



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ANA CAROLINA BARROZO NOGUEIRA**

**PLATAFORMA DE CONTROLE POR MODO TENSÃO COM LIMITAÇÃO  
DE CORRENTE PARA APLICAÇÃO EM CONVERSORES CC-CC DA  
FAMÍLIA *BUCK***

**FORTALEZA**  
**2022**

ANA CAROLINA BARROZO NOGUEIRA

PLATAFORMA DE CONTROLE POR MODO TENSÃO COM LIMITAÇÃO DE  
CORRENTE PARA APLICAÇÃO EM CONVERSORES CC-CC DA FAMÍLIA  
*BUCK*

Tese ou Dissertação apresentada ao Programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Dalton de Araújo Honório.

**FORTALEZA**  
**2022**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

N71p Nogueira, Ana Carolina Barrozo.  
Plataforma de controle por modo tensão com limitação de corrente para aplicação em conversores CC-CC da família Buck / Ana Carolina Barrozo Nogueira. – 2022.  
102 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2022.  
Orientação: Prof. Dr. Dalton de Araújo Honório.

1. Plataforma EasyEDA. 2. Conversores CC-CC. 3. Modulação PWM. I. Título.

CDD 621.3

---

ANA CAROLINA BARROZO NOGUEIRA

PLATAFORMA DE CONTROLE POR MODO TENSÃO COM LIMITAÇÃO DE  
CORRENTE PARA APLICAÇÃO EM CONVERSORES CC-CC DA FAMÍLIA  
*BUCK*

Tese ou Dissertação apresentada ao Programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 15/07/2022.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Dalton de Araújo Honório  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Ernande Eugenio Campelo Moraes  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Eng. Me. José Willamy Medeiros de Araújo  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho, primeiramente, a Deus,  
que me deu forças para vencer todas as dificuldades.  
À minha mãe, Francisca, e a minha madrinha Beatriz  
(in memoriam) que infelizmente não pode estar  
presente nesse momento tão importante da minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer a Deus e a minha família meus pais Francisca Pereira Barrozo Nogueira e Rubens de Abreu Nogueira, meus irmãos João Paulo Barrozo Nogueira e Ana Clara Barrozo Nogueira Matoso, meus sobrinhos Francisco Wagner Nogueira Matoso, Ana Elisa Nogueira Matoso e Ana Beatriz Nogueira Matoso, meu cunhado Fabiano da Silva Matoso que foram minha força nos momentos difíceis e a todos que, de alguma forma me aconselharam e me guiaram durante o curso de engenharia meus colegas de turma Gustavo Penaforte, Letícia Bezerra, Lucca Costa, Emanuel Mota, meus colegas de trabalho e estágio Osana Braga, Tiago Terto, André Medeiros, Aurilene Lima, Lucas Maia, Elaine Pereira, Pâmela, Júlio Maciel, Wenderson Rebouças, José Batista, Andrey Maia e toda a equipe de mantenedores da Gerdau, aciaria, laminação e central, Amanda Lívia Muniz, Lucas Fernandes, Wesley dos Santos Araújo.

Agradeço as pessoas que conheci nesses sete anos de vida acadêmica que me ajudaram bastante: Erasmo Carlos Colares, Lidyane Viana, Flávio Costa, Adely Ribeiro,

Queria também agradecer a pessoas maravilhosas que ajudam na minha saúde mental: Helayne Torres Moreira, Fernanda Gonçalves de Oliveira, Liliane Gomes de Araújo, Lane Pinheiro, Jucileide Pereira da Silva, Lane Barbosa.

Meu eterno agradecimento a esses professores maravilhosos sem essa ajuda deles esse TCC não seria finalizado: René Pastor Torrico Bascopé, Luiz Daniel Santos Bezerra, ao pessoal da laboratório LCE que me acolheram: Vinícius Vasconcelos do Rêgo, Juliana Carvalho de Alencar.

“Por um mundo onde sejamos socialmente  
iguais, humanamente diferentes  
e totalmente livres”  
(Rosa Luxemburgo)

## RESUMO

Este trabalho apresenta um sistema de controle, modo tensão com limitação de corrente. Para seu desenvolvimento usamos eletrônica de potência e sistemas de controle, através da plataforma EasyEDA que permite a fabricação da placa de PCB -*Printed Circuit Board*. Para realizar as modulações PWM e o sistema de controle, foram usados como exemplo os conversores CC-CC *buck*, *forward* de uma chave, *forward* de duas chaves, *push-pull*, meia ponte e ponte completa. Será apresentado um exemplo de aplicação do sistema de controle que é o carregador de bateria, também será mostrado um circuito de uma fonte auxiliar *flyback* que tem como função a alimentação da placa e por fim o projeto de um conversor *buck* usado como fonte de alimentação, onde será apresentado o desenvolvimento do projeto tanto da malha de tensão como da malha de corrente, esse circuito é simulado no *software* PSIM onde são apresentados as formas de onda do conversor *buck* em regime permanente e dinâmico com potência de saída, maior e menor que a nominal.

**Palavras-chave:** plataforma EasyEDA, conversores CC-CC, modulação PWM.



## **ABSTRACT**

This work presents a control system, voltage mode with current limitation. For its development we use power electronics and control systems, through the EasyEDA platform that allows the manufacture of the PCB -Printed Circuit Board. To perform the PWM modulations and the control system, the DC-DC buck, one-key forward, two-key forward, push-pull, half-bridge and full-bridge converters were used as an example. An example of application of the control system that is the battery charger will be presented, it will also be shown a circuit of an auxiliary flyback source that has the function of feeding the board and finally the design of a buck converter used as a power supply, where the development of the design of both the voltage loop and the current loop will be presented, this circuit is simulated in the PSIM software where the buck converter waveforms are presented in steady and dynamic regime with output power, higher and lower than the nominal.

Keywords: EasyEDA platform, DC-DC converters, PWM modulation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Conversor buck.....	20
Figura 2 - Forma de onda da tensão de saída .....	21
Figura 3 - Modulação PWM conversor buck .....	21
Figura 4 - Conversor forward de uma chave .....	22
Figura 5 - Modulação PWM conversor forward de uma chave .....	23
Figura 6 - Conversor forward de duas chaves .....	23
Figura 7 - Modulação PWM conversor forward duas chaves .....	24
Figura 8 - Conversor push-pull.....	25
Figura 9 - Modulação PWM do conversor push-pull.....	25
Figura 10 - Conversor meia ponte .....	26
Figura 11 - modulação PWM do conversor meia ponte.....	26
Figura 12 - Conversor ponte completa .....	27
Figura 13 - Modulação PWM do conversor ponte completa .....	28
Figura 14 - Diagrama de blocos em malha fechada .....	29
Figura 15 - Plano s ou complexo com polos e zeros .....	30
Figura 16 - Compensador tipo 1 .....	31
Figura 17 - Diagrama de bode do compensador tipo 1.....	32
Figura 18 - Compensador do tipo 2 .....	32
Figura 19 - Diagrama de Bode compensador tipo 2.....	33
Figura 20 - Compensador tipo 3 .....	33
Figura 21 - Diagrama de Bode compensador tipo 3.....	34
Figura 22 - Fonte de alimentação do tipo buck .....	35
Figura 23 - Fonte auxiliar do tipo flyback.....	35
Figura 24 - Malha de tensão .....	36
Figura 25 - Seguidor de tensão .....	36
Figura 26 - Malha aberta e malha fechada UC 3525 A.....	37
Figura 27- Malha de corrente .....	38
Figura 28 - Subtrator .....	38
Figura 29 - Carregamento da bateria de íon-lítio .....	39
Figura 30 - Controlador PID tipo cascata.....	41
Figura 31 - Projeto esquemático.....	44
Figura 32 - Circuito integrado UC3525 A.....	45
Figura 33 - Malha de tensão .....	47

Figura 34 - Malha de corrente .....	49
Figura 35 - Circuito integrado IR21844 .....	51
Figura 36 - Circuito integrado FOD3184 .....	52
Figura 37 - Parte interna do circuito integrado FOD3184.....	52
Figura 38 - Circuito do flyback .....	53
Figura 39 - Circuito integrado TOP249Y .....	54
Figura 40 - Realimentação da tensão.....	55
Figura 41 - Página inicial EasyEDA .....	57
Figura 42 - Tela para fazer o login .....	58
Figura 43 - Ambiente padrão STD .....	58
Figura 44 - Painel de navegação.....	59
Figura 45 - Projetos .....	59
Figura 46 - Gerente de design.....	60
Figura 47 - Commonly library.....	60
Figura 48 - Biblioteca.....	61
Figura 49 - LCSC .....	61
Figura 50 - Lixeira.....	61
Figura 51 - Ferramentas de desenho.....	62
Figura 52 - Ferramentas de ligação .....	62
Figura 53 - Converter Esquema para PCB .....	63
Figura 54 - Tipo de componente PTH (a) ou SMD (b) .....	64
Figura 55 - Ambiente de trabalho PCB .....	64
Figura 56 - Roteamento automático .....	65
Figura 57 - Ferramentas PCB .....	65
Figura 58 - Camadas e objetos .....	67
Figura 59 - Placa PCB em 2D .....	67
Figura 60 - Unidade dos componentes para projeto.....	68
Figura 61 - Encontrar objetos similares.....	68
Figura 62 - Formato dos pads.....	69
Figura 63 - Posição dos componentes .....	69
Figura 64 - Checar DRC.....	70
Figura 65 - Compartilhar projeto.....	70
Figura 66 - Compartilhar projeto editar projeto .....	71
Figura 67 - Compartilhar projeto adicionar membros.....	71
Figura 68 - Compartilhar projeto publicar e compartilhar .....	71

Figura 69 - Lista dos componentes para prototipagem da placa .....	72
Figura 70 - Arquivo BOM da PCB.....	72
Figura 71 - Jumpers para escolha do conversor .....	73
Figura 72 - Chave de acionamento do esquemático do conversor buck .....	73
Figura 73 - Chave de acionamento do conversor buck .....	74
Figura 74 - Chave de acionamento do esquemático do conversor forward de uma chave .....	74
Figura 75 - Chave de acionamento do conversor forward uma chave .....	75
Figura 76 - Chave de acionamento do esquemático do conversor forward de duas chave .....	75
Figura 77 - Chave de acionamento do conversor forward duas chaves .....	76
Figura 78 - Chave de acionamento do esquemático do conversor push-pull .....	76
Figura 79 - Chave de acionamento do conversor push-pull .....	77
Figura 80 - Chave de acionamento do esquemático do conversor meia ponte.....	77
Figura 81 - Chave de acionamento do conversor meia ponte .....	78
Figura 82 - Chave de acionamento do esquemático do conversor ponte completa.....	78
Figura 83 - Chave de acionamento do conversor ponte completa.....	79
Figura 84 - Circuito da fonte de alimentação conversor buck.....	80
Figura 85 - Diagrama de blocos do controle .....	83
Figura 86 - Forma de onda tensão x corrente .....	83
Figura 87 - Diagrama de bode $G_v(s)$ (a) ganho (b) fase.....	85
Figura 88 - Curvas de avanço de fase do fator K .....	86
Figura 89 - Compensador tipo 2 .....	87
Figura 90 - Diagrama de bode do compensador $C_v$ (a) ganho (b) fase.....	87
Figura 91 -Diagrama de Bode de FTLAccv: (a) ganho e (b) fase.....	88
Figura 92 - Diagrama de bode com (a) ganho (b) fase.....	89
Figura 93 - Curvas de avanço de fase em função do fator K.....	90
Figura 94 - Compensador tipo 2 .....	91
Figura 95 - Diagrama de bode do compensador $C_v$ (a) ganho (b) fase.....	91
Figura 96 -Diagrama de Bode de FTLAccv: (a) ganho e (b) fase.....	92
Figura 97 - Medição da tensão e da corrente na saída do circuito eletrônico.....	92
Figura 98 - Formas de onda da tensão e corrente no regime permanente potência de saída menor.....	93
Figura 99 - Formas de onda da tensão e corrente no regime dinâmico potência de saída menor.....	94

Figura 100 - Formas de onda da tensão e corrente no regime permanente potência de saída maior.....	94
Figura 101 - Formas de onda da tensão e corrente no regime dinâmico potência de saída maior.....	95
Figura 102 – Projeto da placa de circuito .....	96
Figura 103 - Placa desenhada na fresa de acordo com o projeto.....	96

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modulador de PWM UC 3525 A .....	45
Tabela 2 - Gerador de temo morto IR21844 .....	51
Tabela 3 - Optoacoplador FOD3184 .....	52
Tabela 4 - Símbolos e funções das ferramenta de desenho .....	62
Tabela 5 - Símbolos e funções das ferramenta de ligação.....	63
Tabela 6 - Símbolos e função das ferramentas PCB .....	66
Tabela 7 - Especificações do conversor buck.....	81
Tabela 8 - Considerações do conversor buck .....	81
Tabela 9 - Considerações da malha de tensão .....	84
Tabela 10 - Considerações da malha de corrente .....	88
Tabela 11 - Materiais para montagem da placa.....	95

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CC-CC	Conversão corrente contínua em corrente contínua
PWM	Pulse Width Modulation
PCB	Printed Circuit Board
GND	Ground
STD	Standard
LED	Light Emitting Diode
FET	Field Effect Transistor
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
PID	Proporcional, Integral, Derivativo
PI	Proporcional, Integral
PD	Proporcional, Derivativo
DRC	Design Rule Check
PTH	Pin Through hole
SMD	Surface Mounted Device
SOC	State Of Charge
SOH	State of Health

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL .....	18
1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
1.1 INTRODUÇÃO.....	19
1.2 MOTIVAÇÃO DO TCC .....	19
1.3 CONVERSORES CC-CC COM COMUTAÇÃO DISSIPATIVA DA FAMÍLIA BUCK E SUAS MODUAÇÕES PWM .....	20
1.3.1 Conversor CC-CC Buck Síncrono Não Isolado.....	20
1.3.2 Conversor CC-CC Forward Uma Chave .....	22
1.3.3 Conversor CC-CC <i>Forward</i> de Duas Chaves.....	23
1.3.4 Conversor CC-CC <i>Push-Pull</i> Alimentado em Tensão .....	24
1.3.5 Conversor CC-CC Meia Ponte ( <i>Half-Bridge</i> ) .....	26
1.3.6 Conversor CC-CC Ponte Completa ( <i>Full-Bridge</i> ).....	27
1.4 CONTROLE POR MODO TENSÃO COM LIMITAÇÃO DE CORRENTE E SUA APLICAÇÃO.....	28
1.4.1 Diagrama de Blocos e Princípio de Funcionamento.....	28
1.4.2 Aplicação na Literatura Técnica.....	38
1.5 PROPOSTA DO TCC .....	41
1.7 CONCLUSÃO.....	42
2. ANÁLISE E PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DA PLATAFORMA DE CONTROLE PROPOSTA .....	43
2.1 INTRODUÇÃO .....	43
2.2 TOPOLOGIA DA PLATAFORMA .....	44
2.3 ANÁLISE QUALITATIVA DA PLATAFORMA .....	44
2.3.1 Circuito Integrado PWM UC-3525A .....	44
2.3.2 Malha de Tensão.....	47
2.3.3 Malha de Corrente.....	49
2.3.4 Gerador de Tempo Morto ( <i>Dead Time</i> ).....	50
2.3.5 Circuitos de Acionamento ( <i>Drivers</i> ) .....	52
2.4 FONTE AUXILIAR PARA POLARIZAÇÃO DO CIRCUITO DA PLATAFORMA .....	53
2.4.1 Topologia .....	53
2.4.2 Princípio de Funcionamento.....	54
2.5 CONCLUSÃO.....	55
3. MANUAL DE OPERAÇÕES DA PLATAFORMA .....	57
3.1 INTRODUÇÃO .....	57



<b>3.2 TUTORIAL DA PLATAFORMA .....</b>	<b>57</b>
<b>3.3 OPERAÇÃO APLICADA AOS CONVERSORES CC-CC COM COMUTAÇÃO DISSIPATIVA DA FAMÍLIA <i>BUCK</i>.....</b>	<b>72</b>
3.3.1 Conversor CC-CC <i>Buck</i> Síncrono Não Isolado.....	72
3.3.2 Conversor CC-CC <i>Forward</i> de Uma Chave.....	74
3.3.3 Conversor CC-CC <i>Forward</i> de Duas Chaves.....	75
3.3.4 Conversor CC-CC <i>Push-Pull</i> Alimentado em Tensão .....	76
3.3.5 Conversor CC-CC Meia Ponte ( <i>Half-Bridge</i> ) .....	77
3.3.6 Conversor CC-CC Ponte Completa ( <i>Full-Bridge</i> ).....	78
<b>3.4 CONCLUSÃO.....</b>	<b>79</b>
<b>4 EXEMPLO DE APLICAÇÃO AO CONVERSOR CC-CC <i>BUCK</i> NÃO ISOLADO.....</b>	<b>80</b>
<b>4.1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>80</b>
<b>4.2 ARQUITETURA INTEGRADA MOSTRANDO CIRCUITOS DE POTÊNCIA E CONTROLE.....</b>	<b>80</b>
4.2.1 Especificações do Conversor <i>Buck</i> .....	81
4.2.2 Considerações do Projeto.....	81
4.2.3 Razão Cíclica Mínima .....	81
4.2.4 Indutor Filtro de Saída <i>Lo</i> .....	82
4.2.5 Capacitor Filtro de Saída <i>Co</i> .....	82
4.2.6 Resistor de Carga Equivalente para Potência Máxima .....	82
4.2.7 Projeto da Malha de Tensão .....	83
4.2.8 Projeto da Malha de Corrente.....	88
<b>4.3 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO COM POTÊNCIA DE SAÍDA MENOR QUE A NOMINAL.....</b>	<b>92</b>
4.3.1 Em Regime Permanente.....	92
4.3.2 Em Regime Dinâmico .....	93
<b>4.4 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO COM POTÊNCIA DE SAÍDA MAIOR QUE A NOMINAL.....</b>	<b>94</b>
4.4.1 Em Regime Permanente.....	94
4.4.2 Em Regime Dinâmico .....	95
<b>4.5 ALGUNS DADOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>95</b>
4.5.1 Material para prototipagem da placa.....	95
<b>4.6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>97</b>
<b>CONCLUSÃO GERAL .....</b>	<b>98</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>100</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>103</b>

## INTRODUÇÃO GERAL

As plataformas de prototipagem de placas de circuito impresso são ferramentas importantes para o estudo na engenharia, pois permitem que o circuito seja desenhado no *software* para depois ser feita sua montagem em placas.

