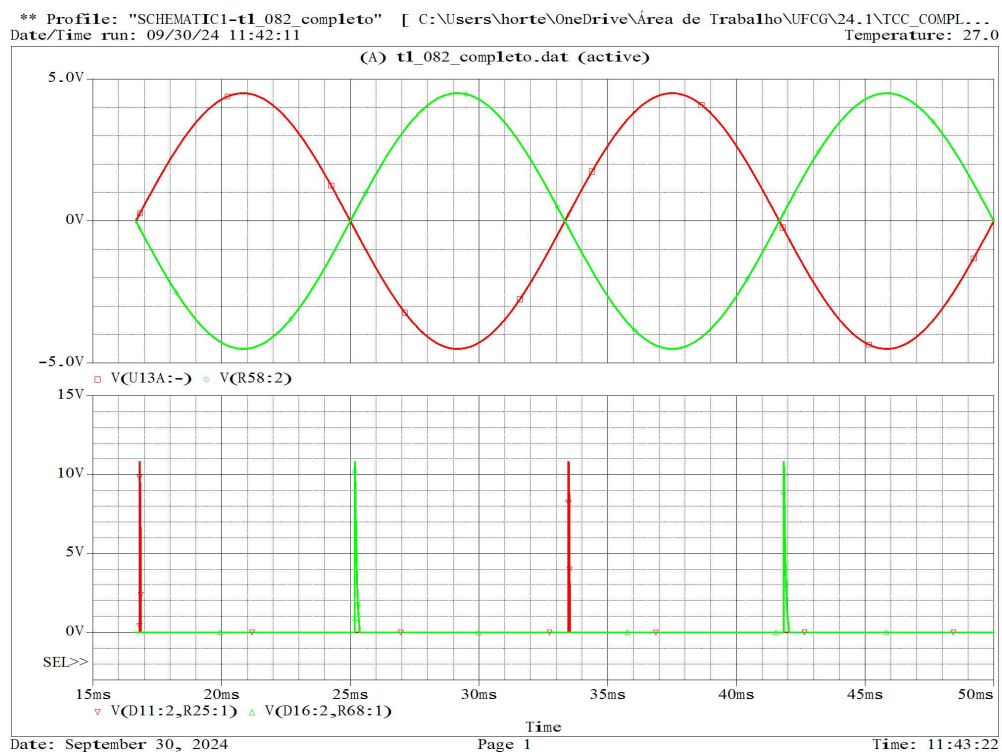
Figura 21 – Dupla de chaves (Q1 e Q2) e de transformadores (TX1 e TX2) no *Schematic* do circuito de acionamento de conversores CA-CC.



Fonte: autoria própria.

Na figura 22, tem-se a geração de impulsos que vai ativar o SCR sincronizado com a senoide.

Figura 22 – Sinal de saída sincronizado com a fonte senoidal.



Fonte: autoria própria.

Portanto, com o TL082, consegue-se medir o atraso deste pulso. Sendo assim:

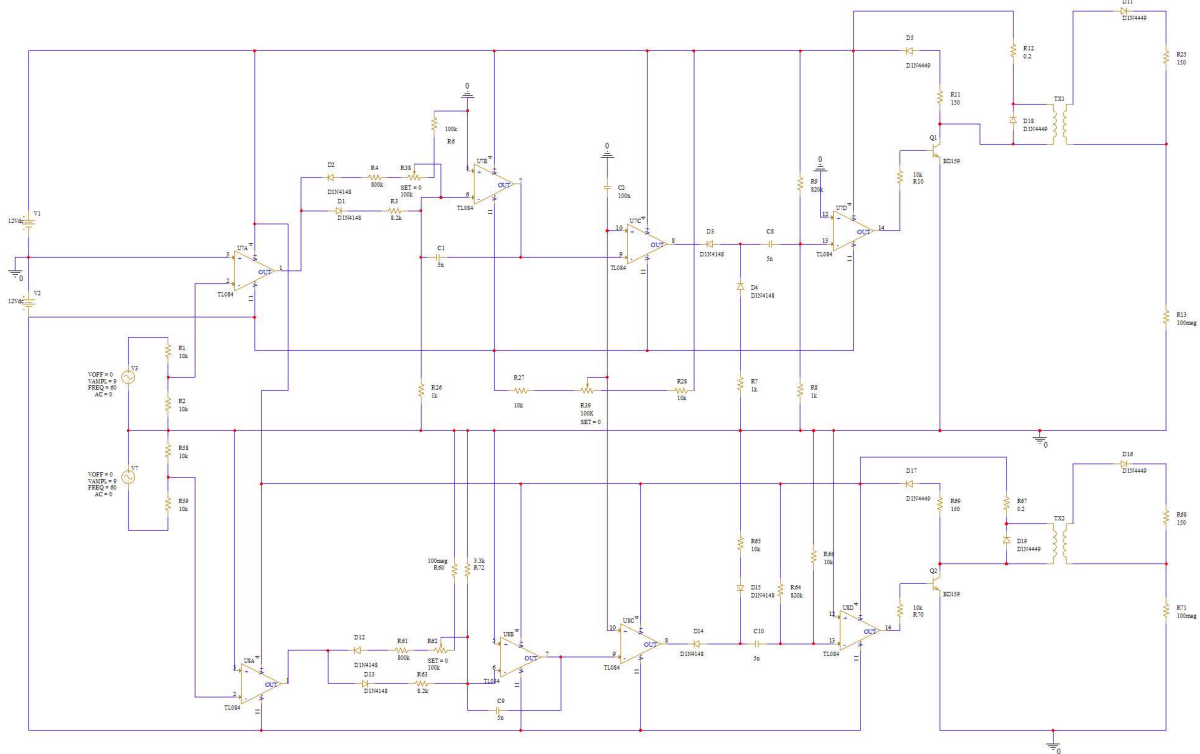
- $\Delta_{t082} = 143,861\mu s$, equivalente a $\alpha_{t082} = 3,11^\circ$, com tensão de pico de 10,788V.

4.0.3 TL084

O TL084 também é um amplificador operacional da família TL08x fabricado pela *Texas Instruments*. Ele possui quatro canais, o que significa que contém quatro AmpOps independentes em um único encapsulamento. Assim, como o TL082, isso é importante pois oferece flexibilidade para aplicações que exigem múltiplos AmpOps. Além disso, sua compatibilidade com uma variedade de fontes de alimentação o torna interessante, podendo ser alimentado com uma faixa de tensão de $\pm 5V$ a $\pm 18V$.

4.0.3.1 Schematic

Figura 23 – Schematic do circuito de acionamento do conversor CA-CC utilizando TL084.

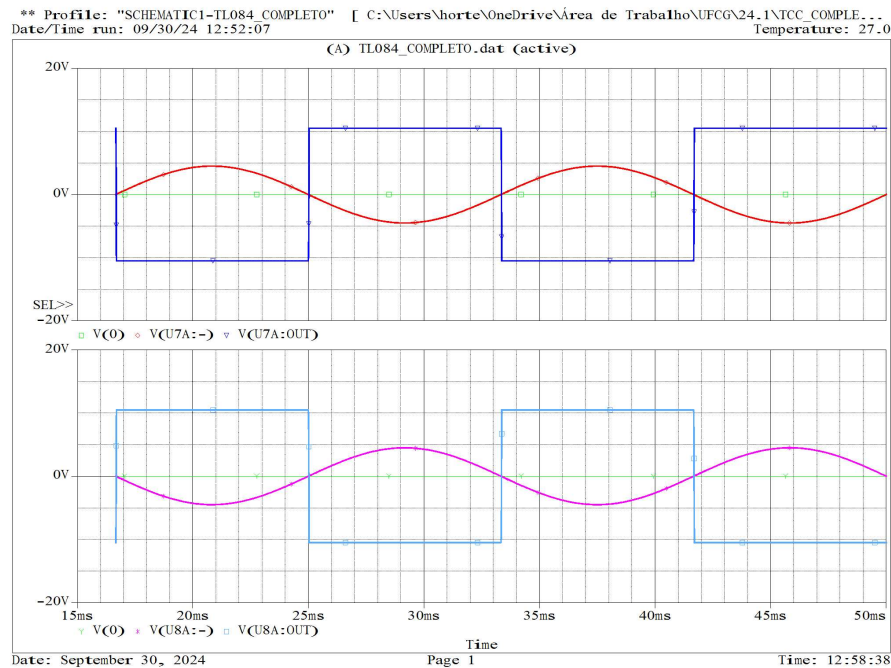


Fonte: autoria própria.

4.0.3.2 AmpOp1

Compara a senoide que vem da fonte CA com uma referência em zero (terra), como ilustrado na figura 24.

Figura 24 – A senoide e a referência zero são as entradas e a onda quadrada é o sinal de saída do AmpOp TL084.



Fonte: autoria própria.

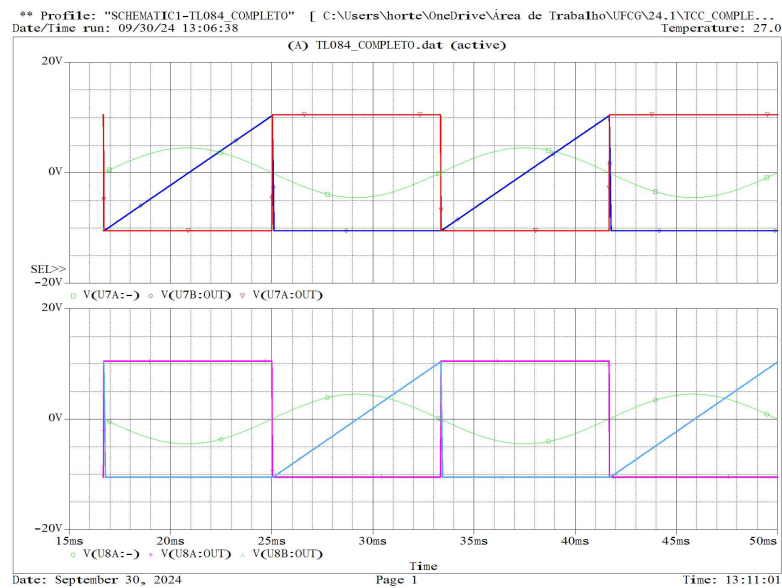
Portanto, quando:

- Entrada inversora (senoide) > entrada não-inversora (terra):
 - A saída é a fonte de alimentação V-
- Entrada inversora (senoide) < entrada não-inversora (terra):
 - A saída é a fonte de alimentação V+

4.0.3.3 AmpOp2

A análise dos sinais envolvidos neste AmpOp é importante porque é possível ter uma visão geral do funcionamento de cada etapa, sobretudo quando relacionado à sincronia e ao atraso. Assim, de acordo com a figura 25, o comportamento dos sinais envolvidos está como o esperado, uma vez que a integração está acontecendo de acordo com o semiciclo positivo do sinal senoidal.

Figura 25 – A onda quadrada e a referência em zero são as entradas e a onda dente de serra é o sinal de saída do AmpOp TL084.



Fonte: autoria própria.

Portanto, quando:

- Entrada inversora (onda quadrada) < entrada não-inversora (terra):
 - A partir de 16.667ms, tem-se a integral do sinal $V+$ da fonte de alimentação, ou seja, uma reta com coeficiente positivo, sendo representada por um sinal dente de serra, como ilustrado na figura 25.
- Entrada inversora (onda quadrada retificada) > entrada não-inversora (terra):
 - A saída é a fonte de alimentação $V-$.

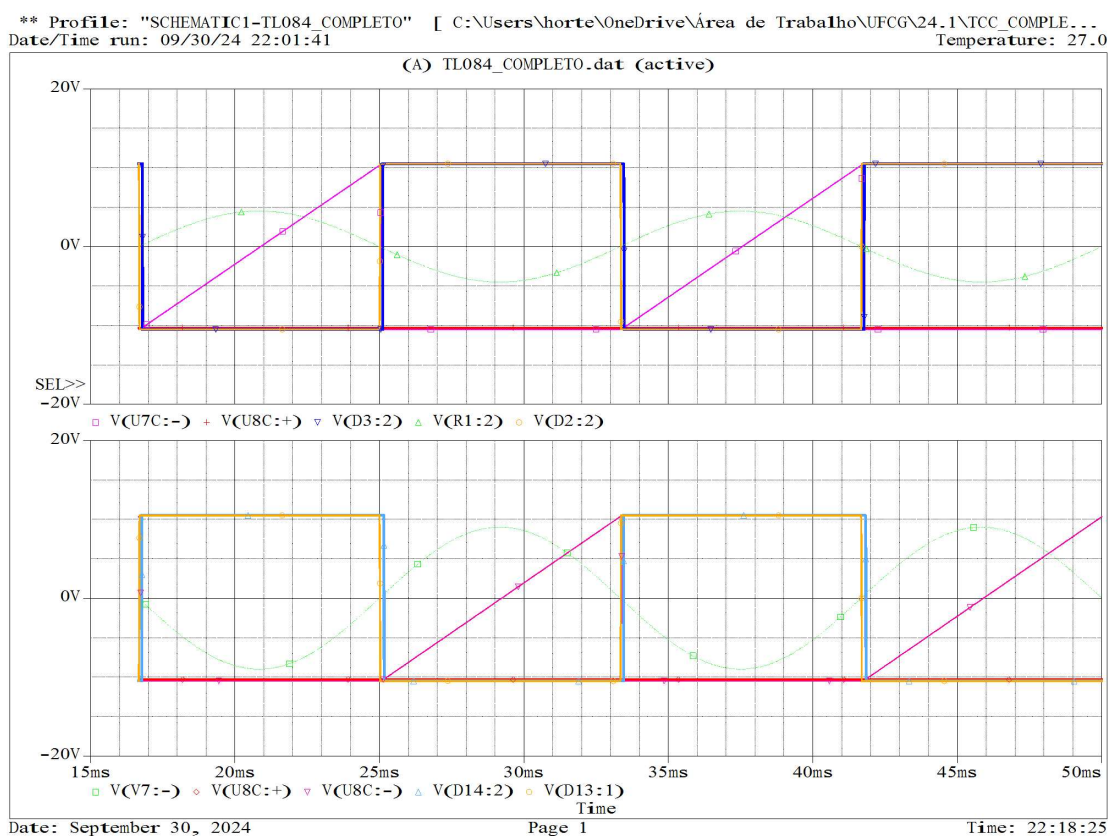
4.0.3.4 AmpOp3

Assim como no TL082, o funcionamento deste AmpOp ocorre semelhantemente, levando em consideração o potenciômetro R39 e os resistores laterais $R27 = R28 = 8.2k\Omega$.

Ao variar o *set*, do potenciômetro de 0 para 1, percebe-se que a saída do AmpOp3 comporta-se como uma modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation* - PWM). Apesar da possibilidade de variar este sinal com o ajuste do potenciômetro, é importante que a análise da sincronia e do atraso do sinal seja feito com $set = 0$, pois é o mais próximo que consegue-se estar da tensão senoidal em zero graus.

- Entrada inversora > entrada não-inversora:
 - A partir de 16,667ms, percebe-se que quando o sinal dente de serra é maior que o sinal de referência, a saída é caracterizada como o sinal PWM (veja a figura 26).
- Entrada inversora < entrada não-inversora:
 - A saída é a fonte de alimentação V+.

Figura 26 – Sinais relacionados à dupla de AmpOp3.



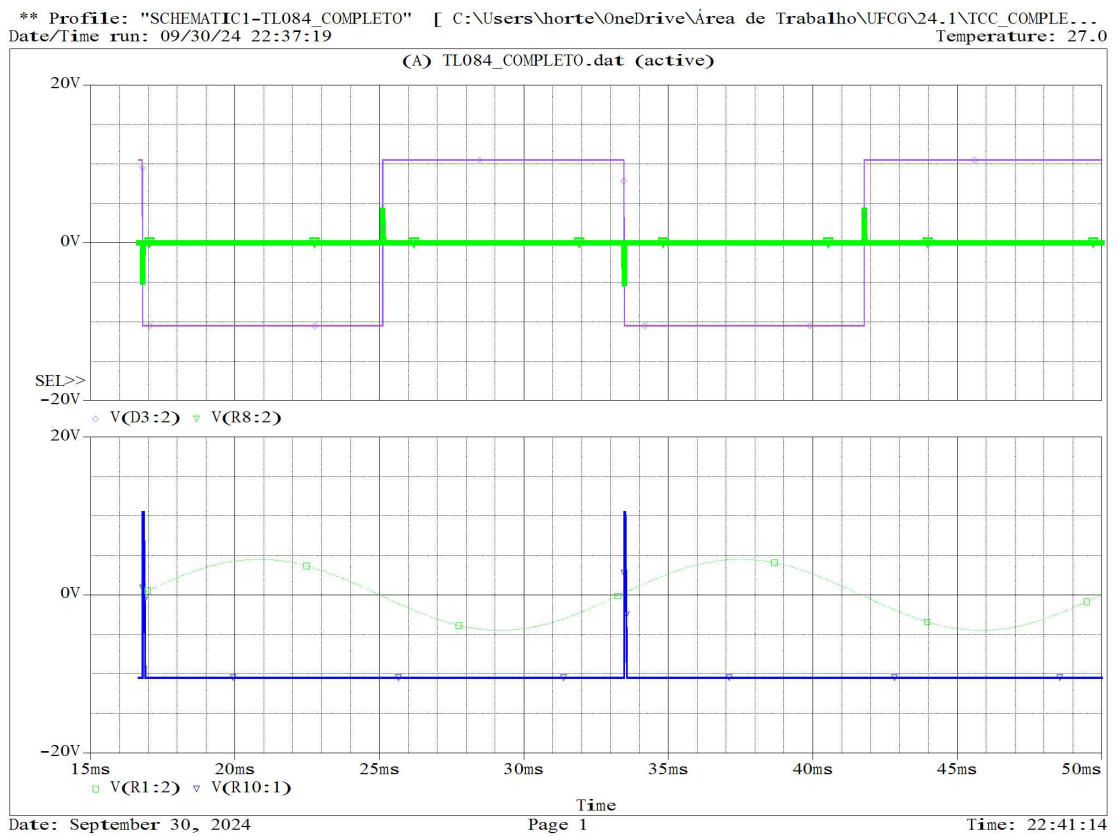
Fonte: autoria própria.

A figura 26 ilustra os sinais das entradas inversora (dente de serra) e não-inversora (constante e aproximadamente -10,309V), enquanto o sinal de saída (em azul marinho para o semiciclo positivo e azul claro para o semiciclo negativo) se comporta como uma PWM. Mas, para complementar a análise, foi deixado também o sinal laranja (para ambos semiciclos), que é a saída do AmpOp1 e que não tem atrasos, o que significa que ela torna-se interessante de comparar com a PWM. Concluindo-se, então, que o sinal que sai do AmpOp3 está discretamente atrasado.