As placas PCB surgiram no século XX e o modo como eram construídas mudou muito ao longo do tempo. Antigamente, as placas PCB eram projetos grandes e volumosos que tinha como base o uso de madeira ou metal, a performance dessas placas eram lentas, ineficientes e pouco confiável, aos poucos as placas evoluíram para placas isolantes, houve uma evolução muito grande na 2ª guerra mundial, onde eram usadas na tecnologia militar (PCBMAY, 2022).

As placas PCB encontradas no mercado atualmente variam de acordo com a necessidade, o custo, a qualidade e a resistência. Contudo, existem várias características a serem consideradas para escolha da placa, como o número de faces que podem ser simples ou dupla, a quantidade de camadas que podem ser única, dupla ou multicamadas e existem ainda as placas que apresentam os seguintes formatos: rígido, flexível e rígido-flex, distinguindo –se no processo de fabricação e no *design*. (PCBMAY, 2022).

Hoje em dia tem-se uma infinidade de *softwares* que realizam projetos para a fabricação de placas. Além de desenhar todo sistema permitem montar os componentes no layout desenvolvido em seu respectivo *software* e realizar o processo de compra, ou orçamento, da placa confeccionada, já com os componentes montados e soldados pronto para uso. Tais serviços podem ser disponibilizados pelo EasyEDA.

O EasyEDA é um programa gratuito que permite o uso on-line, de fácil acesso, a criação de placas PCB e a criação de uma lista de materiais, o EasyEDA é um *software* livre, desenvolvido por outros usuário, além de permitir o compartilhamento de projetos, foi considerado um dos melhores *softwares* para trabalhar em 2022 (PCBMAY, 2022).

## 1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica será apresentado uma introdução sobre o que será apresentado no capítulo, a motivação da escolha desse tema, logo em seguida os conversores CC-CC da família buck com suas características de funcionamento e modulações PWM, além da aplicação de um sistema de controle modo tensão com limitação de corrente.

### 1.1 INTRODUÇÃO

O capítulo começa com a motivação para o desenvolvimento desse trabalho onde são colocados todos os aspectos a serem apresentados ao longo do estudo que inicia com o estudo dos conversores CC-CC de comutação dissipativa da família *buck* e as suas respectivas modulações em PWM. Posteriormente, é comentado sobre o sistema de controle em todos os seus aspectos de projetos desde o diagrama de blocos até o princípio de funcionamento do sistema de controle modo tensão por limitação de corrente. Ainda com relação ao sistema de controle mencionado, uma aplicação técnica, que envolve um carregador de baterias, é usado como exemplo. Por fim, a proposta deste trabalho é mostrada, expondo os pontos a serem discutidos nos capítulos subsequentes.

### 1.2 MOTIVAÇÃO DO TCC

Este trabalho está relacionado com o desenvolvimento de um projeto de controle de conversores CC-CC, da família *buck*, em uma plataforma de prototipagem de placas, o EasyEDA. O propósito é expandir as formas de fabricação de placas PCB de um modo simples e que pode ser compartilhado com outras pessoas. Para o estudo da plataforma, será apresentado um circuito que envolve conversores CC-CC da família *buck* de comutação dissipativa, modulação PWM e controle de modo tensão com proteção de corrente.

O tema deste trabalho foi escolhido com objetivo de contribuir para disseminação dos conhecimentos técnicos na área de prototipagem de placas de circuito impresso para conversores de potência, além de desenvolver um aperfeiçoamento técnico próprio nessa grande área de desenvolvimento. Como complemento ao tutorial e prototipagem de placas, que usa a plataforma EasyEDA, este trabalho também visa disponibilizar para a posterioridade acadêmica um projeto de uma placa para uso em prática de laboratório, será possível reeditá-lo para outros fins.

### 1.3 CONVERSORES CC-CC COM COMUTAÇÃO DISSIPATIVA DA FAMÍLIA BUCK E SUAS MODULAÇÕES PWM

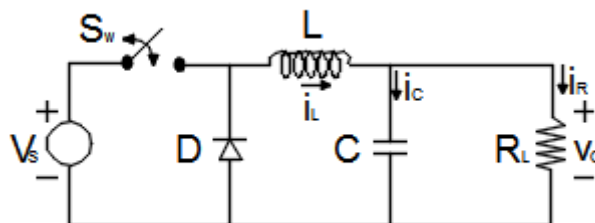
Nesta seção iremos apresentar o princípio de funcionamento dos conversores CC-CC da família *buck*, assim como suas modulações PWM.

#### 1.3.1 Conversor CC-CC Buck Síncrono Não Isolado

O conversor *buck* Figura 1, conhecido como abaixador de tensão, permite que o valor médio da tensão de saída seja menor ou igual ao valor médio da tensão de entrada. E, de acordo com o princípio de conservação de energia, com uma corrente de saída maior que a corrente de entrada (BARBI, 2000).

Uma das características do conversor *buck* é o uso obrigatório do diodo, caso contrário, a chave  $S_w$ , Figura 1, será submetido à picos elevados de tensão durante seu bloqueio, o que leva a sua queima (BARBI, 2000). Outras características do conversor *buck* Figura 1, além de ser unidirecional em potência, a corrente de entrada do circuito é descontínua e há a necessidade de um filtro para diminuir os ruídos (RASHID, 1999).

Figura 1 - Conversor *buck*



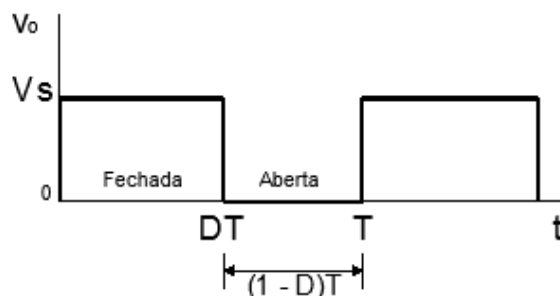
Fonte: HART (2012).

O funcionamento do conversor *buck* ocorre em duas etapas: a primeira etapa acontece com a chave  $S_w$  fechada, o diodo  $D$  é polarizado reversamente e a corrente passa pelo indutor, capacitor e resistor, como pode ser observado o sentido das correntes na Figura 1; na segunda etapa a chave  $S_w$  é aberta, o diodo  $D$  é polarizado diretamente e o indutor fica carregado magneticamente e possibilita que o sistema funcione em ciclos até a chave ser fechada novamente (HART, 2012).

Podemos observar a forma de onda retangular na saída do conversor *buck*, Figura 2, quando a chave é fechada e o nível lógico é alto entre os instantes de tempo de 0 até

DT, quando a chave abre e o nível lógico vai para zero entre os instantes de tempo de DT até T com o período de chaveamento de T segundos (HART, 2012).

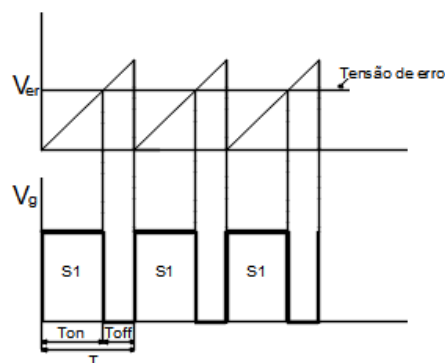
Figura 2 - Forma de onda da tensão de saída



Fonte: HART (2012).

A modulação por largura de pulso conhecida como PWM (*Pulse Width Modulation*) do conversor *buck* acontece na tensão de saída para obter um sinal com formato desejado. A tensão de saída é obtida através de um divisor de tensão, onde é comparada com um sinal de referência encontrado na entrada do amplificador de erro. Quando esse sinal passa pelo amplificador de erro, na saída será realizado a diferença entre a tensão de saída e a tensão de referência ou de erro, com isso o sinal de erro é comparado a um sinal dente de serra na entrada de um comparador PWM, Figura 3, e esse processo vai gerar uma onda retangular que vai ser definida a partir do chaveamento do conversor dado pela frequência da onda (ou duty cycle) do dente de serra (BARBI,2000). Para isso, a condução acontece quando a tensão de erro é maior que a tensão de pico da onda dente de serra, Figura 3, e o bloqueio ocorre quando a tensão de erro for menor que o pico do sinal da onda dente de serra.

Figura 3 - Modulação PWM conversor *buck*



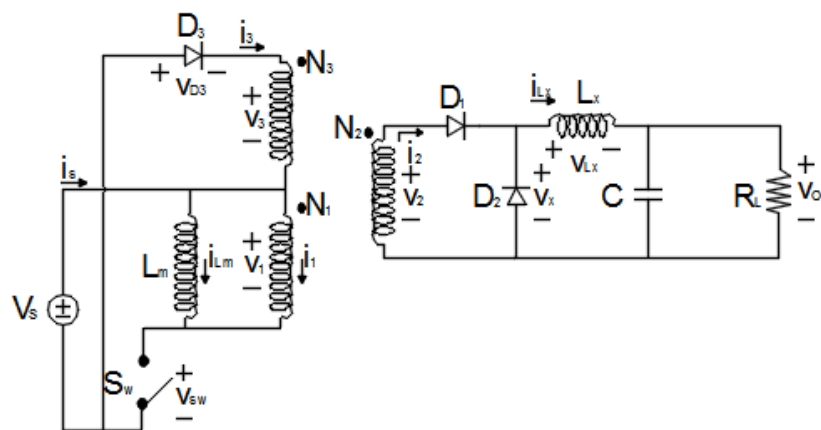
Fonte: Próprio da autora

### 1.3.2 Conversor CC-CC Forward Uma Chave

O conversor *forward*, Figura 4, de uma chave é uma topologia derivada do *buck* é também um abaixador de tensão, que apresenta na sua estrutura um transformador com três bobinas e é acrescentado um outro diodo no seu circuito de saída (PETRY, 2022).

As bobinas  $N_1$  e  $N_2$ , Figura 4, conduzem com a chave  $S_w$  fechada e a função delas transferir energia da fonte  $V_s$  para a carga. Já a bobina  $N_3$  funciona quando a chave está aberta, pois essa energia magnetizante armazenada com a chave fechada deve ser retirada a cada ciclo através de uma indutância de magnetização  $L_m$ , cuja função é desmagnetizar o núcleo a cada ciclo para evitar a saturação, por isso a necessidade de  $N_3$  (PETRY, 2022), (POMILIO,2022).

Figura 4 - Conversor *forward* de uma chave

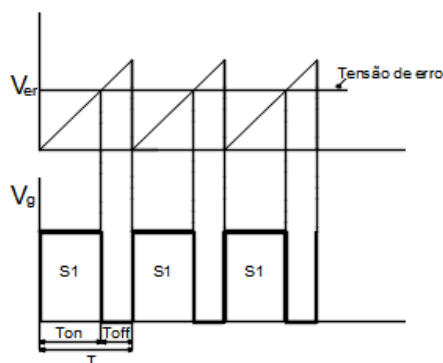


Fonte: HART (2012).

Na Figura 4 temos a topologia do conversor *forward* de uma chave, cujo funcionamento com a chave fechada acontece quando a tensão  $V_s$  é aplicada na bobina  $N_1$  do transformador, enquanto no secundário, o diodo  $D_1$  fica diretamente polarizado e passa corrente no indutor  $L_x$ , os diodos  $D_2$  e  $D_3$  estão inversamente polarizados, nesse momento não há corrente em  $i_3$ . Quando a chave é aberta o transformador deve ser desmagnetizado para que não ocorra problemas no funcionamento do conversor, assim as correntes magnetizantes do primário  $L_m$  e do secundário  $L_x$  não mudam instantaneamente, o diodo  $D_1$  fica reversamente polarizado, a corrente no indutor vai polarizar o diodo  $D_2$  e a indutância magnetizante de  $L_m$  acionará  $V_s$  polarizando  $D_3$  (BARBI,2000), (PETRY, 2022).

A modulação PWM no conversor *forward* de uma chave, Figura 5, ocorre quando a tensão de saída  $V_o$ , Figura 5, e a entrada da tensão do diodo é controlada de modo similar aos conversores não isolados. Com o acionamento de apenas uma chave será gerado uma tensão de saída que será comparada com a tensão de erro e a diferença entre essas tensões será comparado a uma onda dente de serra, onde será gerado uma onda retangular que será definida a partir da frequência da onda (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2003).

Figura 5 - Modulação PWM conversor *forward* de uma chave

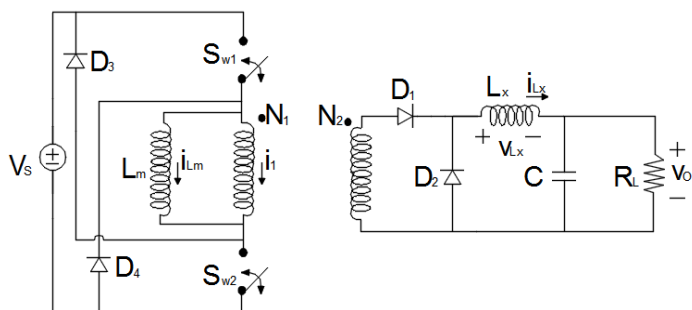


Fonte: Próprio da autora

### 1.3.3 Conversor CC-CC *Forward* de Duas Chaves

O conversor *forward* de duas chaves, é uma variação do *forward* de uma chave, aplicado em circuitos de alta tensão, na Figura 6 podemos observar sua topologia na Figura 6, onde são acrescentados uma chave e outro diodo no primário do transformador (HART,2012).

Figura 6 - Conversor *forward* de duas chaves



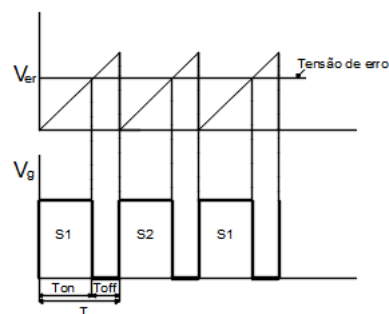
Fonte: HART (2012).