4.0.3.5 AmpOp4

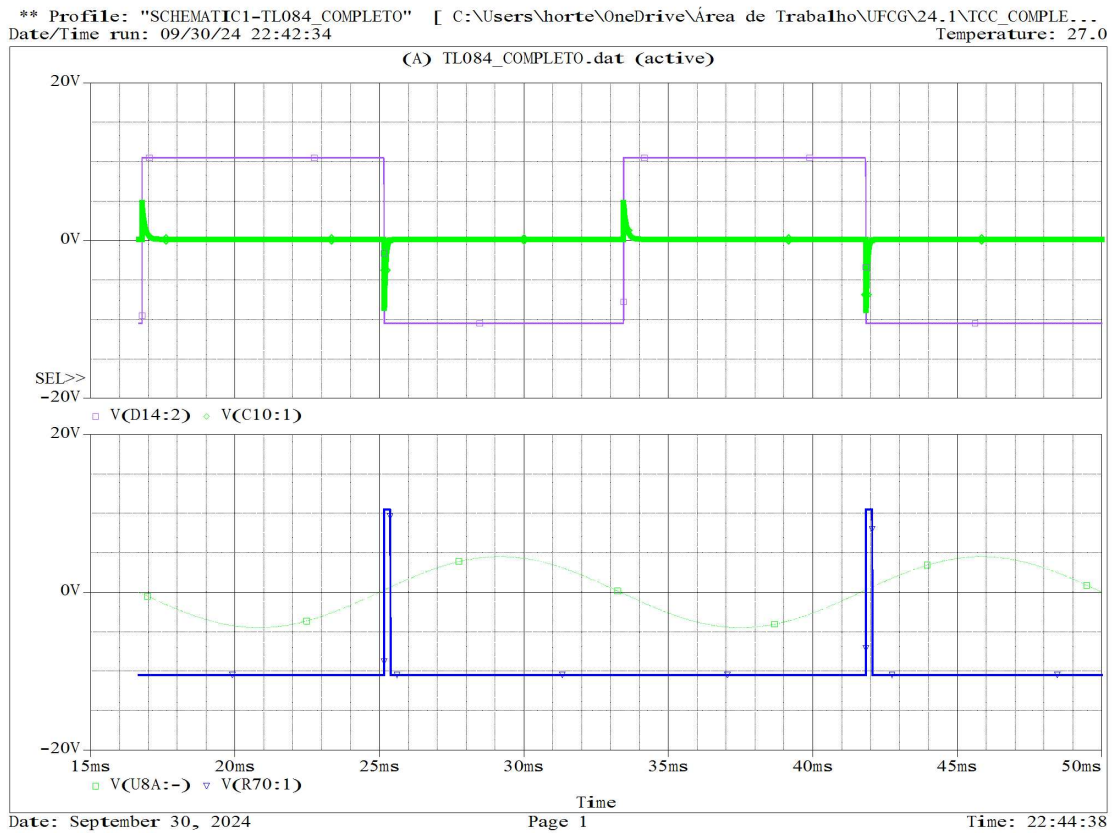
Nesta dupla de AmpOps, os capacitores C8 e C10 estão derivando os sinais que saem da dupla de AmpOps3, que por sua vez são sinais PWM que estão discretamente atrasados. Dessa forma, os sinais nas entradas inversoras que chegam na dupla de AmpOps4 está representado em verde na figura 27 e na figura 28, ou seja, este sinal na entrada inversora é a derivada do sinal de saída do AmpOp3 (PWM), resultando em impulsos positivos e negativos.

Figura 27 – Sinais relacionados ao AmpOp4 superior, sincronizado com o semiciclo positivo da senoide.



Fonte: autoria própria.

Figura 28 – Sinais relacionados ao AmpOp4 inferior, sincronizado com o semiciclo negativo da senoide.



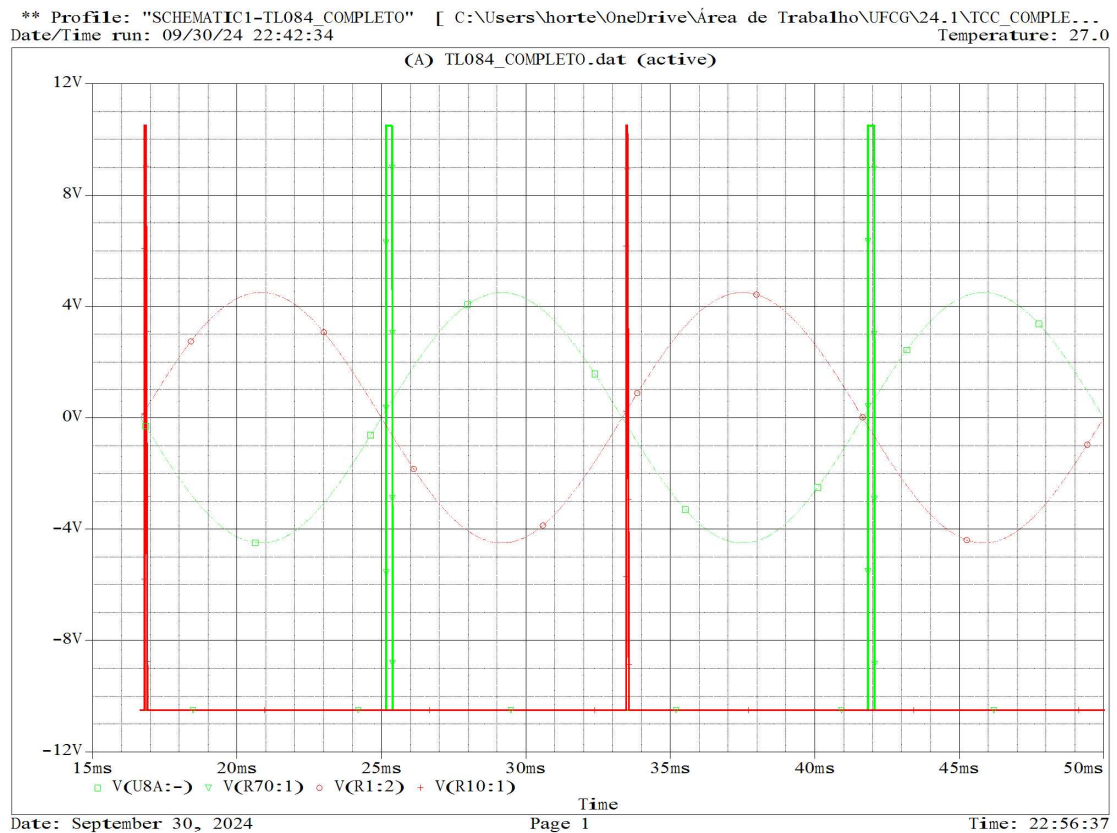
Fonte: autoria própria.

Portanto, quando:

- Entrada inversora $>$ entrada não-inversora:
 - A saída é a fonte de alimentação V-.
- Entrada inversora $<$ entrada não-inversora:
 - A saída é a fonte de alimentação V+.

Logo, é possível observar que, o sinal de saída da dupla de AmpOps4 está sincronizada com a fonte senoidal (veja a figura 29), apesar de possuir um atraso discreto. Estes sinais vão alimentar as chaves Q1 e Q2 e estão explicadas a seguir.

Figura 29 – Sinal de saída do AmpOp4.



Fonte: autoria própria.

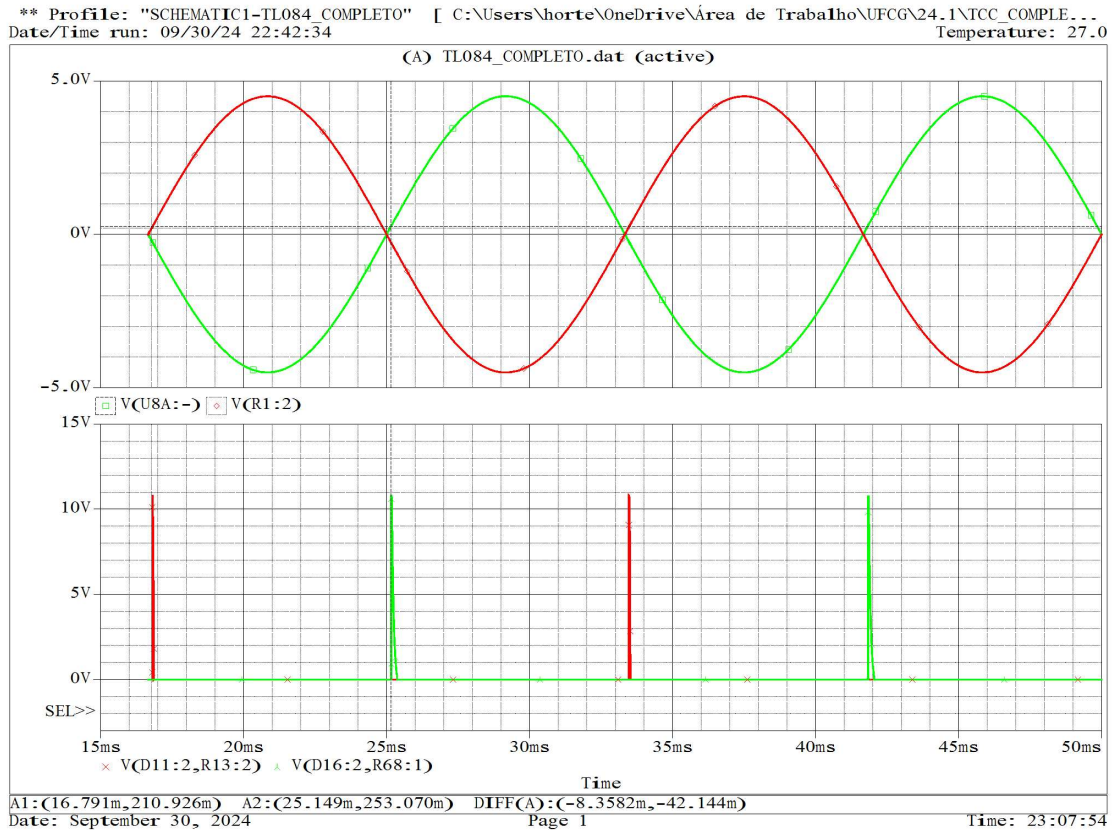
4.0.3.6 Sinal de Saída

As chaves Q1 e Q2 são transistores bipolares de junção (*Bipolar Junction Transistor* - *BJT*) do tipo NPN e têm como função de amplificar o sinal do pulso gerado pelos AmpOps4.

Observa-se a necessidade de uso dos diodos D18 e D19 para servirem de caminho para a corrente quando o TBJ entra em estado de bloqueio, devido a energia armazenada no enrolamento do transformador. O uso do transformador de pulso se justifica pela necessidade de isolamento do circuito de comando do circuito de potência, uma vez que quase na totalidade das topologias dos conversores o catodo do SCR é conectado em um potencial, cuja tensão é diferente de zero, ou está flutuante, com relação ao nó de referência (ou terra) da fonte de potência. Já os resistores R25 e R68, estão conectados entre o *gate* e o catodo do SCR, de modo que seja aplicado o pulso da tensão V_{gk} entre os terminais de *gate* e catodo do SCR, permitindo a aplicação do pulso de corrente I_g . Neste trabalho será utilizando SCRs da família 100 (TIC 106 a 126), que necessitam de pulsos de 9V à 12V para conduzirem. Como o resultado obtido da simulação foi de 10,787V, têm-se a

obtenção de pulsos de pico satisfatórios.

Figura 30 – Sinal de saída para ativar o gate dos SCRs em sincronia com a fonte CA.



Fonte: autoria própria.

Outro fato a ser observado é o atraso que ocorre para geração do primeiro pulso. Utilizando o AmpOp TL084, conclui-se:

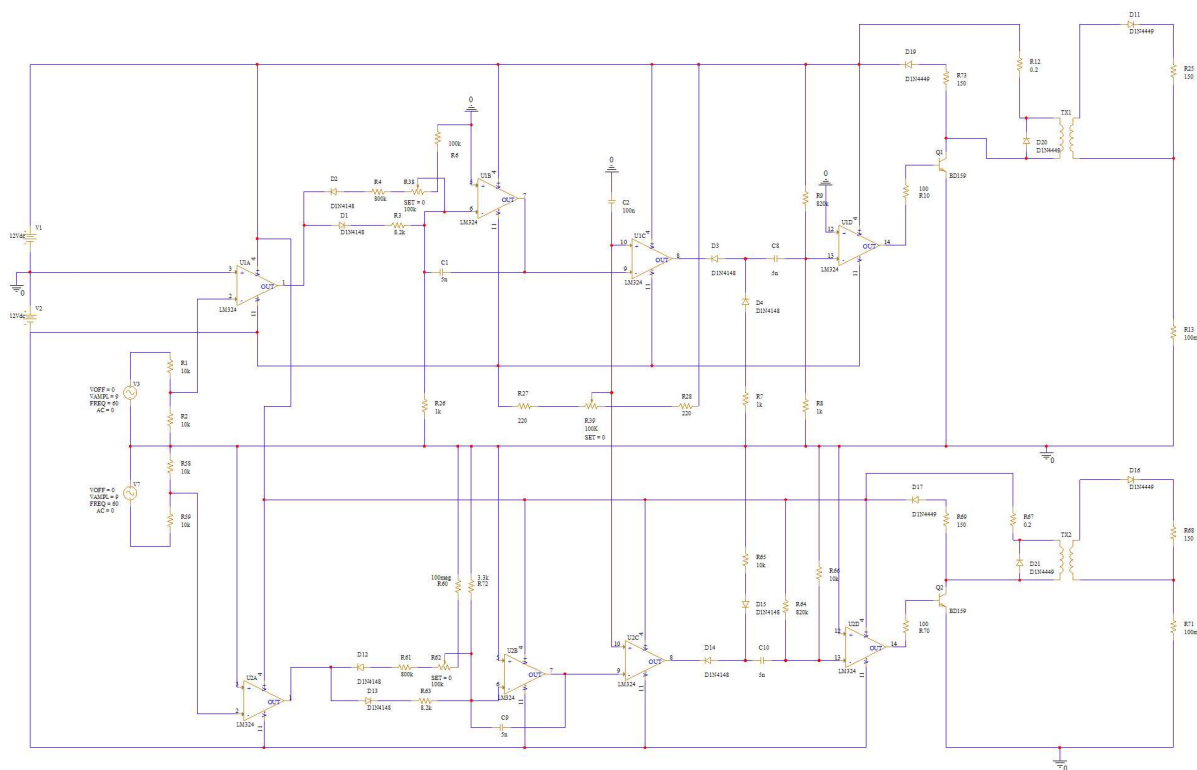
- $\Delta_{tl084} = 143.147\mu s$, equivalente a $\alpha_{tl084} = 3,09^\circ$ e tensão de pico de 10,787V.

4.0.4 LM324

O LM324 é um amplificador operacional da família LMx24 fabricado pela *Texas Instruments*. Ele possui quatro canais, o que significa que contém quatro AmpOps independentes em um único encapsulamento, oferecendo flexibilidade para aplicações que exigem múltiplos AmpOps. Além disso, ele é conhecido por sua ampla faixa de tensão de alimentação, o que o deixa compatível com uma variedade de fontes, operando entre 3V e 36V, o que lhe confere grande flexibilidade em diferentes contextos de uso.

4.0.4.1 Schematic

Figura 31 – Schematic do circuito de acionamento do conversor CA-CC utilizando LM324.



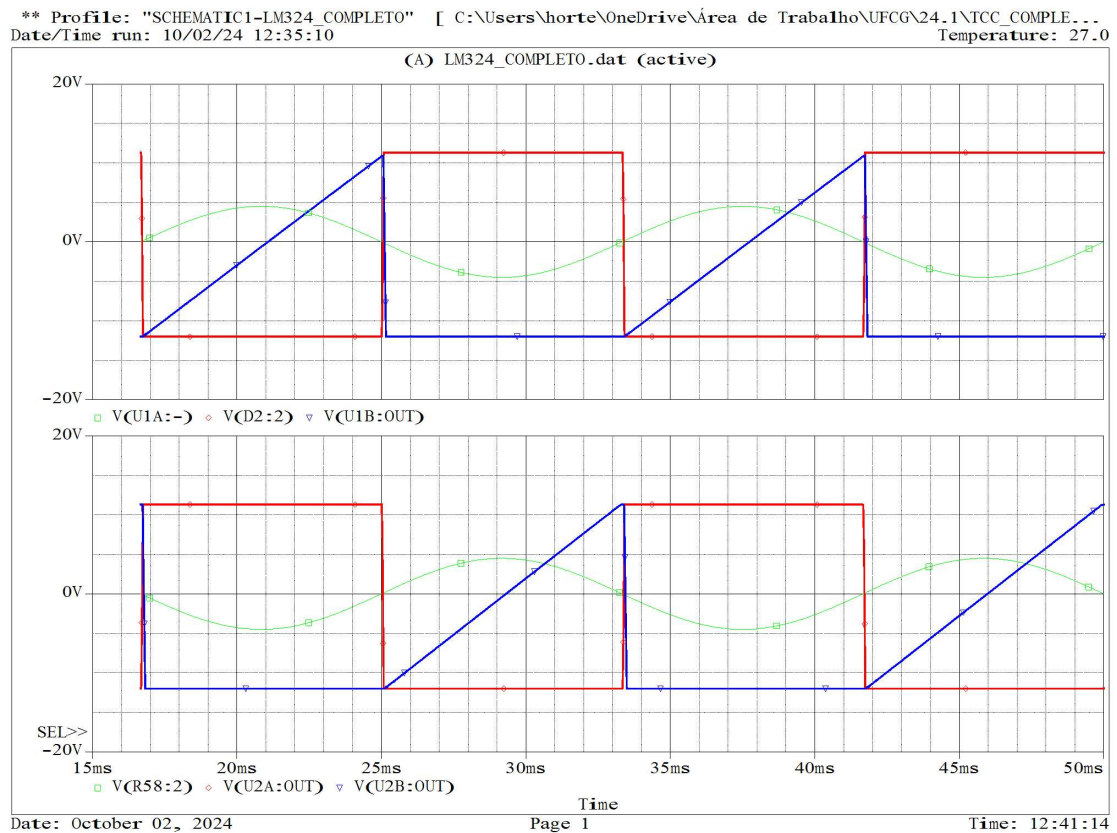
Fonte: autoria própria.

4.0.4.2 AmpOp1 e AmpOp2

Para tornar as análises mais objetivas, uma vez que as funcionalidades dos AmpOps 1 e 2 já foram descritas anteriormente, a figura 32 ilustra as formas de onda que estão associadas a estes amplificadores.

Desse modo, a senoide que vem da fonte CA vai para entrada inversora do AmpOp1, resultando em uma saída que está representada pelo sinal quadrado, que por sua vez será o sinal que vai para entrada inversora do AmpOp2, resultando na onda dente de serra. A análise compactada dessas formas de onda é importante, pois possibilita a visualização do momento em que a integração está sendo feita de acordo com cada senoide, demonstrando que, até este momento, há sincronia entre eles e não há atraso perceptível.

Figura 32 – Sinais relacionados aos AmpOps 1 e 2.