O funcionamento do circuito *forward* de duas chaves, Figura 6, acontece em duas etapas: quando as chaves  $S_{w1}$  e  $S_{w2}$  são fechadas a tensão no primário é igual a tensão de alimentação  $V_s$ , a tensão é transferida para a carga no secundário, a corrente de magnetização do primário aumenta, os diodos  $D_2$ ,  $D_3$  e  $D_4$  estão reversamente

polarizados, é apenas  $D_1$  está polarizado; quando as chaves são abertas, o diodo  $D_1$  impede a circulação de corrente no secundário e faz com que os diodos  $D_3$  e  $D_4$ , através da corrente de magnetização, sejam polarizados. Esse processo permite que uma tensão negativa circule no primário do transformador, o que ocasiona uma redução linear na corrente de magnetização (HART,2012). O ciclo de trabalho do conversor *forward* duas chaves tem que apresentar um valor menor que 0,5, para desmagnetizar o transformador e ele se restabelecer (HART,2012).

Na Figura 7, podemos verificar que a modulação PWM no conversor *forward* duas chaves ocorre quando em um ciclo a chave  $S_1$  é fechada e a chave  $S_2$  está aberta, a tensão de saída será comparada com a tensão de erro, e a diferença entre essas tensões será comparado a uma onda dente de serra, onde será gerado uma onda retangular, que será definida a partir da frequência da onda, no próximo ciclo quando a chave  $S_1$  está aberta e a chave  $S_2$  está fechada, é feito novamente essa verificação com a tensão de saída e a tensão de erro (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2003).

Figura 7 - Modulação PWM conversor *forward* duas chaves

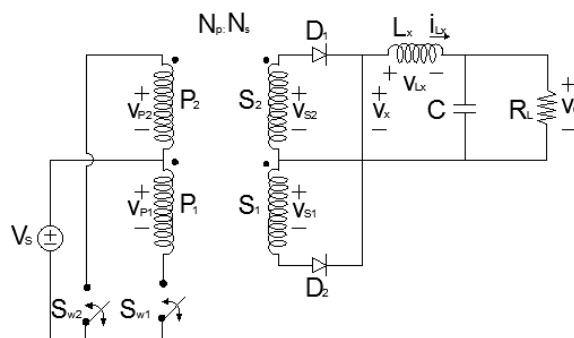


Fonte: Próprio da autora

### 1.3.4 Conversor CC-CC *Push-Pull* Alimentado em Tensão

A topologia do conversor *push-pull* é um arranjo de dois conversores *forward* de uma chave com suas particularidades, como podemos observar na Figura 8. Esse circuito produz pulsos de polaridades opostas através do chaveamento das chaves no primário do transformador (HART,2012). O conversor *push-pull* é recomendado para sistemas de baixa tensão, devido as chaves serem submetidas a altas tensões (BARBI,2000).



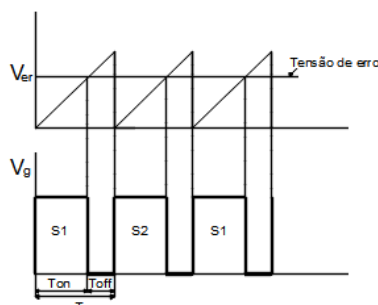
Figura 8 - Conversor *push-pull*

Fonte: HART (2012).

O funcionamento do conversor *push-pull* acontece em três etapas: quando a chave  $S_{w1}$  está fechada, a energia é transferida para a carga, o diodo  $D_1$  é diretamente polarizado e  $D_2$  reversamente polarizado; quando as chaves estão no intervalo de condução os diodos conduzem simultaneamente, atuam como diodos de livre circulação; quando a chave  $S_{w2}$  é fechada, o diodo  $D_2$  fica polarizado diretamente e o diodo  $D_1$  reversamente polarizado, a corrente de magnetização aumenta linearmente, e por fim, quando as duas chaves estão abertas as bobinas do primário não apresentam corrente, mas no secundário o filtro indutivo  $L_x$  mantém a continuidade do sistema e a polarização direta dos dois diodos  $D_1$  e  $D_2$  (HART,2012).

O ciclo de trabalho do conversor *push-pull* deve ser menor que 0,5, para evitar a ligação simultânea das chaves  $S_{w1}$  e  $S_{w2}$ . O acionamento entre as chaves precisa de um tempo morto para evitar o curto circuito na fonte de entrada  $V_s$  (POMILIO,2022), (MATAKAS JUNIOR; KOMATSU, 2022).

A modulação PWM do *push-pull* é a conversão de uma saída retificada para ter uma saída controlada, essa topologia apresenta duas chaves onde seu acionamento é feito com uma chave fechada e a outra aberta em cada ciclo, como podemos observar na Figura 9 (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2003)

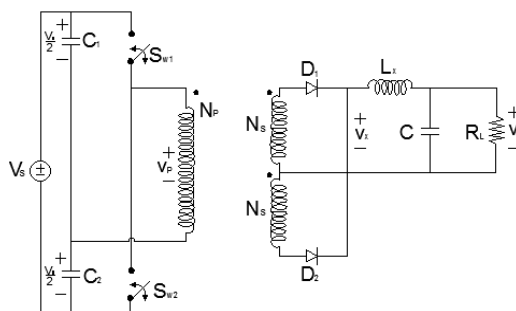
Figura 9 - Modulação PWM do conversor *push-pull*

Fonte: Próprio da autora

### 1.3.5 Conversor CC-CC Meia Ponte (*Half-Bridge*)

O conversor meia ponte, Figura 10, é indicado para potências inferiores a 500 W, possui dois capacitores  $C_1$  e  $C_2$  com valores iguais e elevados, além de serem submetidos à uma tensão metade da tensão de entrada (BARBI,2000), (HART,2012).

Figura 10 - Conversor meia ponte

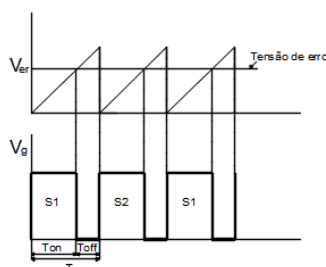


Fonte: HART (2012).

O conversor de meia ponte possui um acionamento complementar das chaves  $S_{w1}$  e  $S_{w2}$ , onde é aplicada uma tensão  $\frac{V_S}{2}$  no primário do transformador e o secundário do transformador apresenta uma derivação central. O acionamento entre as chaves precisa de um tempo morto para evitar o curto circuito na fonte de entrada  $V_S$  (MATAKAS JUNIOR; KOMATSU, 2022). Seu funcionamento ocorre em três etapas: quando  $S_{w1}$  está fechada a tensão no primário é positiva, quando  $S_{w2}$  está fechada a tensão no primário é negativa e quando as duas chaves estão abertas os diodos estão diretamente polarizados, o circuito é energizado através da indutância de dispersão (MATAKAS JUNIOR; KOMATSU, 2022).

A modulação PWM do conversor meia ponte possui as mesmas características do conversor *push-pull* em relação ao acionamento do controle de saída, como podemos observar na Figura 11.

Figura 11 - Modulação PWM do conversor meia ponte

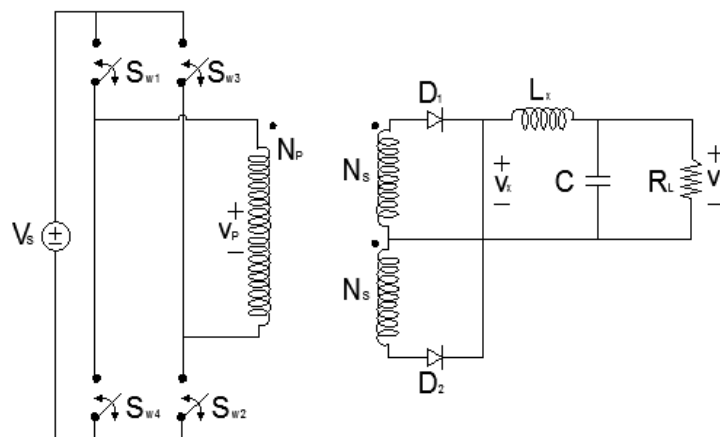


Fonte: Próprio da autora

### 1.3.6 Conversor CC-CC Ponte Completa (*Full-Bridge*)

O conversor ponte completa é indicado para potências maiores do que o conversor de meia ponte, por isso, possui uma maior quantidade de diodos para diminuir os esforços de tensão e corrente no circuito, além disso, possui chaves dispostas na sequência ( $S_{w1}$  e  $S_{w2}$ ) e ( $S_{w3}$  e  $S_{w4}$ ), como podemos observar na Figura 12, para que o fechamento das chaves sejam alternados, pois se as mesmas forem acionadas ao mesmo tempo pode ocasionar problemas no conversor, por isso, é necessário o uso de optoacopladores para que o acionamento não seja simultâneo e não ocasione curto circuito na fonte de entrada (HART,2012), (PETRY, 2022). Quando fechamos as chaves ( $S_{w1}$  e  $S_{w2}$ ), a tensão no primário será positiva  $V_s$ , quando fechamos as chaves ( $S_{w3}$  e  $S_{w4}$ ) a tensão no primário será negativa  $-V_s$  (HART,2012).

Figura 12 - Conversor ponte completa



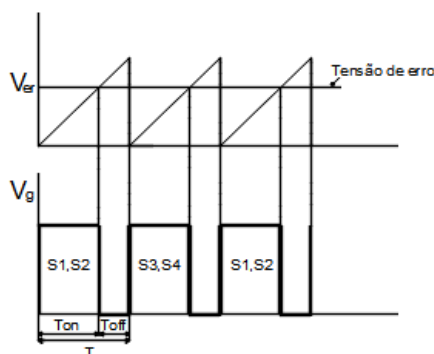
Fonte: HART (2012).

O princípio de funcionamento do conversor de ponte completa é a mesma do *push-pull* e do meia ponte, a diferença está na capacidade de potência. A tensão máxima quando a chave se encontra em aberto é  $V_s$  diferente dos outros conversores mencionados anteriormente que a tensão é  $2V_s$  (HART,2012).

A modulação PWM do conversor ponte completa é diferente em relação ao acionamento das chaves pois como na sua topologia apresenta quatro chaves apenas duas chaves ( $S_{w1}$  e  $S_{w2}$ ) são fechadas e as chaves ( $S_{w3}$  e  $S_{w4}$ ) se encontram abertas no primeiro ciclo, enquanto no segundo ciclo acontece o contrário. A modulação PWM desse conversor é mostrada na Figura 13. O conversor onda completa pode apresentar

chaveamento com tensão unipolar ou bipolar (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2003).

Figura 13 - Modulação PWM do conversor ponte completa



Fonte: Próprio da autora

Podemos verificar que a modulação dos conversores, descritos até aqui, apresentam a mesma lógica, mas a forma como é feito o seu controle através do acionamento das chaves, é diferente.

#### 1.4 CONTROLE POR MODO TENSÃO COM LIMITAÇÃO DE CORRENTE E SUA APLICAÇÃO

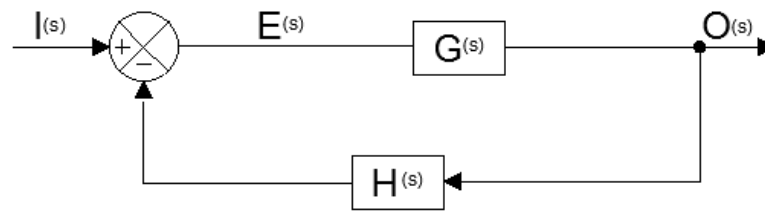
Podemos verificar nessa seção, será abordado toda a parte estrutural para o sistema de controle a ser estudado com o diagrama de blocos, o semi-plano complexo, os tipos de compensadores e seus respectivos diagramas de bode, além do princípio de funcionamento do sistema de controle modo tensão com limitação de corrente.

##### 1.4.1 Diagrama de Blocos e Princípio de Funcionamento

O diagrama de blocos desempenha a função de representar os componentes e o fluxo de sinais a partir de equações propostas, como podemos observar a expressão (1.1) (BOJORGE, 2022).

Na Figura 14 podemos observar o diagrama de blocos em malha fechada de um conversor CC-CC, temos a função de transferência do interruptor de PWM com a comparação entre o sinal de saída e a referência (TOFOLI, 2018).

Figura 14 - Diagrama de blocos em malha fechada



Fonte: TOFOLI (2018)

Na saída do diagrama de blocos teremos o  $G(s)$  e o  $E(s)$  que são polinômios do sistema (TOZIM, 2022):

$$O(s) = G(s) \cdot E(s). \quad (1.1)$$

Onde,

$$E(s) = I(s) - O(s) \cdot H(s). \quad (1.2)$$

$I(s)$ : função de transferência de entrada

$O(s)$ : função de transferência de saída

$G(s)$ : função de transferência de malha aberta.

$E(s)$ : função de transferência resultado da comparação entre a saída e a referência ou erro.

$H(s)$ : função de transferência do sensor de saída.

A função de transferência é a relação entre a transformada de Laplace do sinal de saída e a transformada de Laplace do sinal de entrada, como podemos observar na equação (1.3) (TOZIM, 2022).

$$F(s) = \frac{O(s)}{I(s)} = \frac{G(s)}{1+G(s) \cdot H(s)} \quad (1.3)$$

O termo  $G(s) \cdot H(s) = FTLA(s)$  é uma função de transferência conhecida como laço aberto do sistema, o  $s$  é a frequência complexa (TOZIM, 2022).

Fator K é um modelo matemático usado para ajustar e caracterizar a função de transferência, ele sintetiza as malhas de realimentação através de amplificadores operacionais que são diretamente proporcionais, pois quando em baixa frequência, terá uma redução no ganho, e quando eleva a frequência, haverá um aumento de ganho, além disso, tem a função de estabilizar o sistema com o avanço e o atraso de fase. Esses ajustes vão interferir no controle e na posição dos polos e zeros do conversor, que não dependem

do tipo de controlador, o fator visa obter uma frequência de cruzamento  $f_c$  de ganho unitário e ajuste de fase desejável (J.A.POMILIO, 2022; TOFOLI, 2018).

Para obter conhecimento sobre o fator  $K$  e se um sistema é instável ou estável, precisamos entender o que são os polos e os zeros da equação (1.4) ou (1.3). Os zeros são as raízes do polinômio no numerador, e os polos são as raízes do polinômio no denominador em (1.3) (TOFOLLI,2018), (TOZIM, 2022). Os polos e zeros podem ser reais ou complexos. Através da função (1.4) podemos identifica-los no plano  $s$  ou complexo (UTFPR, 2022).

$$s = \sigma + j \cdot \omega \quad (1.4)$$

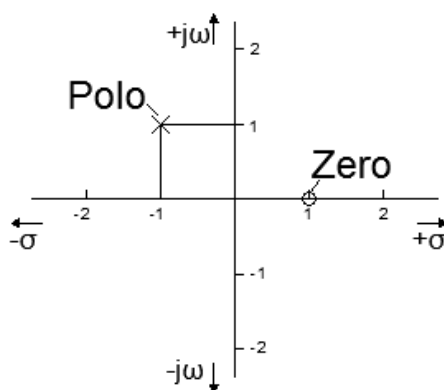
Onde,

$\sigma$  é a parte real do polo ou do zero

$j\omega$  é a parte imaginária do polo ou do zero

Podemos observar os polos e zeros na Figura 15.

Figura 15 - Plano  $s$  ou complexo com polos e zeros



Fonte: (UTFPR, 2022)

A estabilidade do sistema, na função de transferência em malha fechada, acontece de acordo com a posição dos polos. Quando os polos se encontram no semi-plano esquerdo, Figura 15, os sistemas são considerados estáveis por apresentarem uma saída limitada para qualquer entrada limitada (TOZIM, 2022).

A instabilidade do sistema, ocorre quando a posição de apenas um polo se encontra no semi-plano direito quando vários polos com multiplicidade maior que um se encontram no eixo imaginário, o sistema será considerado criticamente ou marginalmente estável, quando a entrada é limitada e a saída é oscilante (TOZIM, 2022).

Pela teoria do controle clássico, o sistema será estável se apresentar a fase positiva, e será considerado como instável quando a fase for negativa (TOFOLI, 2018).

Os conversores CC-CC tem características estáveis quando um sistema de primeira ordem apresentar uma taxa de decréscimo de -20dB/década da curva de ganho, através da frequência do ganho unitário (TOFOLI, 2018).

Para que não ocorram problemas como erro estático é necessário que o ganho FLTA(s) seja maior em baixas frequências, pois permitem altos ganhos (TOFOLI, 2018).

Para que o sistema seja de tempo contínuo, a frequência de cruzamento  $f_c$  de ganho unitário tem que ser menor ou igual a um quarto da frequência de comutação  $f_s$  do conversor CC-CC, caso contrário não será contínuo (TOFOLI, 2018).