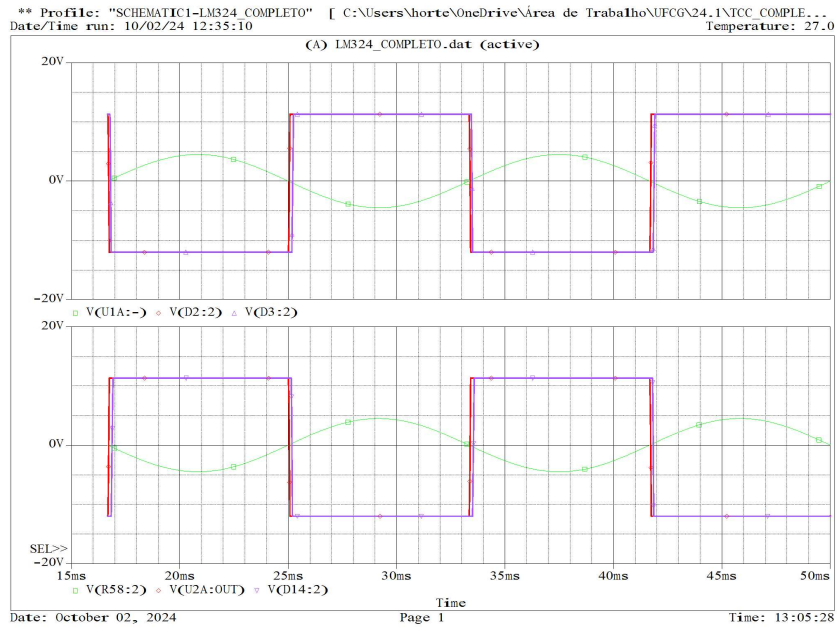
Fonte: autoria própria.

4.0.4.3 AmpOp3

A relação deste amplificador operacional com os resistores que se encontram ao lado do potenciômetro permite que a constante que está relacionada à entrada não-inversora possa aumentar ou diminuir.

A principal diferença para com as outras análises está relacionada aos resistores localizados ao lado do potenciômetro (R27 e R28). Neste caso, percebe-se que, com a redução da resistência, o circuito continua comparando o dente de serra e a constante ao configurá-los com $R27 = R28 = 220\Omega$, além de diminuir seu atraso. Na figura 33, o sinal atrasado está representado pela onda roxa, em relação ao sinal vermelho.

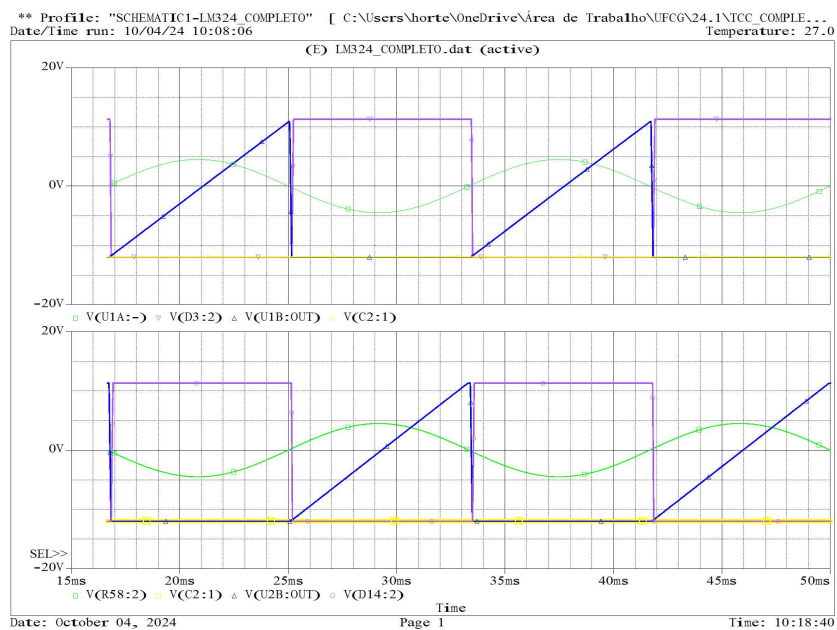
Figura 33 – Sinal roxo representando a saída do AmpOp3.



Fonte: autoria própria.

Por fim, os sinais envolvidos nesta parte podem ser visualizados na figura 34, sendo eles o dente de serra (azul), a referência, que é uma constante em -11,947V (amarelo) e o sinal de saída PWM (roxo).

Figura 34 – Sinais relacionados à dupla de AmpOps3.



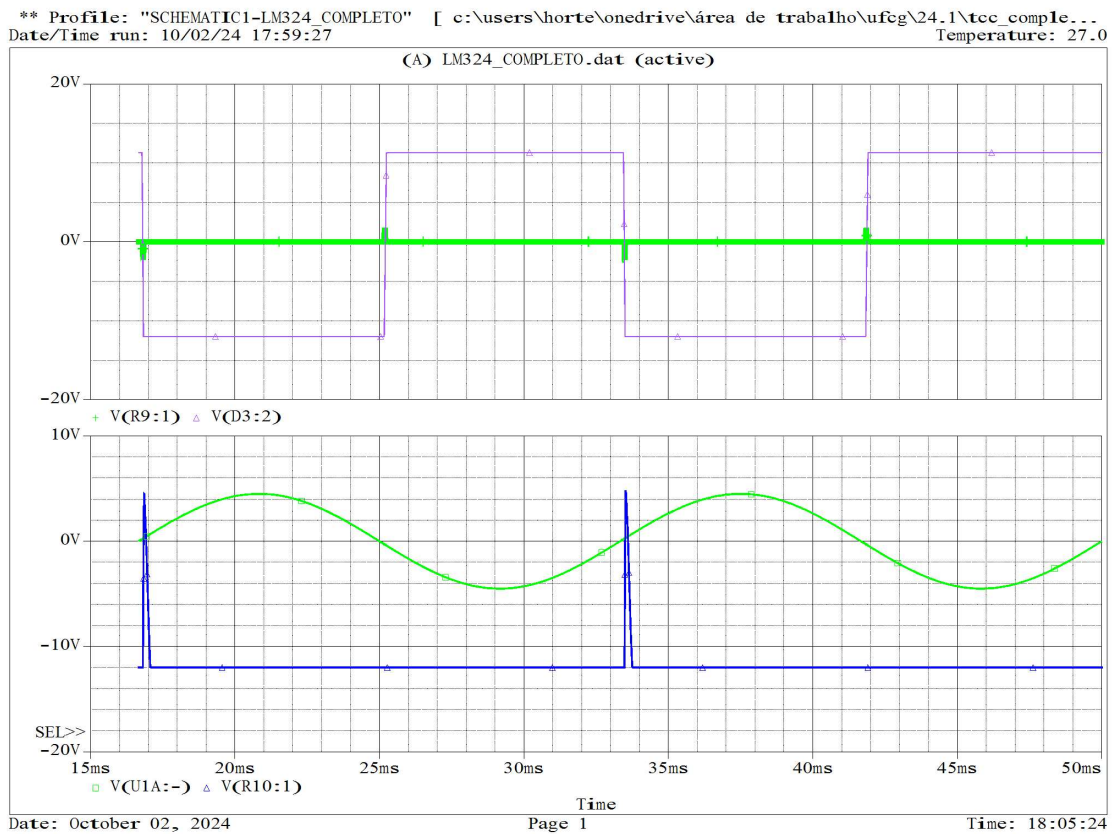
Fonte: autoria própria.

A seguir, será analisado como o pulso que vai para o TBJ se comportará.

4.0.4.4 AmpOp4

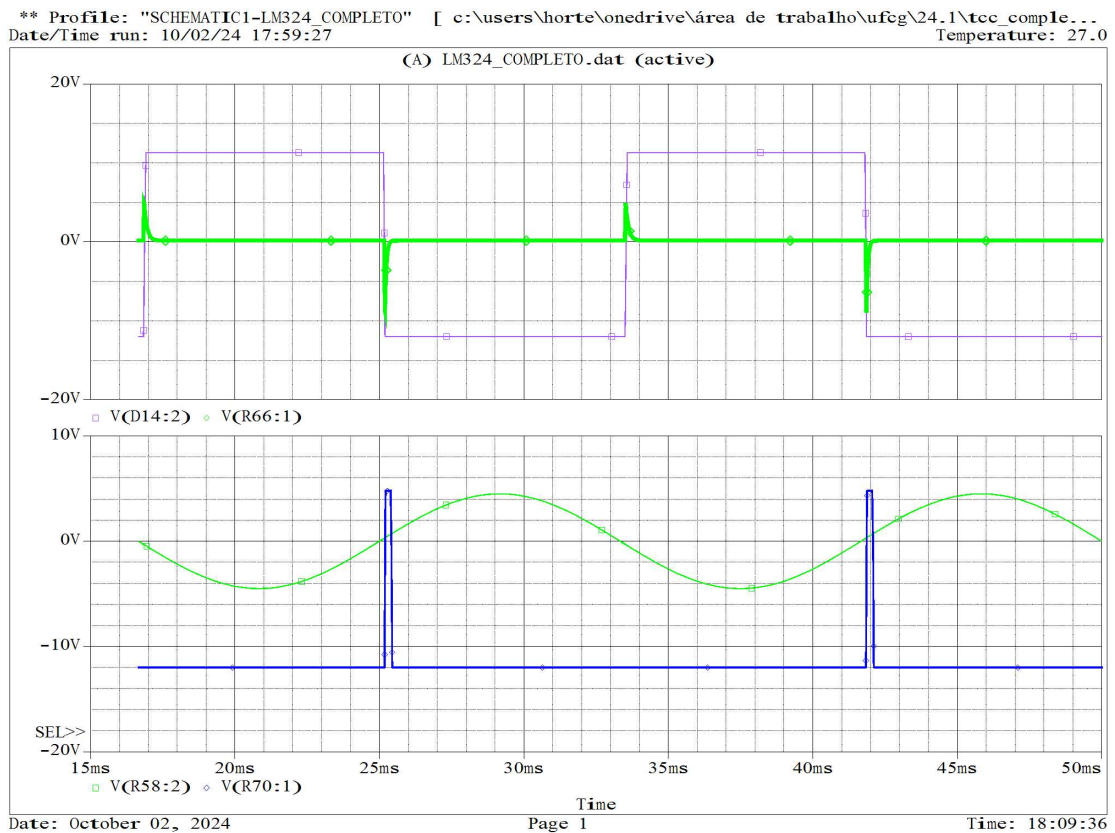
Sabendo-se que capacitores C8 e C10 estão derivando os sinais PWM que saem da dupla de AmpOps3, os sinais nas entradas inversoras que chegam na dupla de AmpOps4 está representado em verde, parte superior da figura 41 e superior da figura 36, resultando em impulsos positivos e negativos. Já a saída dos AmpOps4 está representado em azul marinho na parte inferior da figura 41 e inferior da figura 36.