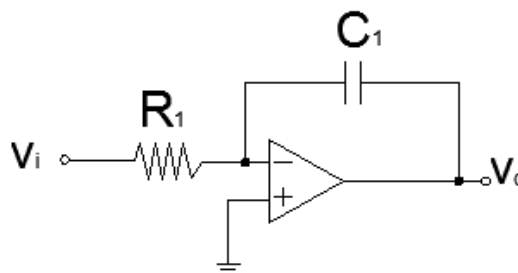
$$f_c \leq \frac{f_s}{4} \quad (1.5)$$

Nem sempre é possível escolher a equação (1.5) como referência, vai depender do tipo de controlador e da sintonia, pois o controle depende das características do ponto de operação do conversor CC-CC (TOFOLI, 2018).

O fator K possui três tipos de controladores: compensador tipo 1, compensador tipo 2 e compensador tipo 3 que, para obter um resultado coerente, são considerados a quantidade de polos e zeros assim como sua função de transferência e a característica de defasagem do sistema. (TOFOLI, 2018).

A principal função do compensador tipo 1 é minimizar o erro em regime permanente, esse compensador possui apenas um polo na origem do plano complexo. Por estar na origem, o compensador vai ter uma defasagem constante de  $-90^\circ$  e uma atenuação de 20 dB/dec. Na Figura 16, podemos observar o compensador que apresenta o formato de um integrador (J.A.POMILIO, 2022; TOFOLI, 2018).

Figura 16 - Compensador tipo 1



Fonte: TOFOLI (2018)

A função de transferência do compensador tipo 1, com base na Figura 16 é dada por:

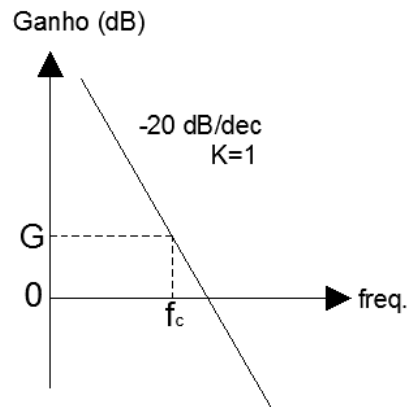
$$C_v(s) = \frac{1}{R_1 C_1 s} \quad (1.6)$$

A frequência de cruzamento para o compensador tipo 1 é:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \quad (1.7)$$

Para o compensador tipo 1, o fator K é 1 por não apresentar defasagem de fase. Na Figura 17, podemos observar os ganhos do compensador tipo 1 em relação ao fator K no diagrama de bode.

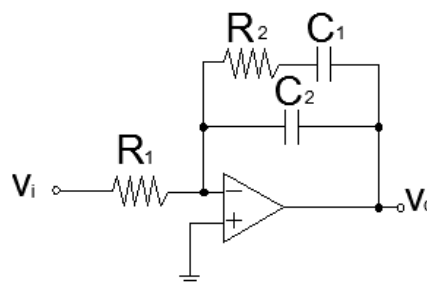
Figura 17 - Diagrama de bode do compensador tipo 1



Fonte: TOFOLI (2018)

O compensador tipo 2, Figura 18, possui a mesma estrutura do compensador tipo 1 e apresenta uma maior velocidade de resposta se comparado ao compensador tipo 1 e em relação ao plano complexo, terá um zero e dois polos. Como apresenta o integrador tem um dos polos na origem, este compensador apresenta uma defasagem crescente de  $-90^\circ$  e  $0^\circ$  (J.A.POMILIO, 2022), (TOFOLI, 2018).

Figura 18 - Compensador do tipo 2



Fonte: TOFOLI (2018)

A função de transferência do compensador tipo 2,

$$C_v(s) = \frac{1+sC_1R_2}{sR_1(C_1+C_2+sR_2C_1C_2)} \quad (1.8)$$

As frequências dos polos e dos zeros são dadas a partir das seguintes expressões



$$f_z = \frac{1}{2\pi R_2 C_1} \quad (1.9)$$

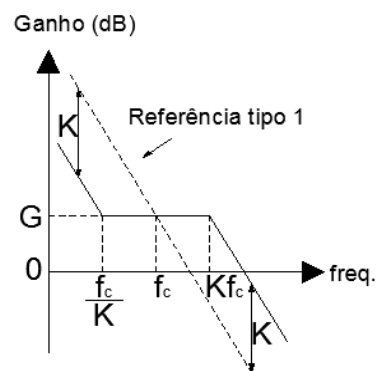
$$f_{p2} = \frac{C_1 + C_2}{2\pi R_2 C_1 C_2} \quad (1.10)$$

No compensador tipo 2, verificar se o zero no plano complexo deve ser previsto por um fator K que se encontra abaixo da frequência de cruzamento e no polo acima da frequência de cruzamento, para obter o avanço de fase  $\alpha$ . Assim o fator k para o compensador tipo 2 é dado pela expressão:

$$K = tg\left(\frac{\alpha}{2} + 45^\circ\right) \quad (1.11)$$

Na Figura 19, temos o diagrama de bode do compensador tipo 2 com seu ganho em relação ao fator K.

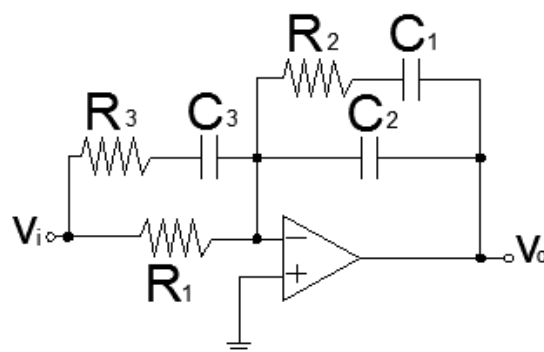
Figura 19 - Diagrama de Bode compensador tipo 2



Fonte: TOFOLI (2018)

O compensador tipo 3, Figura 20, apresenta em sua estrutura dois zeros e três polos. Um dos polos vai estar na origem devido ao integrador. Esse compensador apresenta uma melhora na resposta dinâmica do circuito por causa da criação de uma região que aumenta o ganho (J.A.POMILIO, 2022), (TOFOLI, 2018).

Figura 20 - Compensador tipo 3



Fonte: TOFOLI (2018)

A função de transferência do compensador tipo 3,

$$\frac{v_o(s)}{v_i(s)} = \frac{(1+sC_1R_2)(1+C_3R_3s+C_3R_1s)}{sR_1(C_1+C_2+sR_2C_1C_2)(1+R_3C_3s)} \quad (1.12)$$

As frequências dos polos e dos zeros são dadas a partir das seguintes expressões

$$f_{z1} = \frac{1}{2\pi R_2 C_1} \quad (1.18)$$

$$f_{z2} = \frac{1}{2\pi(R_1+R_3)C_3} \quad (1.13)$$

$$f_{p2} = \frac{C_1+C_2}{2\pi R_2 C_1 C_2} \quad (1.14)$$

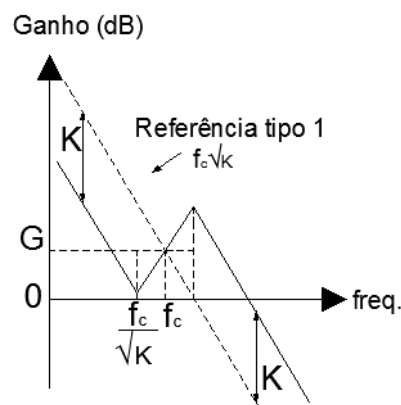
$$f_{p3} = \frac{1}{2\pi R_3 C_3} \quad (1.15)$$

Como o compensador tipo 3, possui dois zeros e dois polos, os zeros duplos no plano complexo apresenta uma frequência do fator  $\sqrt{K}$  abaixo da frequência de cruzamento, quando o compensador tipo 3 apresenta o polo duplo na frequência do fator  $\sqrt{K}$  então a frequência de cruzamento está acima, com isso o fator K para o compensador tipo 3 é dado pela expressão:

$$K = \left\{ \text{tg} \left( \frac{\alpha}{4} + 45^\circ \right) \right\}^2 \quad (1.16)$$

Na Figura 2,1 o diagrama de bode do compensador tipo 3 está relacionado com o ganho em relação ao fator K.

Figura 21 - Diagrama de Bode compensador tipo 3

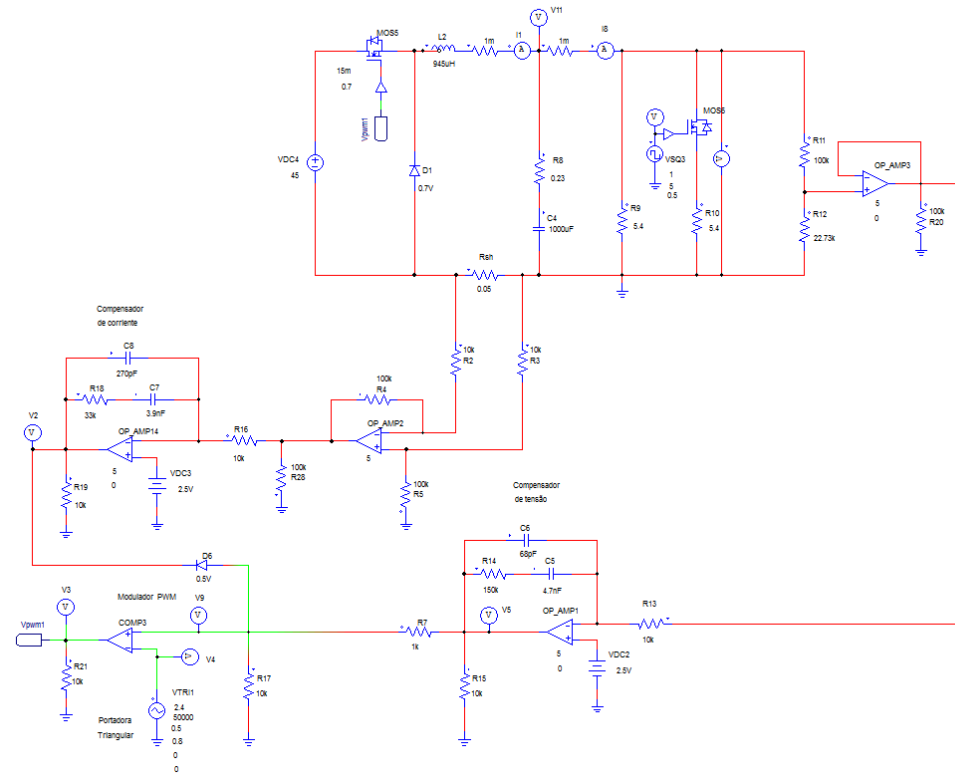


Fonte: TOFOLI (2018)

Para o funcionamento do circuito de controle com limitação de corrente, será preciso uma fonte para alimentar o circuito, Figura 22, do tipo *buck*, que será detalhada

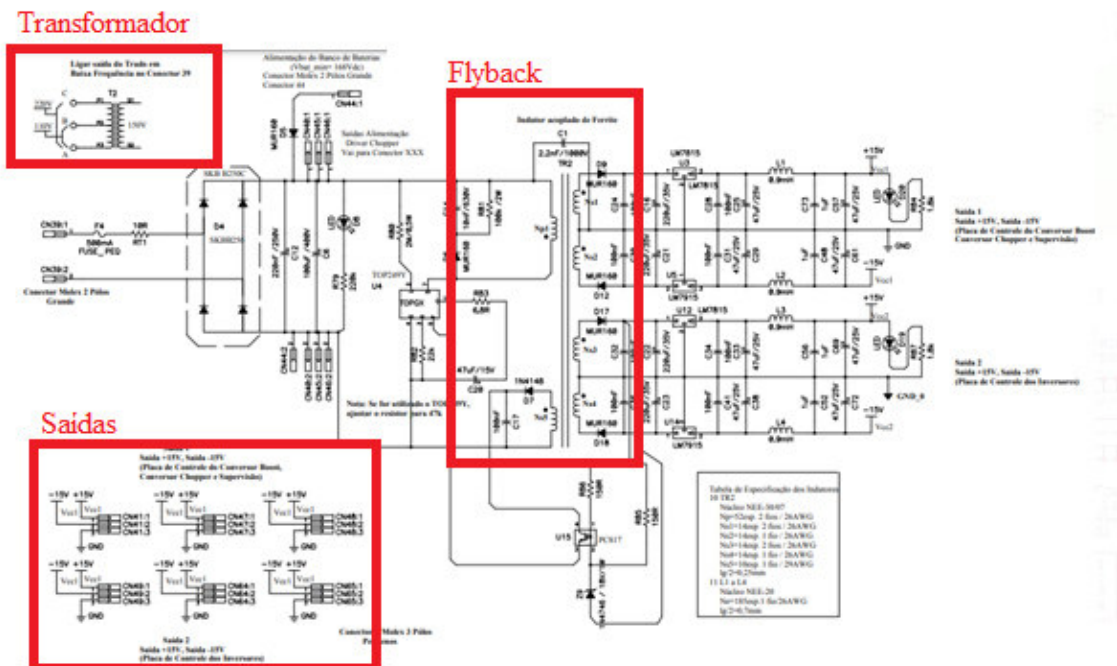
no capítulo quatro, assim como será necessário uma fonte auxiliar do tipo *flyback*, Figura 23, que será mencionada no próximo tópico.

Figura 22 - Fonte de alimentação do tipo *buck*



Fonte: BASCOPÉ (2022).

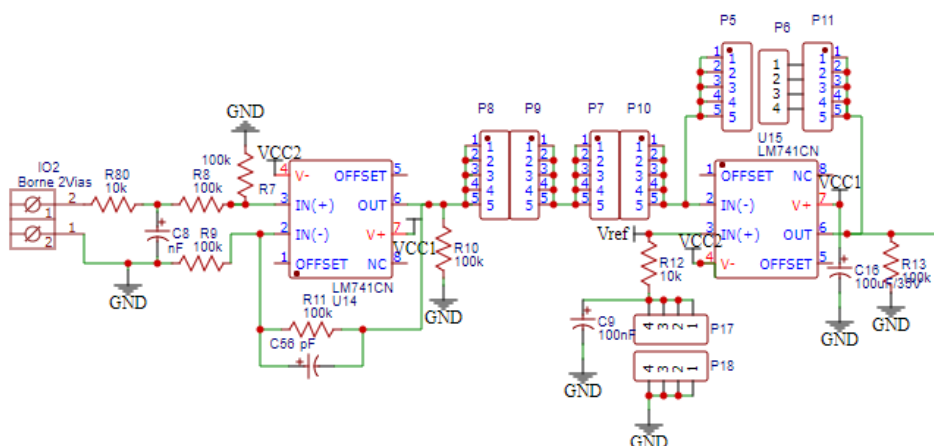
Figura 23 - Fonte auxiliar do tipo *flyback*



Fonte: BASCOPE (2022).

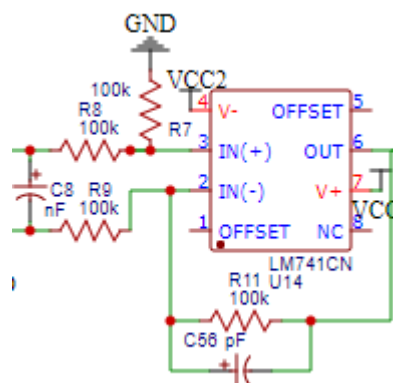
Na fonte de alimentação do sistema de potência Figura 22, tem um divisor de tensão na saída, e essa tensão de saída será ajustada para um valor desejado. Quando a tensão passa da fonte de alimentação para o circuito de controle, a malha de tensão, Figura 24, vai ter um filtro passa baixa, para filtrar os ruídos que podem vir da placa da fonte. Logo, em seguida temos um amplificador operacional que funciona como seguidor de tensão *ou buffer*, Figura 25, por apresentar uma saída igual a entrada, podemos perceber isso através dos resistores que apresentam valores iguais.

Figura 24 - Malha de tensão



Fonte: Adaptado BASCOPE (2022).