Figura 35 – Sinais relacionados ao AmpOp4 superior.



Fonte: autoria própria.

Figura 36 – Sinais relacionados ao AmpOp4 inferior.



Fonte: autoria própria.

Portanto, quando:

- Entrada inversora > entrada não-inversora:
 - A saída é a fonte de alimentação V-.
- Entrada inversora < entrada não-inversora:
 - A saída é a fonte de alimentação V+.

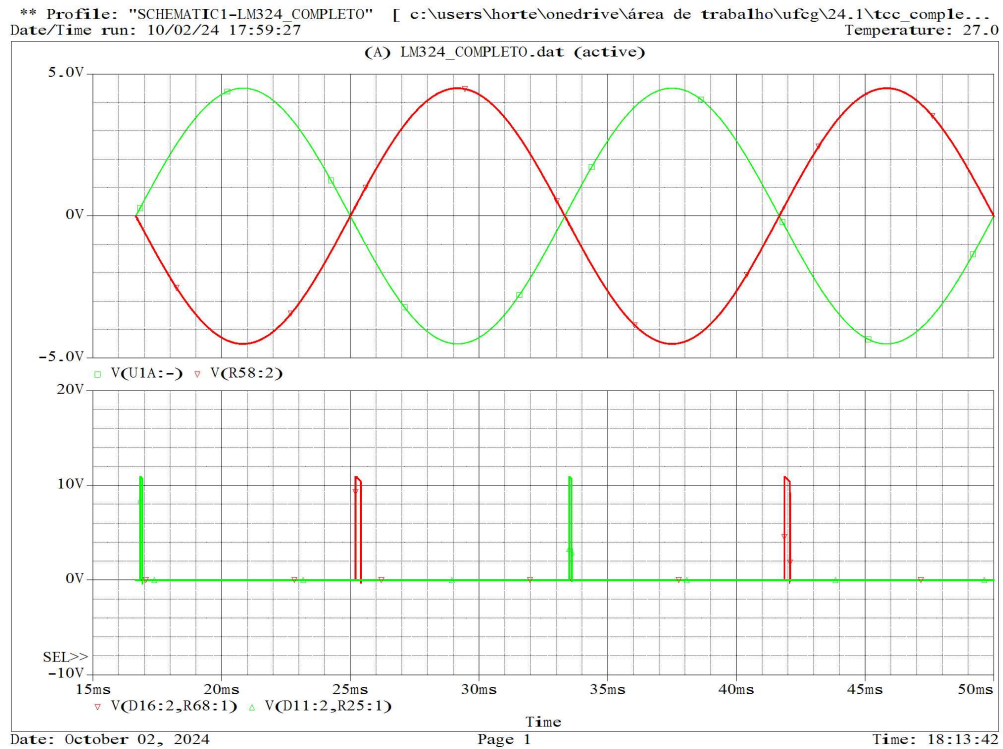
Dessa forma, consegue-se observar que o sinal que vai para os TBJs estão sincronizados com as senoides da fonte CA.

4.0.4.5 Sinal de Saída

Utilizando-se o LM324, percebe-se que o sinal que saía da quarta dupla de AmpOps não estava sendo suficiente para ser detectado pela chave Q1, por este motivo, necessitou-se reduzir o valor do resistor R10 e R70 para 100Ω.

No transformador, manteve-se $L_1 = L_2 = 10mH$, tornando-se possível de ser detectado, nos resistores R25 e R68, tensões máximas de 10,861V. Na figura 37 têm-se a ilustração da sequência de pulsos de gatilho no *gate* dos SCRs.

Figura 37 – Pulso de gatilho sincronizado com a fonte CA.



Fonte: autoria própria.

Por fim, para o LM324, obtiveram-se as seguintes conclusões:

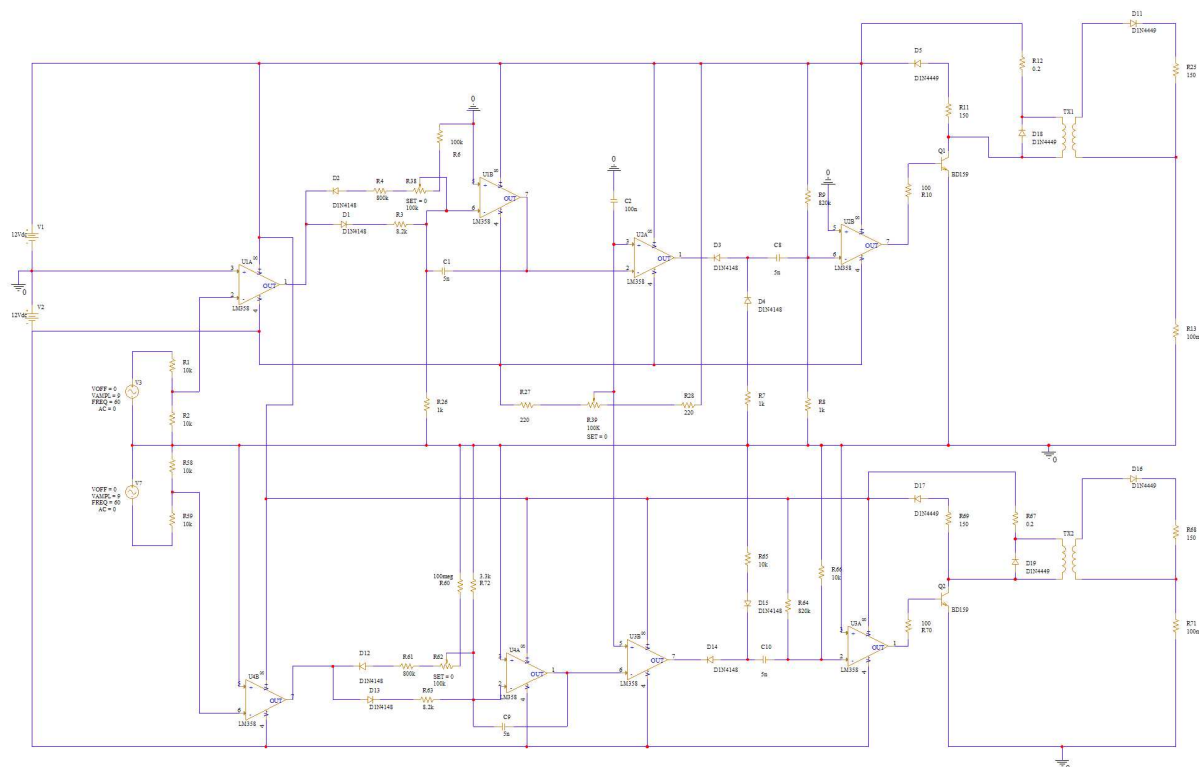
- Atraso de $\Delta_{lm324} = 172,557us$, equivalente a $\alpha_{lm324} = 3,73^\circ$ e tensão de pico de 10,861V.

4.0.5 LM358

O LM358 é fabricado pela *Texas Instruments* e possui dois canais, o que significa que contém dois AmpOps independentes em um único encapsulamento. Isso é importante pois podemos utilizá-lo em aplicações que exigem a utilização de mais de um AmpOp. Além disso, ele é conhecido por sua ampla faixa de alimentação, operando entre 3V e 32V, isso lhe confere grande flexibilidade em diferentes contextos de uso, dentre as quais podemos destacar: filtros ativos, reguladores de tensão, circuitos de controle de potência, aparelhos eletrônicos, além de ser ideal para aplicações que exigem eficiência energética pelo fato do baixo consumo de energia.

4.0.5.1 Schematic

Figura 38 – *Schematic* do circuito de acionamento do conversor CA-CC utilizando LM358.