Figura 25 - Seguidor de tensão



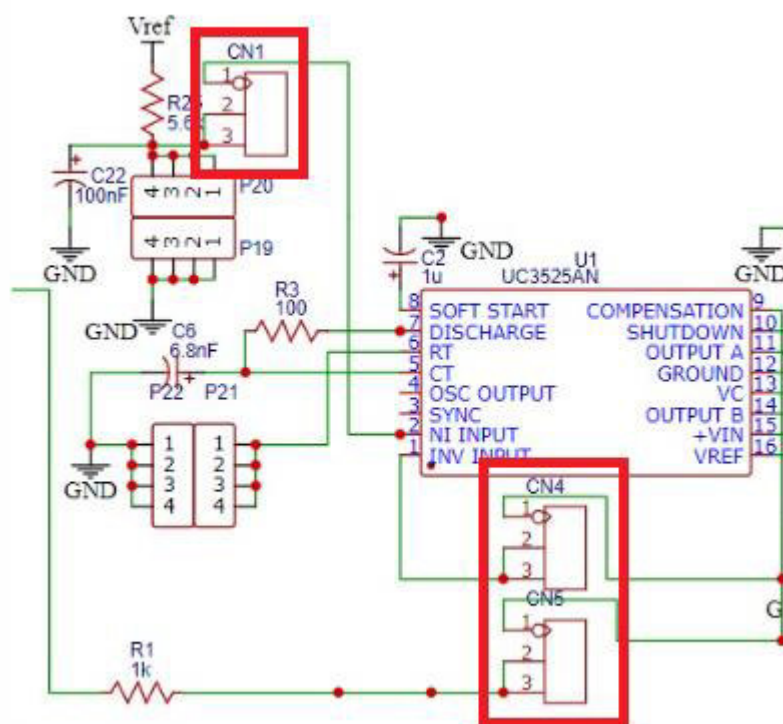
Fonte: Adaptado BASCOPE (2022).

Logo em seguida, temos o compensador na malha de tensão que tem como função apresentar uma tensão de referência e esse valor ser comparado com os valores do

modulador PWM UC3525A. Além disso, os componentes conectados ao compensador podem fazer vários tipos de controle como PI, PID e PD.

Esse circuito de controle permite testes em malha aberta e em malha fechada, Figura 26, para isso, será usado alguns pinos do modulador de PWM UC 3525 A. Para o teste em malha fechada os *jumpers* CN1 e CN4 do circuito ficam desconectados, apenas o *jumper* CN5 fica conectado, para o teste em malha aberta desconecta o jumper CN5 e deixa conectado os *jumpers* CN1 e CN4 que respectivamente são o amplificador interno e a realimentação negativa.

Figura 26 - Malha aberta e malha fechada UC 3525 A



Fonte: Adaptado BASCOPE (2022).

Na malha de corrente, Figura 27, temos um amplificador operacional com função de subtrator Figura 28, o esquema da malha de corrente é parecido com o da malha de tensão a diferença é que os resistores em paralelo são de  $101\text{k}\Omega$  e o resistor na entrada são de  $10\text{k}\Omega$  o ganho é diferente de 1, depois do subtrator temos um compensador responsável pelo controle da corrente, esse compensador, vai controlar o carregamento, quando chega uma certa tensão o sistema não permite mais o carregamento, a corrente será desligada, o que estará atuando no momento é a malha de tensão. Quando a malha de corrente está ligada o diodo está diretamente polarizado no momento que a tensão chega em níveis máximos, a malha de corrente é desligada e o diodo fica reversamente polarizado, e a malha de tensão começa a atuar, a lógica do sistema de controle de

limitação de corrente é OU, onde ou a malha de tensão ou a malha de corrente está ligada.

Figura 27- Malha de corrente

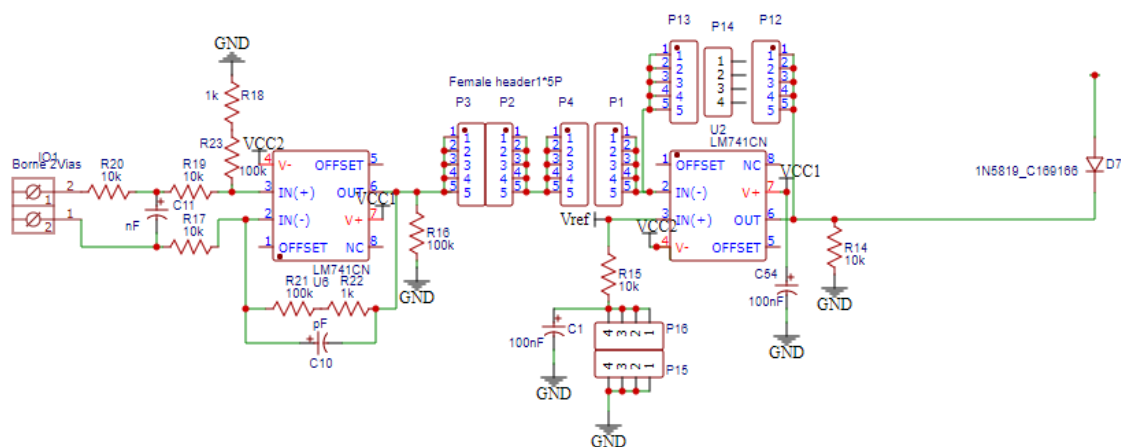
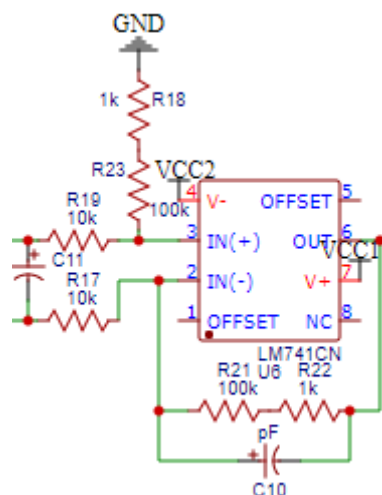


Figura 28 - Subtrator



Fonte: Adaptado BASCOPE (2022).

## 1.4.2 Aplicação na Literatura Técnica

Para aplicação do sistema de controle com limitação de corrente temos, como exemplo, os carregadores de bateria que fazem uso dessa técnica.

As baterias convertem energia química em energia elétrica e seus estados eletroquímicos possuem dois tipos: as baterias primárias não recarregáveis e as baterias secundárias recarregáveis (ELECTRONICSFORU, 2022).

As baterias recarregáveis apresentam características quando estão carregadas funcionam como cargas elétricas e quando estão descarregadas funcionam como fonte de energia (ELECTRONICSFORU, 2022).

As baterias são importantes para o funcionamento dos equipamentos que dela necessitam, às vezes carregamos as baterias de forma imprudente, o que resulta na diminuição da sua vida útil, por isso existem técnicas responsáveis para o controle de carregamento de baterias como o modo tensão com proteção contra sobrecorrente onde podem ser usados conversores CC-CC isolados e não isolados

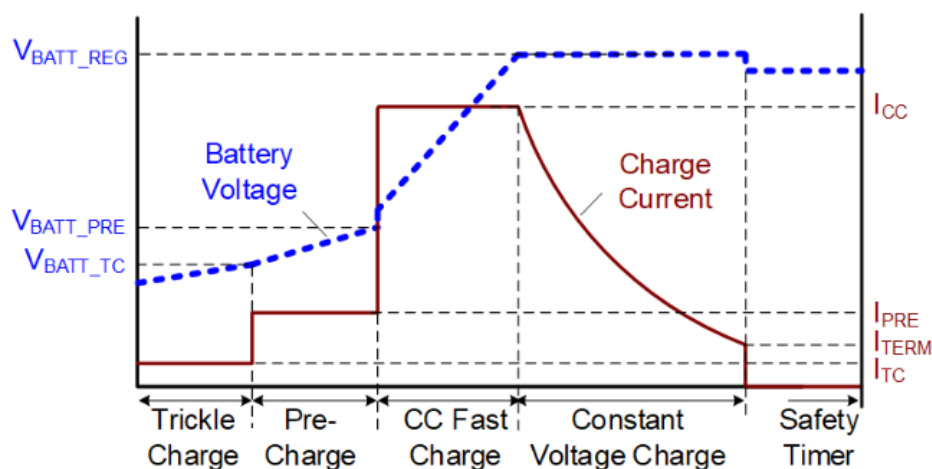
Algumas proteções são necessárias durante o processo de carregamento, como também para o processo de descarregamento. As proteções do carregador de bateria são implementadas através do gerenciamento que supervisiona o desempenho de carga e descarga da bateria, assim como podem ser implementadas como parte do carregador (ELECTRONICSFORU, 2022).

As baterias possuem três estágios de carregamento que são volume, absorção e flutuação. As baterias químicas apresentam tensão de flutuação muito leve, pois exige que seja desconectado a carga quando atinge uma determinada tensão.

Os métodos para o carregamento de baterias mais usados são corrente constante e tensão constante no entanto temos exceções que permitem apenas ou corrente constante ou tensão constante, variações nas correntes e tensões resultam em mais estágios de carregamento (ELECTRONICSFORU, 2022).

Para analisar o carregamento da bateria de íon-lítio, a Figura 29, apresenta um gráfico com a variação da tensão e da corrente, do carregador de comutação MP2759A, projetado para baterias de íon-lítio (SPORCK, 2022).

Figura 29 - Carregamento da bateria de íon-lítio



Fonte: SPORCK (2022)

Através do gráfico, temos na primeira análise carregamento lento (*Trickle Charge*), quando a tensão apresenta um valor aproximado de 2,1V, a proteção interna da

bateria desconecta devido a uma descarga ou por causa de uma sobrecorrente. O circuito integrado do carregador fornece uma pequena corrente, de aproximadamente 50 mA, para carregar o capacitor que vai acionar a corrente de proteção para reconectar a bateria e fechar os FETs (transistor de efeito de campo), embora o carregamento lento dure alguns segundos, a corrente do carregador deve ter um temporizador que será acionado se a bateria não for conectada, a bateria para de carregar, o sistema entende que a bateria está danificada (SPORCK, 2022)

Durante a pré-carga (*Pre-Charge*), a bateria é carregada com segurança com um nível de corrente  $C/10$  que é a capacidade em mA·h, na pré-carga a tensão da bateria aumenta lentamente e a corrente diminui, para evitar danos nas células, para que a tensão atinja um nível mais alto (SPORCK, 2022).

Na carga de corrente constante (*CC Fast Charge*), o carregamento CC acontece quando a bateria atinge a tensão de 3V nessa fase as correntes possuem valores entre 0,3 C e 0,5 C. O carregamento em corrente contínua ocorre até que o nível de tensão se torne completo (SPORCK, 2022).

Na carga de tensão constante (*Constant Voltage Charge*), o limite de tensão é entre 4,1 V e 4,5 V por célula, o carregador do circuito integrado monitora a tensão na bateria durante o carregamento em corrente constante, e não permite que a tensão exceda a tensão máxima (SPORCK, 2022).

Para finalizar temos um temporizador de segurança (*Safety Timer*), onde o circuito integrado MP2759A determina quando encerrar o ciclo de carregamento que está relacionado com a corrente que entra e diminui através de um limite de cerca de  $C/10$  durante o período de tensão constante, nesse instante verificamos que a bateria está carregada (SPORCK, 2022).

As baterias de lítio apresentam variáveis que influenciam no sistema de controle: State Of Charge (SOC), State of Health (SOH) e a temperatura (MONARETTO, 2022). O SOC está relacionado com a carga elétrica da bateria, onde a quantidade de carga é retirada através da soma total da carga recebida é difícil fazer sua medição com precisão no entanto a curva de carga e descarga pode ser medida através da tensão do terminal da bateria (ELECTRONICSFORU, 2022), (MONARETTO, 2022). O SOH está relacionado com a vida útil da bateria através das condições químicas, que é a relação entre a capacidade total pela capacidade nominal. E por fim a temperatura, que influencia na potência fornecida e na degradação da bateria (MONARETTO, 2022).

Uma das aplicações da técnica de controle com limitação de corrente é o carregador de bateria de íons de lítio com conversor *forward* de duas chaves, o conversor

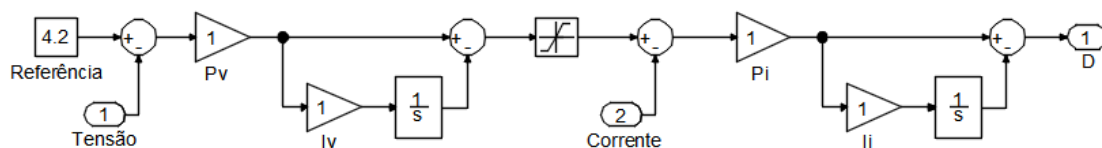


escolhido, possui função abaixadora, apresenta isolamento e permite que os operadores tenham mais segurança no manuseio do carregador, por apresentar isolamento e proteger a carga contra ruídos da entrada do circuito.

O controlador, usado no sistema de controle dos conversores, tem a função de melhorar a estabilidade do sistema mesmo com mudanças de tensão de entrada do conversor, portanto permite uma resposta rápida, principalmente na fase de tensão constante, o compensador vai controlar através da malha de corrente que impede que os componentes queimem na saída do conversor com o filtro capacitivo, e também evita picos de tensão que possam danificar a bateria (MONARETTO, 2022).

O tipo de controle usado no carregador de íons de lítio é o controlador tipo cascata que possui dois laços de controle PID (Proporcional, Integral, Derivativo), uma malha de tensão que fica externa e fornece a referência e uma malha interna de corrente. Na Figura 30, podemos observar o diagrama de blocos do controlador tipo cascata. Os controladores tipo cascata possuem uma velocidade limitada devido um *loop* interno, que é mais rápido que o *loop* externo, para o controle de carregamento de bateria. O projeto é realizado em duas etapas: a malha de corrente é projetada primeiramente para depois ser projetado a malha de tensão (MONARETTO, 2022).

Figura 30 - Controlador PID tipo cascata



Fonte: MONARETTO (2022)

## 1.5 PROPOSTA DO TCC

Neste capítulo foi abordado as topologias dos conversores CC-CC com comutação dissipativa da família *buck* e suas modulações PWM: *buck*, *forward* de uma chave, *forward* de duas chaves, *push-pull*, meia ponte e ponte completa. Foi mostrado o diagrama de blocos, os polos e os zeros no plano complexo, o fator K e os tipos de compensadores com seus respectivos diagramas de bode, foi abordado um exemplo de aplicação com um carregador de bateria, e o princípio de funcionamento do sistema de controle com limitação de corrente.

O desenvolvimento do segundo capítulo trata sobre as análises de operação da plataforma desenvolvida. Será analisado o circuito de modulação PWM UC 3525 A com

suas funcionalidades, o controle nas malhas de tensão e corrente, como funciona um gerador de tempo morto, e para fechar o capítulo os tipos de acionamentos além de apresentar uma fonte auxiliar para polarizar o circuito na plataforma.

No terceiro capítulo, será apresentado um tutorial de operação da plataforma com o processo de fabricação da placa, o passo a passo de como usar a plataforma para projetar o esquemático, assim como para o projeto da placa PCB, além de fazer o acionamento das chaves para cada um dos conversores CC-CC estudados.

No quarto capítulo teremos o estudo de uma fonte de alimentação com tensão e corrente ajustáveis do conversor *buck*, com a demonstração dos valores a serem assumidos, com a simulação no PSIM com as forma de onda das potências de saída com valores menor e maior que a nominal, e os resultados experimentais do circuito proposto que é a prototipagem de uma placa de controle no EasyEDA.

## 1.7 CONCLUSÃO

Este capítulo apresentou os conversores CC-CC da família *buck* onde são apresentadas as topologias básicas, as características, a funcionalidade e o acionamento através do sinal PWM, esses conversores podem ser usados como fonte auxiliar para alimentação de circuitos, assim como sistemas de controle.

Além disso, nesse capítulo é apresentado uma estrutura geral de todo o processo de controle, onde é abordado o diagrama de blocos, a função de transferência, os polos e zeros no plano complexo, o fator  $K$ , e os tipos de compensadores e o diagrama de bode todas essas informações serão aplicadas para o projetar a malha de tensão e a malha de corrente e por fim temos a aplicação do sistema de controle no carregamento de bateria do tipo íon lítio.

Esse capítulo mostra todo o processo de construção do sistema de controle com a apresentação da variedade de conversores que podem ser usados como fonte de alimentação, das etapas de desenvolvimento das malhas de tensão e corrente, no princípio de funcionamento a função de cada componente e na aplicação percebe-se a importância do controle de um sistema para que não ocorram problemas no sistema.

## 2. ANÁLISE E PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DA PLATAFORMA DE CONTROLE PROPOSTA

Para esse capítulo será apresentado a topologia feita na plataforma escolhida, e serão apresentados os circuitos integrados com suas respectivas funções no projeto além de mostrar a fonte auxiliar responsável pela polarização do sistema de controle proposto.

### 2.1 INTRODUÇÃO

As plataformas de simulação são ferramentas muito usadas pelos alunos que estudam eletrônica, pois permitem constatar o que ocorre com o circuito, fazer medição de tensão, corrente, assim como observar as formas de onda.

Com a pandemia da covid 19, as universidades tiveram que ser fechadas por risco de contaminação. A solução encontrada para realização das práticas de laboratório foi o uso de plataformas de simulação, que podemos encontrar *online*, gratuitas e de fácil operação.

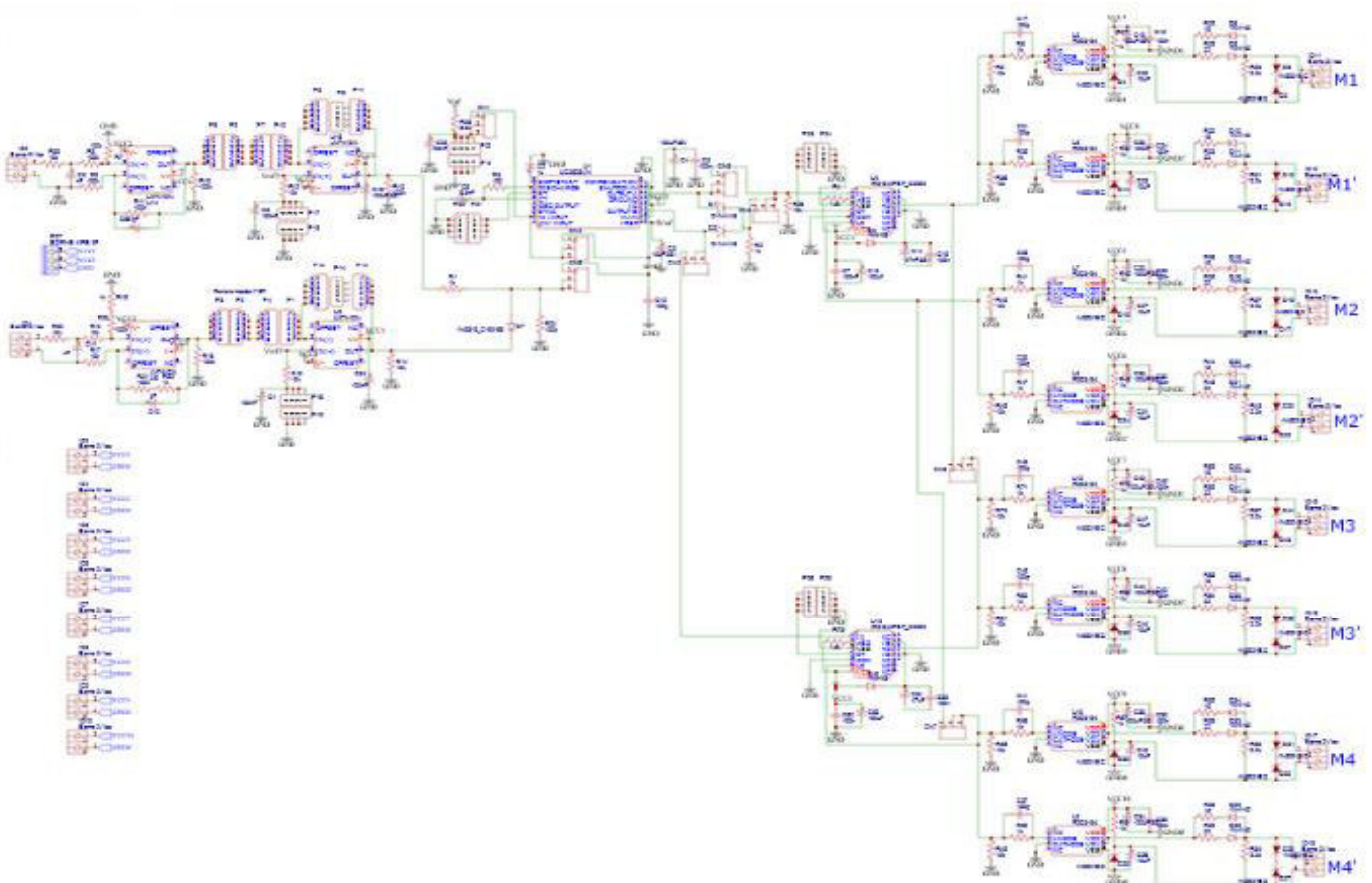
A plataforma escolhida foi a EasyEDA é uma plataforma que possui várias vantagens, ágil, moderna e fácil de entendimento, por não precisar fazer o download é uma vantagem muito grande, mais aí entra a questão da qualidade de internet que influencia no desenvolvimento do projeto, na EasyEDA você pode projetar, simular, solicitar orçamento de placa (CIA, 2022). Para ter o acesso gratuito, os projetos tem que se tornar públicos, ou seja, permite que qualquer pessoa possa acessar. O EasyEDA permite a importação de arquivos DXF, para a fabricação de PCB's, através de arquivos Gerber, que são arquivos de formato universal para a formação da placa de circuito impresso (EMBARCADOS, 2022), (GRIFFUS, 2022).

Será apresentado o esquemático do circuito de controle com os componentes necessários para seu funcionamento. No circuito, temos um modulador de PWM com o circuito integrado UC 3525 A, depois as malhas de tensão e de corrente, com os amplificadores operacionais LM741, segue em anexo, com diferentes funções, seguidor de tensão ou *buffer*, compensador e subtrator, logo em seguida o gerador de tempo morto o IR 21844 e o *driver* de acionamento o optoacoplador FOD3184, além desses componentes, temos também a topologia da fonte auxiliar, que será um *flyback* por apresentar 15 V nas quatro saídas.

## 2.2 TOPOLOGIA DA PLATAFORMA

Podemos observar na Figura 31, o projeto esquemático do sistema de controle com limitação de corrente dos conversores CC-CC da família *buck*.

Figura 31 - Projeto esquemático



Fonte: Adaptado de BASCOPE (2022).

## 2.3 ANÁLISE QUALITATIVA DA PLATAFORMA

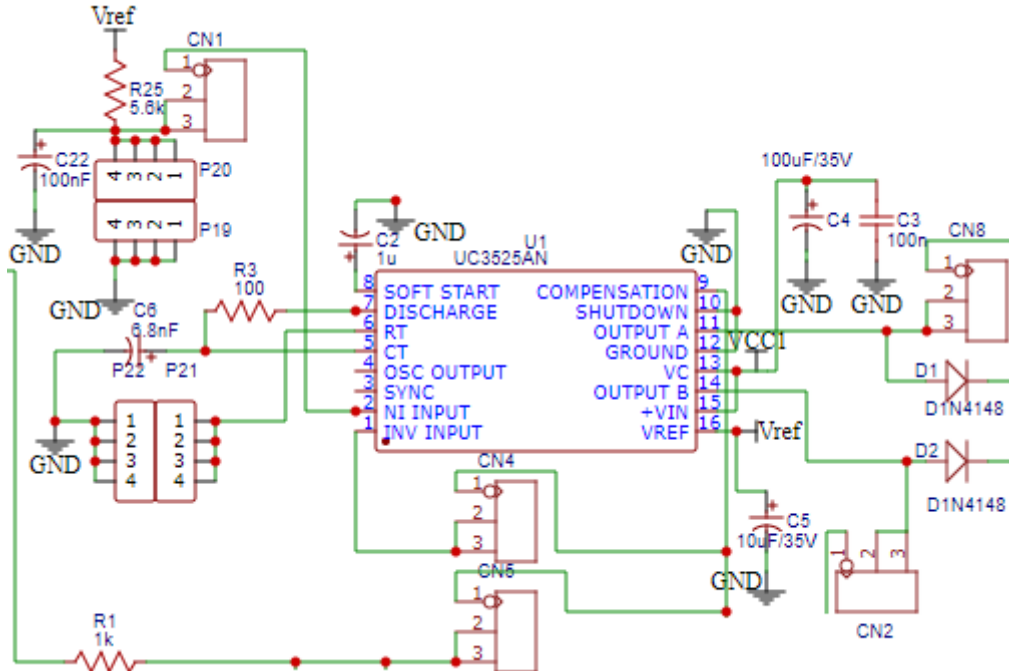
Na análise qualitativa será apresentado todos os componentes usados para compor o esquemático, Figura 31, os amplificadores operacionais, o modulador por largura de pulso, os *dead-time* e os optoacopladores.

### 2.3.1 Circuito Integrado PWM UC-3525A

O circuito integrado UC3525 A, Figura 32, é um modulador por largura de pulsos, que tem várias características importantes para seu funcionamento que são: possui uma tensão de operação que varia de 8 V a 35 V, sua tensão de referência com a corrente de erro regulada é de 5,1 V, os pulsos PWM são controlados por travas que inibem várias saídas ou geração de pulsos, possui controle do tempo morto com amplo ajustes, possui uma frequência do oscilador variável entre 100 kHz à 500 kHz através de um resistor

externo, na Tabela 1, podemos observar a função de cada pino do circuito integrado UC 3525 A (JF-PAREDE, 2022).

Figura 32 - Circuito integrado UC3525 A



Fonte: Adaptado BASCOPÉ (2022).

Tabela 1 - Modulador de PWM UC 3525 A

Pino	Nome do pino	Descrição
1	Inv	Entrada do amplificador de erro embutido no circuito, o pino 1 é a entrada inversora e no projeto está conectada ao pino 9 (JF-PAREDE, 2022).
2	NI	É a entrada não inversora complementar que possui um divisor de tensão para ter uma tensão de retorno na saída, essa tensão de retorno deve ser ajustada para valores abaixo da tensão de referência 5,1 V (JF-PAREDE, 2022).
3	Sync	Tem como função sincronizar o circuito com uma frequência do oscilador externo nesse projeto o pino 3 não será usado (JF-PAREDE, 2022).

<b>4</b>	Osc. Out	É a saída do oscilador e a frequência pode ser verificada nesse pino, não será usado no projeto (JF-PAREDE, 2022).
<b>5</b>	CT	Deve ser conectado ao capacitor
<b>6</b>	RT	É conectado ao resistor.
<b>7</b>	Disch	Tem como função determinar o tempo morto e quando é inserido um resistor nos pinos 5 e 7 o tempo morto é corrigido (JF-PAREDE, 2022).
<b>8</b>	Soft-Start	Seu funcionamento se deve a um capacitor acoplado ao terra para permitir a inicialização suave da saída (JF-PAREDE, 2022).
<b>9</b>	Comp	O pino de compensação que tem como função manter operações suaves e sem ruídos
<b>10</b>	Shutdown	Tem como função desligar as saídas do circuito, esse pino é conectado ao terra para que evite o mal funcionamento do circuito, não pode ser desconectado para evitar capturas de sinal (JF-PAREDE, 2022).
<b>11</b>	Output A	Tem como função controlar a modulação PWM da saída (JF-PAREDE, 2022).
<b>12</b>	GND	É conectado ao terra (JF-PAREDE, 2022).
<b>13</b>	Vc	Tem como função fazer com que as saídas A e B sejam comutadas através da alimentação aplicada no pino 13 (JF-PAREDE, 2022).
<b>14</b>	Output B	Tem como função controlar a modulação PWM da saída (JF-PAREDE, 2022).
<b>15</b>	+ Vin	É o pino de entrada para alimentação (JF-PAREDE, 2022).
<b>16</b>	Vref	É a tensão de referência e possui 5,1 V se não for usado esse pino deve ser aterrado com um capacitor de valor mínimo (JF-PAREDE, 2022).

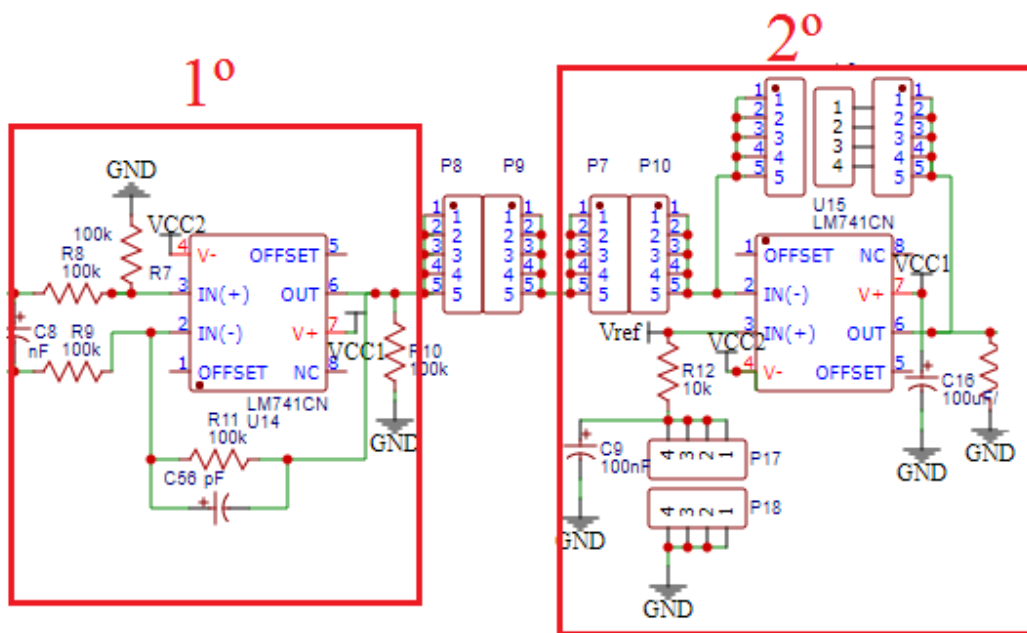
Fonte: *Datasheet UC 3525 A*

Os pinos 1 e 2 podem ser configurados para fazer uma correção da tensão de saída do conversor (JF-PAREDE, 2022).

### 2.3.2 Malha de Tensão

Na Figura 33, temos a malha de tensão do esquemático onde podemos observar dois amplificadores operacionais o primeiro funciona como seguidor de tensão ou *buffer* e o segundo amplificador funciona como compensador.

Figura 33 - Malha de tensão



Fonte: Adaptado BASCOPE (2022).

A malha de tensão possui um passo a passo que sempre é aplicado em sistemas de controle, o projeto inicia com a construção do diagrama de bode através da função de transferência de laço aberto da malha sem o compensador através da expressão (2.1),

$$FTLA_{scv}(s) = G_v(s)H_v(s)F_m(s). \quad (2.1)$$

Logo,

$FTLA_{scv}(s)$ : função de transferência de laço aberto da malha

$G_v(s)$ : função de transferência de malha aberta

$H_v(s)$ : função de transferência do sensor de saída

$F_m(s)$ : função de transferência do laço aberto do sistema

Em seguida para determinar a frequência de cruzamento de ganho unitário da malha de tensão, que deve ser mais lenta que a malha de corrente. Temos que procurar a margem de fase  $M$ , e para isso, deve-se adotar os valores que estão entre os ângulos  $30^\circ$  e  $90^\circ$  (TOFOLI, 2018).

Depois para determinar o ganho do compensador na frequência de cruzamento de ganho unitário é usado a expressão (2.2), e para definição do avanço de fase usa-se a expressão (2.3) (TOFOLI, 2018).

$$G = 10^{\frac{G_{dB}}{20}} \quad (2.2)$$

$$\alpha = M - P - 90 \quad (2.3)$$

Para então, definir o tipo de compensador, para isso podemos usar o fator K, e para sua determinação, podemos considerar que K é 1 ou calcular a partir das expressões (2.4) e (2.5) (TOFOLI, 2018).

$$K = \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2} + 45^\circ\right) \quad (2.4)$$

$$K = \left\{ \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{4} + 45^\circ\right) \right\}^2 \quad (2.5)$$

Depois de calculado o fator K, podemos determinar a sintonia, onde é encontrado através da alocação dos zeros e polos do plano complexo, mas antes, temos que considerar o tipo de compensador, e posteriormente calcular os valores dos capacitores e resistores nas expressões (2.6) à (2.14) (TOFOLI, 2018).