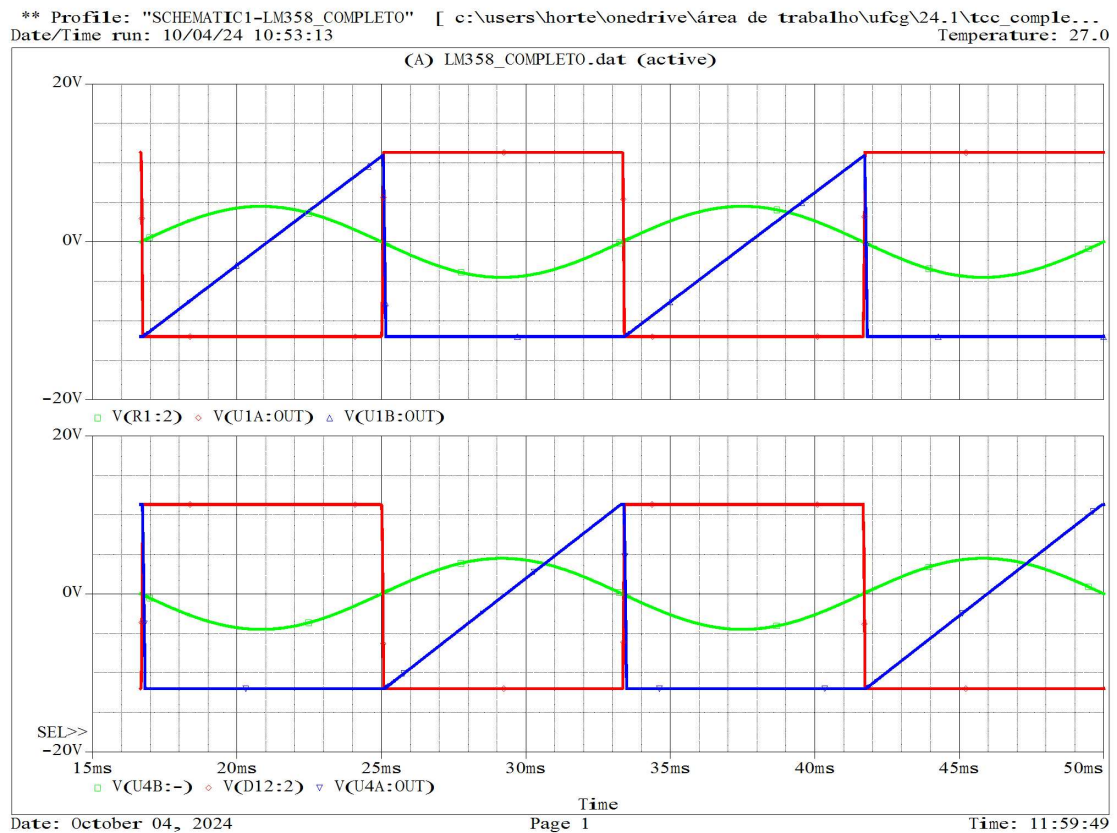


Fonte: autoria própria.

4.0.5.2 AmpOp1 e AmpOp2

Conforme esperado, o AmpOp1 compara a senoide que vem da fonte CA com uma referência em zero (terra), resultando em um sinal de saída quadrado. Já o AmpOp2, compara a onda que sai do AmpOp1 também com uma referência em zero, resultando no sinal dente de serra, conforme ilustrado na figura 39.

Figura 39 – Sinais relacionados aos AmpOps 1 e 2.



Fonte: autoria própria.

Percebe-se que a integração de $V+$ está sendo feita conforme o esperado, resultando em um sinal dente de serra, sincronizado com o semiciclo positivo da senoide.

Portanto, quando:

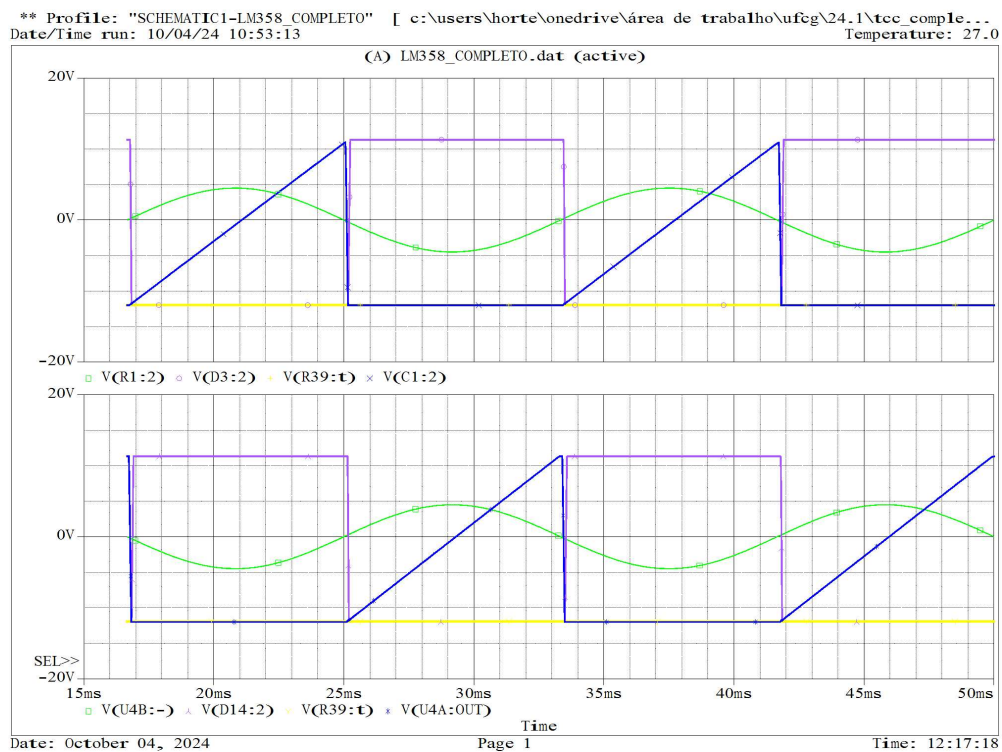
- Entrada inversora $>$ entrada não-inversora (terra):
 - A saída é a fonte de alimentação $V-$.
- Entrada inversora $<$ entrada não-inversora (terra):
 - A saída é a fonte de alimentação $V+$ para o caso do AmpOp1. Para o caso do AmpOp2, a saída é a integração de $V+$.

4.0.5.3 AmpOp2 e AmpOp3

A integração do sinal só acontece após o primeiro período, por isso, os dados estão sendo gravados após 16,667ms. Esse tipo de circuito é útil para gerar sinais de saída que variam de forma controlada e linear, pois ele suaviza variações abruptas que acontecem nos sinais de entrada do sistema, sendo importante para gerar um comando estável e confiável para o sistema e, por este motivo, ele é utilizado neste trabalho.

A figura 40 mostra o dente de serra, a referência, que é configurada através dos resistores $R27 = R28 = 220\Omega$ que estão ao lado do potenciômetro (R39) e o sinal de saída PWM.

Figura 40 – Sinal PWM gerado pelo AmpOp3.



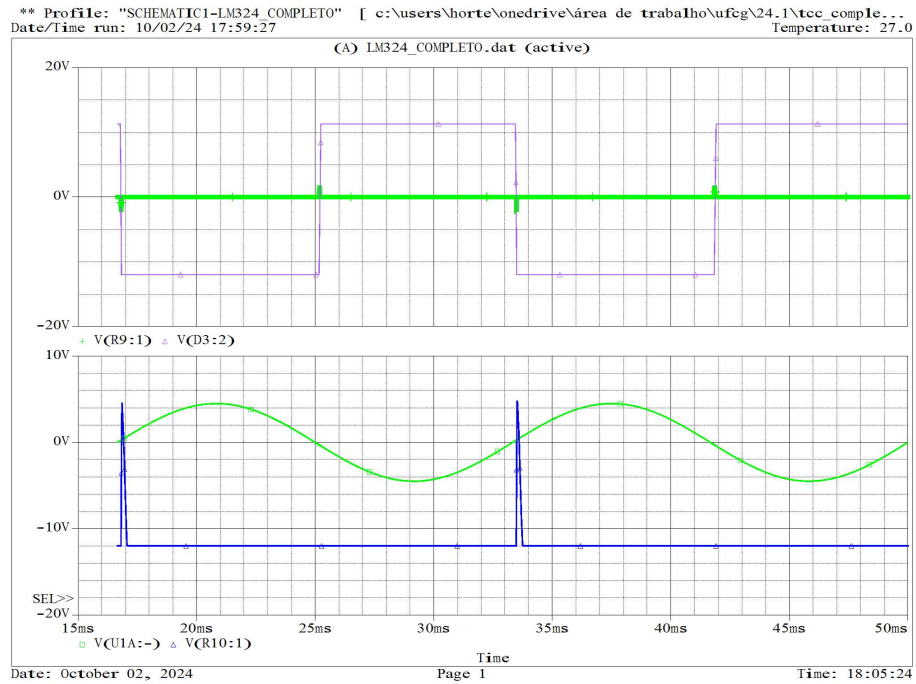
Fonte: autoria própria.

O sinal PWM, por sua vez, passa pelos capacitores C8 e C10, é derivado, resultando em impulsos positivos e negativos para ir para entrada inversora do AmpOp4.

4.0.5.4 AmpOp4

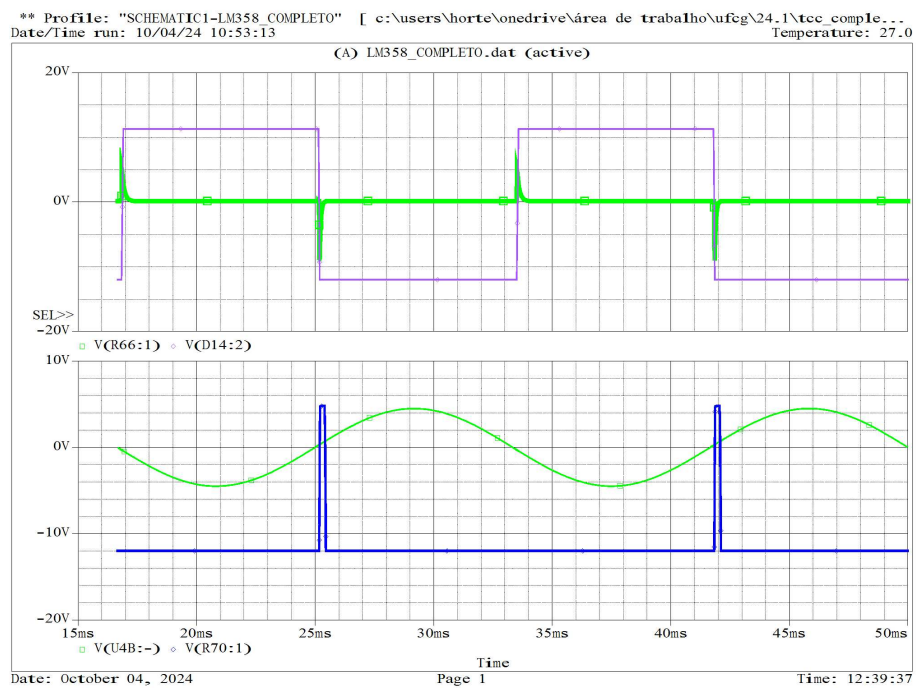
O sinal derivado do PWM, que vai para entrada inversora do AmpOp4, está ilustrado em verde na parte superior da figura 41 e da figura 42, bem como o sinal de saída deste mesmo AmpOp, ilustrado em azul na parte inferior da figura 41 e da figura 42.

Figura 41 – Sinais referentes ao semiciclo positivo da fonte CA envolvidos no AmpOp4.



Fonte: autoria própria.

Figura 42 – Sinais referentes ao semiciclo negativo da fonte CA envolvidos no AmpOp4.



Fonte: autoria própria.

Portanto, quando:

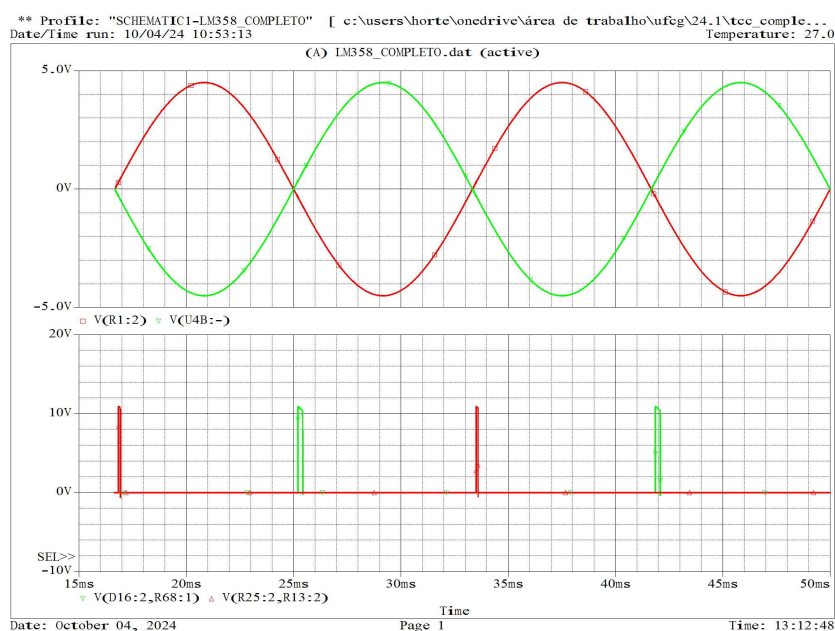
- Entrada inversora $>$ entrada não-inversora:
 - A saída é a fonte de alimentação V_- .
- Entrada inversora $<$ entrada não-inversora:
 - A saída é a fonte de alimentação V_+ .

Observa-se que os pulsos gerados por este AmpOp estão sincronizados com o semiciclo positivos da fonte CA, sendo eles que alimentarão os TBJs.

4.0.5.5 Sinal de Saída

Os TBJs, que têm como função amplificar o sinal de corrente de saída do AmpOp4 para alimentar o transformador de pulso, são ligados quando há saturação, permitindo passagem de corrente. Porém, quando bloqueados, diz-se que eles estão na região de corte. É importante analisar o momento em que o TBJ está bloqueado, pois, isso leva a necessidade de adicionar o diodo de roda livre em paralelo com o primário do transformador para que a corrente tenha por onde fluir quando esta chave for aberta. Por fim, o sinal transformado que vai acionar o *gate* do SCR, se comporta conforme a figura 43, onde ainda mantém-se o sinal da fonte CA para que seja visualizada a sincronia entre o pulso e o início de cada semiciclo positivo.

Figura 43 – Pulsos gerados para acionar o gate do SCR.



Portanto, para o AmpOp LM358:

- Atraso de $\Delta_{lm358} = 173,985us$, equivalente a $\alpha_{lm358} = 3,76^\circ$ e tensão de pico de 10,884V.

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

Observa-se que, dentre os amplificadores operacionais utilizados no circuito de comando do conversor CA-CC com SCR, o desempenho em termos de tempo de resposta foi um fator determinante para a escolha do dispositivo mais adequado. Foram testados os amplificadores de tensão TL082, TL084, LM324 e LM358, e constatou-se que o tempo de atraso no pulso de comando variou entre eles. O LM358 apresentou o maior tempo de atraso, com 173,985us, enquanto o TL084 destacou-se por ser o mais rápido, com um atraso de 143,147us, conforme a tabela 1.

Tabela 1 – Variáveis analisadas para diferentes AmpOps.

Amplificador operacional	TL082	TL084	LM324	LM358
Intervalo de atraso (us)	143,861	143,147	172,557	173,985
α (graus)	3,11	3,09	3,73	3,76
Tensão de pico (V)	10,788	10,787	10,861	10,884
Número de canais por CI	2	4	4	2
R27 = R28 (Ω)	10k	10k	220	220

Além disso, a escolha de circuitos integrados (CIs) com quatro canais (*Quad OpAmps*) em vez de CIs com dois canais (*Dual OpAmps*) traz vantagens em termos de otimização de espaço e custo no projeto do circuito. Como os CIs com quatro canais concentram mais amplificadores operacionais em um único encapsulamento, há uma redução imediata no número de componentes necessários no circuito impresso. Isso não só facilita o processo de fabricação e montagem, como também contribui para uma diminuição no custo total do projeto, visto que menos CIs serão adquiridos e montados. Por outro lado, a utilização de CIs com apenas dois canais implica em um maior número de componentes para alcançar o mesmo número de amplificadores, o que, além de aumentar o custo, exige um espaço físico maior na placa de circuito impresso e potencialmente pode aumentar o tempo de montagem e o risco de falhas devido à maior quantidade de conexões. Portanto, o uso de CIs com quatro canais é uma solução mais eficiente e econômica, principalmente quando se busca otimizar o espaço e os custos de produção.

Por fim, também é importante destacar que o sinal senoidal que está sendo aplicado ao circuito de comando é, na verdade, uma amostra representativa da tensão que será utilizada no circuito de potência. Esse sinal é crucial para garantir que o circuito de controle possa operar em sincronia com as condições reais de operação do sistema de potência, permitindo que as decisões de controle, como o acionamento dos dispositivos de potência (SCRs), sejam feitas de forma precisa e no momento adequado, de modo que atrasos e distorções na resposta do sistema sejam evitados, otimizando o funcionamento do conversor.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como proposta a análise de estruturas de circuito de comando para SCR de forma totalmente analógica, utilizando amplificadores operacionais. As estruturas analisadas tiveram como base os AmpOps de tensão TL082, TL084, LM324 e LM358, porém, tendo em vista a análise do tempo de atraso para gerar o gatilho, o melhor desempenho foi observado no TL084, resultando em maior precisão e eficiência no funcionamento do circuito. Além disso, também é importante levar em consideração o fato dele possuir quatro canais, o que implica na utilização de dois CIs para montagem do circuito completo.

Embora os resultados obtidos neste trabalho tenham sido satisfatórios para os objetivos propostos, existem algumas áreas que podem ser exploradas em trabalhos futuros para otimizar ainda mais o desempenho do circuito. Uma dessas áreas é a análise de amplificadores de corrente, como o LM359, que pode contribuir significativamente para melhorar a resposta do sistema, já que esses amplificadores possuem uma dinâmica de corrente mais rápida em comparação aos amplificadores de tensão convencionais.

Um estudo mais aprofundado sobre o uso de AmpOps de corrente no circuito de comando pode revelar novas formas de melhorar a precisão e o controle sobre os sinais de comando do SCR. O LM359, por exemplo, é projetado especificamente para alto desempenho em aplicações de alta frequência. Ele permite que diversos parâmetros internos sejam programados externamente, oferecendo maior flexibilidade para adaptar o amplificador a diferentes necessidades de projeto. Essas características o torna uma excelente alternativa para otimizar o controle de potência e melhorar a resposta dinâmica do circuito, podendo contribuir de forma significativa para análise de circuito acionamento de conversores CA-CC e aprimorar o desempenho do sistema de controle de gatilho dos SCRs.

Referências

ERICKSON, R.; MAKSIMOVIC, D. *Fundamentals of Power Electronics*. Springer US, 2001. (Online access with purchase: Springer). ISBN 9780792372707. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=On9-rJTR8ygC>>. Citado na página 17.

MOHAN, N.; UNDELAND, T.; ROBBINS, W. *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. [S.l.]: Wiley, 2003. (Power Electronics: Converters, Applications, and Design, v. 1). Citado 5 vezes nas páginas 11, 13, 15, 16 e 17.

OLIVEIRA, T. M. *Contribuição à Análise, Simulação e Implementação de Conversores CC/CC e CC/CA*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Paraíba, 1989. Área de Concentração: Processamento de Energia. Citado na página 17.

RAZAVI, B. *Fundamentals of Microelectronics*. [S.l.]: Wiley, 2013. (Fundamentals of Microelectronics). Citado 6 vezes nas páginas 11, 18, 19, 20, 21 e 22.