Compensador tipo 1

$$C_1 = \frac{1}{2\pi f_c G R_1} \quad (2.6)$$

Compensador tipo 2

$$C_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{cv} \cdot G \cdot K \cdot R_1} \quad (2.7)$$

$$C_1 = C_2 \cdot (K^2 - 1) \quad (2.8)$$

$$R_2 = \frac{K}{2 \cdot \pi \cdot f_{ci} \cdot C_1} \quad (2.9)$$

Compensador 3

$$C_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{cv} \cdot G \cdot R_1} \quad (2.10)$$

$$C_1 = C_2 \cdot (K - 1) \quad (2.11)$$

$$R_2 = \frac{\sqrt{K}}{2 \cdot \pi \cdot f_{ci} \cdot C_1} \quad (2.12)$$

$$R_3 = \frac{R_1}{K - 1} \quad (2.13)$$

$$C_3 = \frac{1}{2\pi f_c R_3 \sqrt{K}} \quad (2.14)$$

Para finalizar o modo de tensão com proteção, é preciso traçar o diagrama de bode do compensador da malha de tensão  $C_v(s)$ , assim como determinar a função de transferência  $FTLA_{ccv}(s)$  e seu diagrama de bode no qual deve ter um ganho nulo e frequência de cruzamento adequado para isso devemos usar a expressão (TOFOLI, 2018).



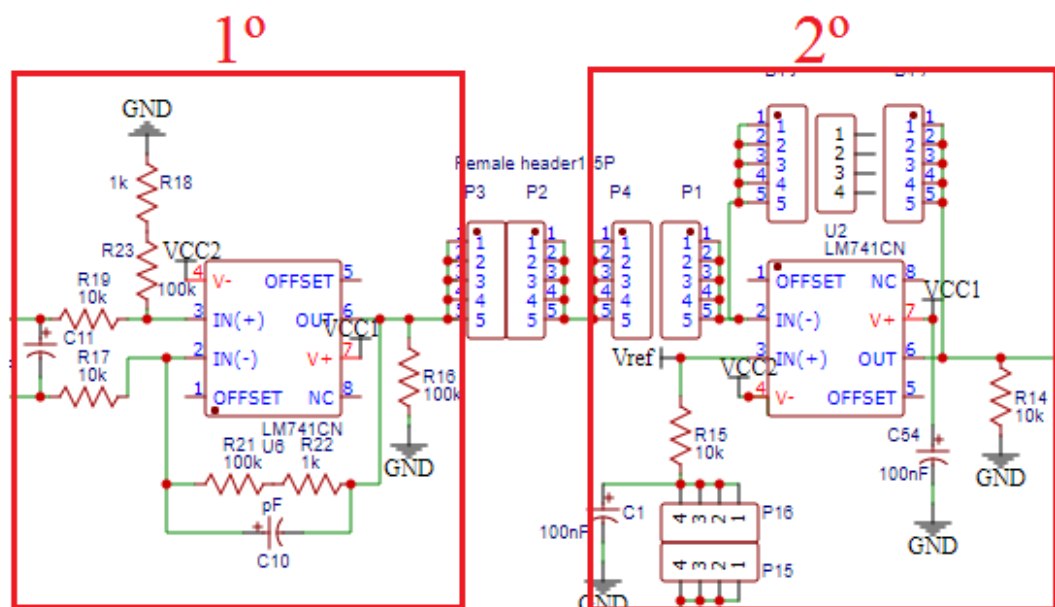
$$FTLA_{ccv}(s) = FTLA_{scv}(s) \cdot C_v(s) \quad (2.15)$$

Depois de achar o diagrama de bode da função de transferência de laço aberto sem compensação e com compensação será projetada a malha de corrente, o modo como é projetado é muito parecido com a malha de tensão.

### 2.3.3 Malha de Corrente

Na Figura 34, temos a malha de corrente do esquemático, onde podemos observar dois amplificadores operacionais, o primeiro funciona como subtrator e o segundo amplificador funciona como compensador.

Figura 34 - Malha de corrente



Fonte: Adaptado BASCOPE (2022).

Para o desenvolvimento da malha de corrente temos um passo a passo muito parecido com a malha de tensão, temos até, algumas expressões repetidas. Para iniciar o projeto da malha de corrente, é necessário, através da função de transferência da malha de corrente  $FTLA_{sci}(s)$ , sem compensador, encontrar o diagrama de bode é dada a expressão (2.16) (TOFOLI, 2018).

$$FTLA_{sci}(s) = G_i(s)H_i(s)H_e(s)F_m(s) \quad (2.16)$$

$G_i(s)$ : função de transferência da corrente do indutor e a razão cíclica

$H_i(s)$ : ganho do sensor de corrente, que pode ser um resistor shunt, pois seu valor está relacionado com a tensão de referência  $V_{I(ref)}$  e a tensão da corrente máxima de saída  $V_{Io(máx.)}$  é dada pela expressão abaixo (TOFOLI, 2018).

$$H_i(s) = \frac{V_{I(ref)}}{V_{Io(máx.)}} \quad (2.17)$$

$H_e(s)$  é a função de transferência de amostragem que fica localizada na realimentação da malha de corrente e atua na comutação da malha (TOFOLI, 2018).

$$H_e(s) \approx 1 + \frac{s}{\omega_z \cdot Q_z} + \frac{s^2}{\omega_z^2} \quad (2.18)$$

Onde,

$$\omega_z = \frac{\pi}{T_s} = \pi \cdot f_s \quad (2.19)$$

$$Q_z = -\frac{2}{\pi} \quad (2.20)$$

Depois de calcular a função de transferência, podemos verificar a frequência de cruzamento de ganho unitário, em que a malha de corrente é mais rápida na saída que a malha de tensão. E em seguida, para a escolha da margem de fase M na malha de corrente, adotar os valores que estão entre os ângulos 20° e 40° (TOFOLI, 2018). Para então definir o avanço de fase, para isso é necessário usar a expressão (2.21),

$$v_{c1p} - R_L i_c - L \frac{di_c}{dt} - v_o = 0 \quad (2.21)$$

Com isso, para definir o tipo de compensador na malha de corrente, precisamos encontrar qual o valor do fator K, e para sua determinação considerar que K é 1 ou calcular a partir das expressões (2.4) e (2.5) informadas anteriormente (TOFOLI, 2018).

Depois desse processo determinar a sintonia que acontece através da alocação dos zeros e polos. Mas ainda temos que considerar os tipos de compensadores, de acordo com o fator K e para isso, é necessário calcular os valores dos capacitores e resistores a partir das equações (2.6) à (2.14) (TOFOLI, 2018).

Para finalizar, é preciso traçar o diagrama de bode do compensador da malha de corrente  $C_i(s)$ , assim como determinar a função de transferência  $FTLA_{cci}(s)$  e seu diagrama de bode, no qual deve ter um ganho nulo e frequência de cruzamento adequado para isso devemos usar a expressão (TOFOLI, 2018).

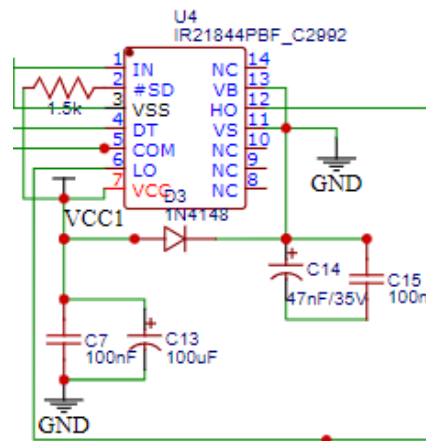
$$FTLA_{cci}(s) = FTLA_{sci}(s)C_i(s) \quad (2.22)$$

### 2.3.4 Gerador de Tempo Morto (*Dead Time*)

Para gerar o tempo morto (dead time), Figura 35, foi empregado o uso do circuito integrado IR21844 que é um CI (circuito integrado) para FETs (Field Effect Transistor) e IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistor) que protege o acionamento simultâneo de

chaves para evitar uma corrente muito alta e a queima do circuito. A tensão de alimentação do CI deve ser entre 10 V e 20 V, para acionamento do PWM usa-se uma tensão de 3,3 V (CARVALHO, 2022). O IR21844 possui 14 pinos e suas funções são abordadas na Tabela 2.

Figura 35 - Circuito integrado IR21844



Fonte: Adaptado BASCOPE (2022).

Tabela 2 - Gerador de tempo morto IR21844

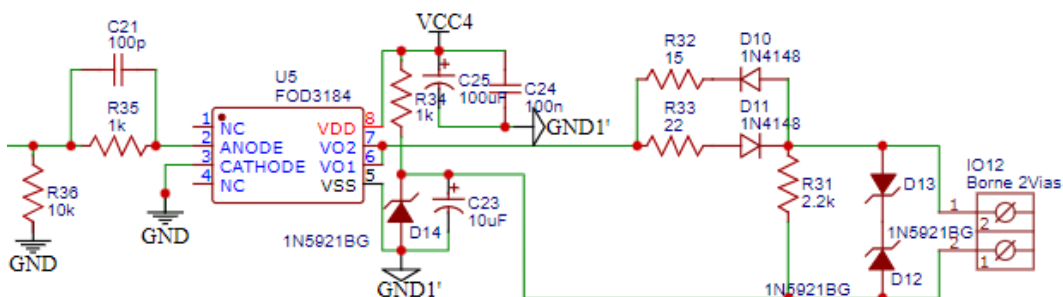
Pino	Nome do pino	Descrição
1	IN	Entrada lógica para saídas de driver de nível alto e de nível baixo, em fase com nível alto.
2	$\overline{SD}$	Entrada lógica para desligamento.
3	V <sub>SS</sub>	Terra
4	DT	Tempo morto programável.
5	COM	Retorno lateral baixo
6	LO	Saída para acionamento nível baixo
7	V <sub>CC</sub>	Alimentação
8	NC	Pino não conectado
9	NC	Pino não conectado
10	NC	Pino não conectado
11	V <sub>S</sub>	Retorno de alimentação flutuante
12	HO	Saída para acionamento nível alto
13	V <sub>B</sub>	Fornecimento flutuante lado de alta

Fonte: *Datasheet IR21844*

### 2.3.5 Circuitos de Acionamento (*Drivers*)

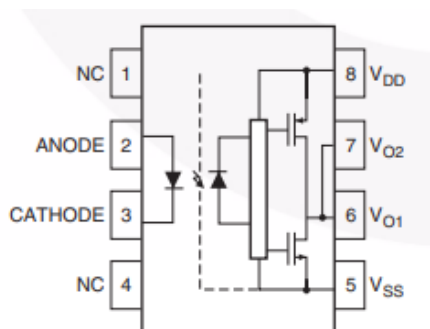
Para os circuitos de acionamento serão usados optoacopladores do tipo FOD3184, Figura 36, que tem como característica alta velocidade com corrente de saída de 3A, consiste em um diodo de luz acoplado a um detector CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor), Figura 37, o FOD 3184 é um optoacoplador ideal para acionamento de circuitos em alta frequência, possui 8 pinos e a função de cada pino está descrito na Tabela 3 (INDUSTRIES, 2022).

Figura 36 - Circuito integrado FOD3184



Fonte: Adaptado BASCOPE (2022).

Figura 37 - Parte interna do circuito integrado FOD3184



Fonte: *Datasheet FOD 3184*

Tabela 3 - Optoacoplador FOD3184

Pino	Nome do pino	Descrição
1	N/C	Pino não conectado
2	Anode	LED Ânodo

3	Cathode	LED Cátodo
4	N/C	Pino não conectado
5	V <sub>SS</sub>	Tensão negativa
6	V <sub>o2</sub>	Tensão de saída internamente conectado com V <sub>o1</sub>
7	V <sub>o1</sub>	Tensão de saída
8	V <sub>CC</sub>	Tensão positiva

Fonte: *Datasheet* FOD3184

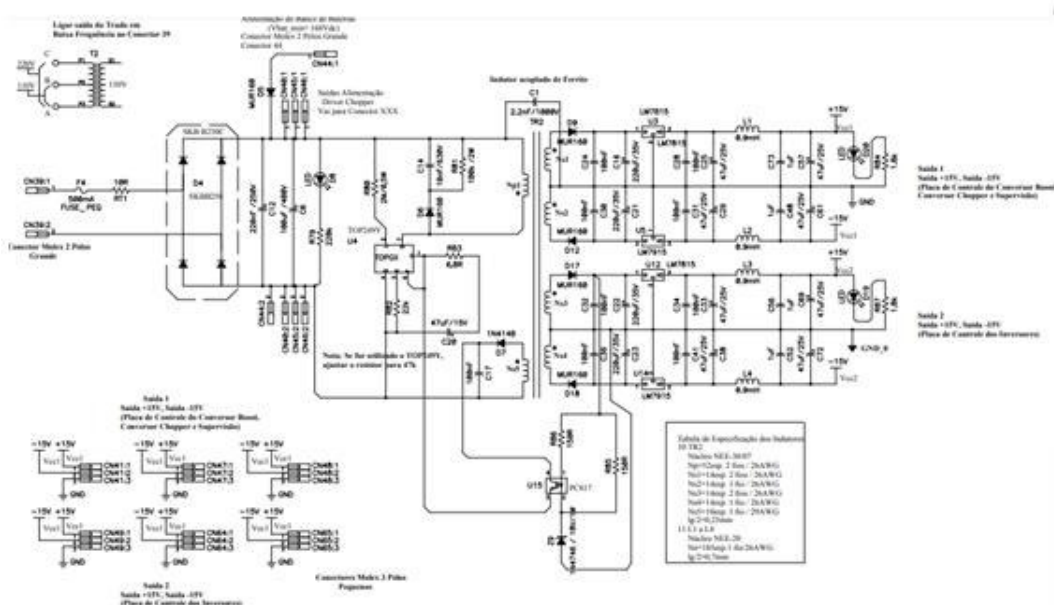
## 2.4 FONTE AUXILIAR PARA POLARIZAÇÃO DO CIRCUITO DA PLATAFORMA

A fonte auxiliar usado para alimentar o sistema de controle é um conversor *flyback* do tipo CC-CC, que possui uma topologia equivalente ao conversor *buck-boost* e possui um circuito isolado através de um transformador (BARBI,2000).

### 2.4.1 Topologia

O conversor *flyback*, apresentado no esquemático, Figura 38, possui uma alimentação CA capaz de produzir quatro saídas CC de 15V, e ainda possui uma realimentação de tensão, que consiste em uma malha de tensão com múltiplas saídas e um filtro para suprimir ruídos de alta frequência.

Figura 38 - Circuito do *flyback*



Fonte: BASCOPÉ (2022).

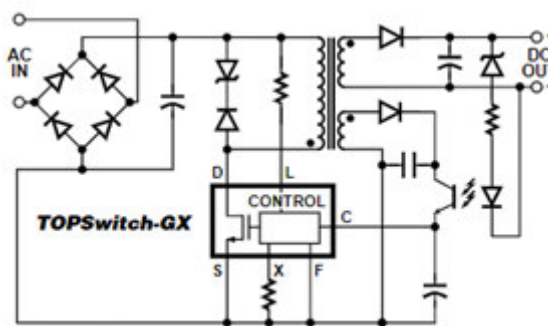
## 2.4.2 Princípio de Funcionamento

De acordo com o esquemático do circuito *flyback*, Figura 38, usado como fonte auxiliar, possui um transformador específico, para alimentar o sistema com entradas de 220V e 110V e na saída 150V que é a tensão nominal de entrada do conversor. Caso não tenha o transformador usa-se um varivolt para variar a tensão até atingir o valor de 150V. O transformador é ligado na entrada do *flyback* que possui duas proteções, um fusível e um termistor NTC (Coeficiente de Temperatura Negativa) de 10  $\Omega$ , esse termistor permite que o circuito funcione até certa temperatura, se a temperatura aumentar a resistência diminui, e se isso ocorrer, o sistema deixa de funcionar (ADDTHERM, 2022).

Quando a fonte é ligada, os capacitores de barramento sem o termistor serão carregados o que pode ocasionar curto, então é preciso colocar o termistor para limitar a corrente e fazer o carregamento desses capacitores. Depois desses capacitores o circuito possui um LED, para sinalizar que o primário do transformador está energizado. A seguir, temos o circuito *flyback* com o transformador com quatro secundários, onde a polaridade da bobina do secundário é invertido em relação ao primário que é uma das características do *flyback*.

No primário temos um circuito integrado TOP249Y, Figura 39, possui circuitos analógicos para condicionar o sinal e fazer o controle das chaves, é aplicado em conversores *flyback* possui um MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*).

Figura 39 - Circuito integrado TOP249Y



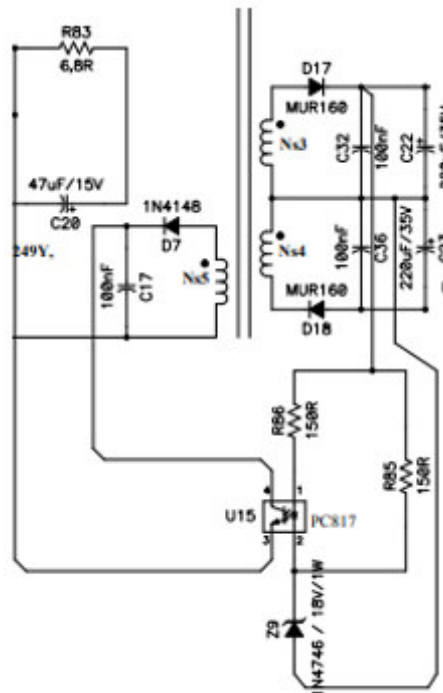
Fonte: *Datasheet* TOP249Y.

Depois do transformador temos no secundário os diodos e os capacitores característicos do *flyback*, adiante temos o regulador de tensão positiva LM7815 usado para fazer uma fonte espelhada que vai regular em 15V e abaixo temos outro regulador de tensão positiva LM7915, da forma que está conectado vai produzir -15V com relação ao ponto central entre os reguladores. A seguir, temos os capacitores e indutores de filtro

e LED para informar que a saída está energizada, o secundário desse circuito fornece quatro saídas isoladas.

Na conexão da tensão de uma das saídas de 15V passa por um diodo zener de 18V e passa por um optoacoplador o PC817, que faz a realimentação da tensão através dessa malha, Figura 40.

Figura 40 - Realimentação da tensão



Fonte: BASCOPE (2022).

## 2.5 CONCLUSÃO

Nesse capítulo foi apresentado o esquemático da fonte auxiliar e do sistema de controle. Na topologia da plataforma foi mostrado o esquemático desenvolvido para prototipagem da placa, e são apresentados os componentes mais importantes que são: o circuito integrado UC 3525 A, responsável pela modulação PWM onde foram definido a função dos pinos, assim como suas principais características, temos também a malha de tensão e de corrente com os amplificadores operacionais LM741, as função de transferência, o fator K, depois temos o gerador de tempo morto IR21844 onde é mostrado sua função e características, além do optoacoplador FOD 3184 responsável pelo acionamento das chaves dos conversores controlados.

Na fonte auxiliar foi usado um conversor *flyback* que possui um comutador TOP249Y que faz o controle do chaveamento, temos dois reguladores de tensão positivo

o LM7815 e o LM7915, e o optoacoplador PC817 responsável pela realimentação de tensão do secundário para o primário.

Podemos utilizar outros conversores como fonte auxiliar, foi escolhido esse, por possuir quatro saídas de 15V, podendo ser conectado outra *flyback* com as mesmas características, para conexão na placa de controle, existe uma variedade de fontes auxiliares o importante é ter uma quantidade de saídas compatíveis com o circuito que será conectado.



### 3. MANUAL DE OPERAÇÕES DA PLATAFORMA

Para o manual de operação da plataforma será realizado um tutorial com informações básicas de como fazer o esquemático e o PCB, informações de como compartilhar o projeto. Será mostrado as formas de acionamento dos conversores CC-CC da família *buck*.

#### 3.1 INTRODUÇÃO

A plataforma EasyEDA, permite fazer tanto simulação, como fazer protótipo de placas em PCB, para o projeto de conversores CC-CC com comutação dissipativa e controle de limitação de corrente, a plataforma será aplicada apenas na função padrão para prototipagem da placa PCB.

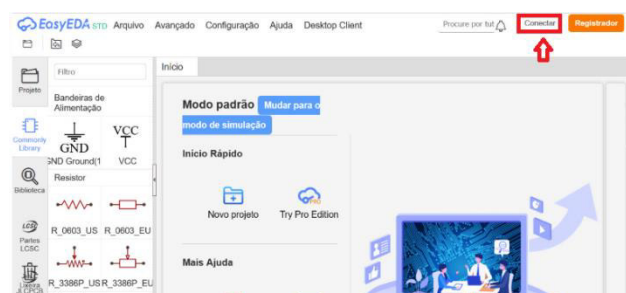
Neste tópico será mostrado o ambiente de trabalho, com as principais ferramentas usadas para a criação do esquemático, para depois ir para o ambiente da placa PCB, será realizado um passo a passo de comandos essenciais, assim como ao longo da explicação terá dicas de projeto, como posicionamento dos componentes, quais camada usar para os projetos, como compartilhar os projetos.

Será apresentado também as formas de chaveamento dos conversores CC-CC da família *buck* para serem usados no sistema de controle proposto.

#### 3.2 TUTORIAL DA PLATAFORMA

Começamos o tutorial com a página inicial, Figura 41, onde temos a barra de menu com os comandos, mas para iniciar o esquemático, é preciso se conectar, no lado direito da tela tem a opção de conectar, quando clicamos, aparece outra página com a opção de cadastro ou uso de uma conta google.

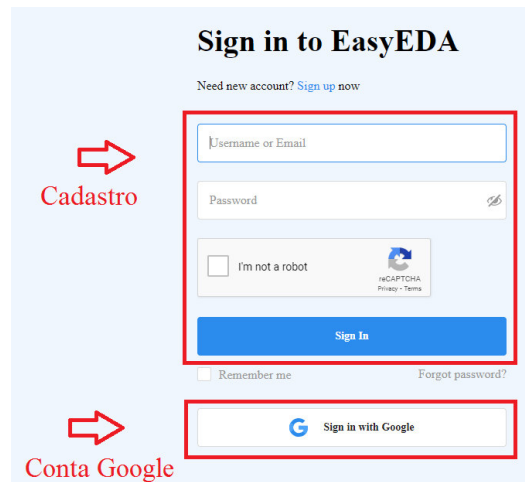
Figura 41 - Página inicial EasyEDA



Fonte: EASYEDA

Na Figura 42, observamos a tela, onde podemos cadastrar ou acessar a plataforma com uma conta *google*, a vantagem com a conta google o acesso se torna mais rápido, pois os dados já estão salvos.

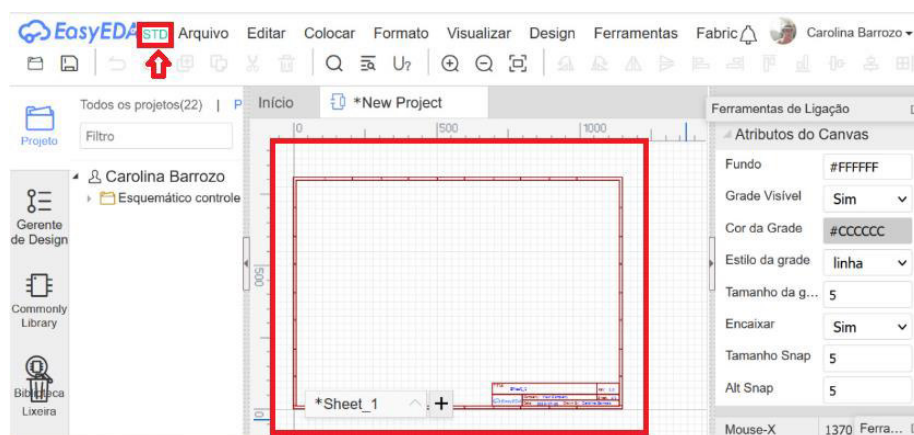
Figura 42 - Tela para fazer o login



Fonte: EASYEDA

Depois de conectado, será mostrado o local de trabalho do EasyEDA, Figura 43, destinado a montagem dos circuitos esquemáticos, deve-se verificar se a área está no ambiente padrão STD (Standard).

Figura 43 - Ambiente padrão STD

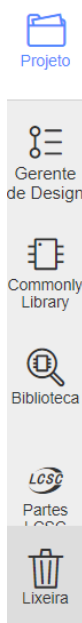


Fonte: EASYEDA

Para iniciar o esquemático é necessário saber sobre o painel de navegação Figura 44 que é o local onde se encontra os projetos, o gerenciamento dos componentes, os componentes eletrônicos, biblioteca, ambiente de compras tanto de componentes como

de placas pré-fabricadas e lixeira. Em seguida será apresentado a função de cada item do painel de navegação.

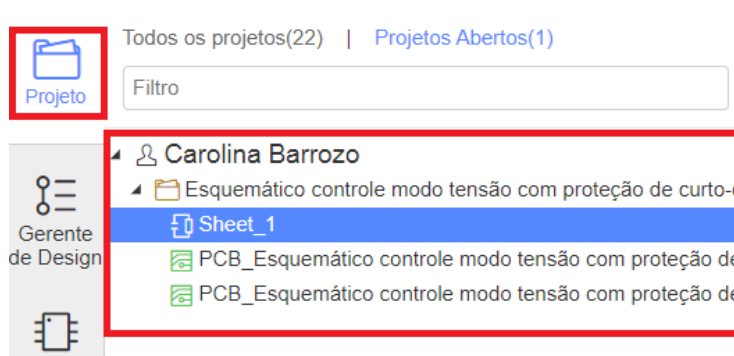
Figura 44 - Painel de navegação



Fonte: EASYEDA

Em projetos, podemos encontrar todos os projetos públicos, privados e compartilhados, Figura 45. Na seção de projetos, temos as pastas com os esquemáticos (*sheets*), e se for feita a placa de circuito impresso, tem uma pasta para a PCB (EASYEDA, 2022).

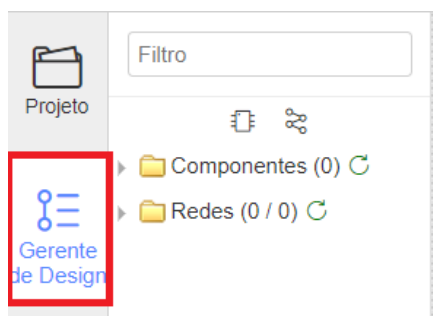
Figura 45 - Projetos



Fonte: EASYEDA

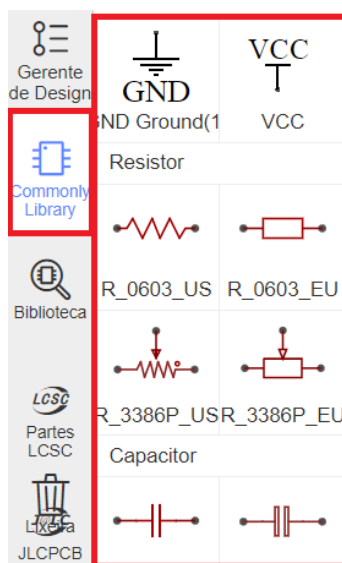
Na Figura 46, temos o gerente de design onde podemos observar a quantidade de componentes usados no projeto como também a quantidade de conexão que aparece em redes (EASYEDA, 2022).

Figura 46 - Gerente de design



Fonte: EASYEDA

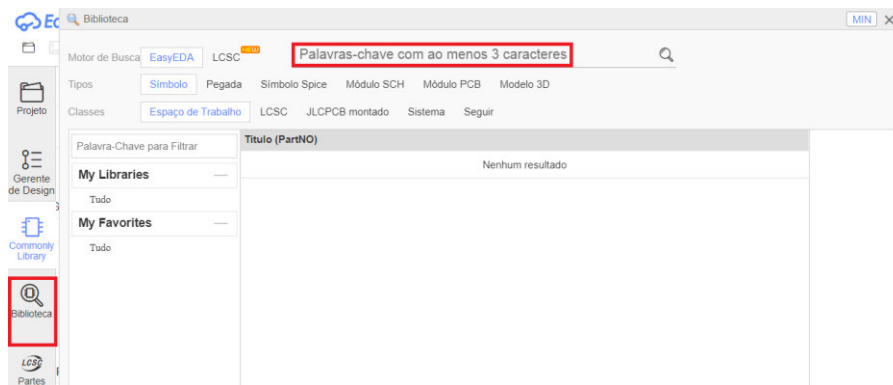
Adiante, temos os componentes usados para a construção dos esquemáticos, o *commonly library*, Figura 47, possui uma quantidade limitada de componentes, quando não encontramos o componente, é só clicar em biblioteca para aumentar a quantidade de opções (EASYEDA, 2022).

Figura 47 - *Commonly library*

Fonte: EASYEDA

Na Figura 48, temos a biblioteca, onde podemos encontrar outros componentes para o projeto, além de, permitir a criação de novos. Quando procuramos um componente é interessante especificar, através nome, tamanho, formato, já que é permitido até três caracteres para escolha do objeto, para que o projeto não apresente erros quando for executar (EASYEDA, 2022).

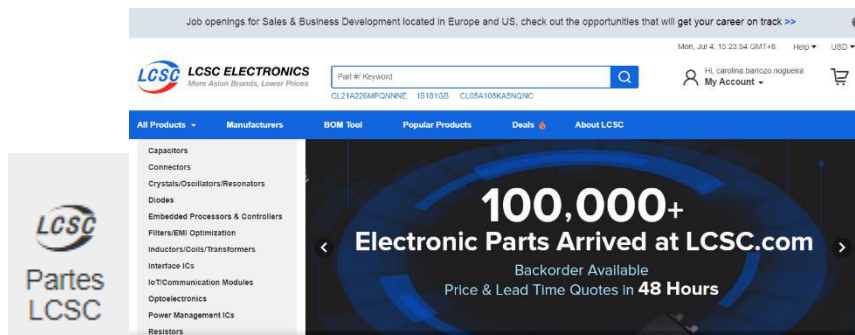
Figura 48 - Biblioteca



Fonte: EASYEDA

Em LCSC (*China's Leading Electronic Components Distributor*), Figura 49, é uma loja on-line que faz parceria com o EasyEDA, que permite a compra em pequena e média escala, por um preço acessível (EASYEDA, 2022).

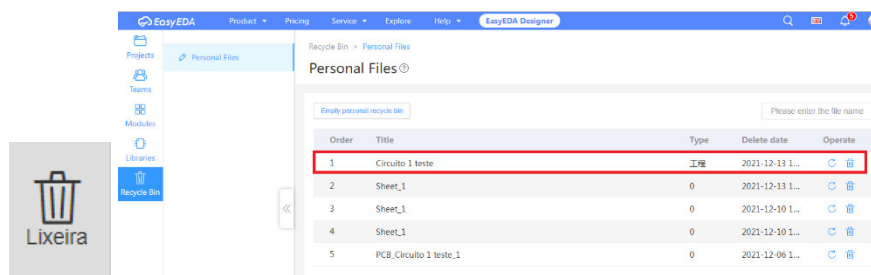
Figura 49 - LCSC



Fonte: EASYEDA

Na lixeira, Figura 50, permite que o projeto seja excluído, quando clica no ícone da lixeira será direcionado para outra página, nessa página selecionamos o arquivo a ser deletado. (EASYEDA, 2022).

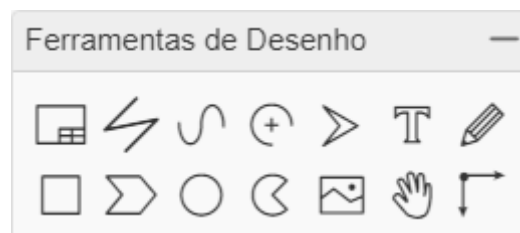
Figura 50 - Lixeira



Fonte: EASYEDA

Depois de apresentar todo o menu do painel de navegação, será apresentado as ferramentas de desenho, Figura 51, usadas para desenhar formas no esquemático. Em seguida é apresentado a Tabela 4 com as especificações de cada ferramenta (EASYEDA, 2022).

Figura 51 - Ferramentas de desenho



Fonte: EASYEDA

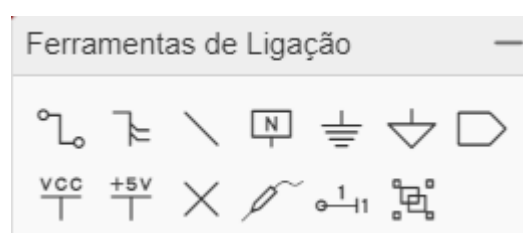
Tabela 4 - Símbolos e funções das ferramenta de desenho

Símbolo	Função	Símbolo	Função
	Configuração da folha		Retângulo
	Linha		Polígono
	Curvas de Bézier		Elipse
	Arco		Torta
	Marcação		Imagem
	Texto		Arrastar
	Desenho a mão livre		Origem da tela

Fonte: EASYEDA














Na Figura 52 temos as ferramentas de ligação usadas para conectar os componentes no esquemático, e na tabela 5 a função de cada ferramentas.

Figura 52 - Ferramentas de ligação



Fonte: EASYEDA

Tabela 5 - Símbolos e funções das ferramenta de ligação

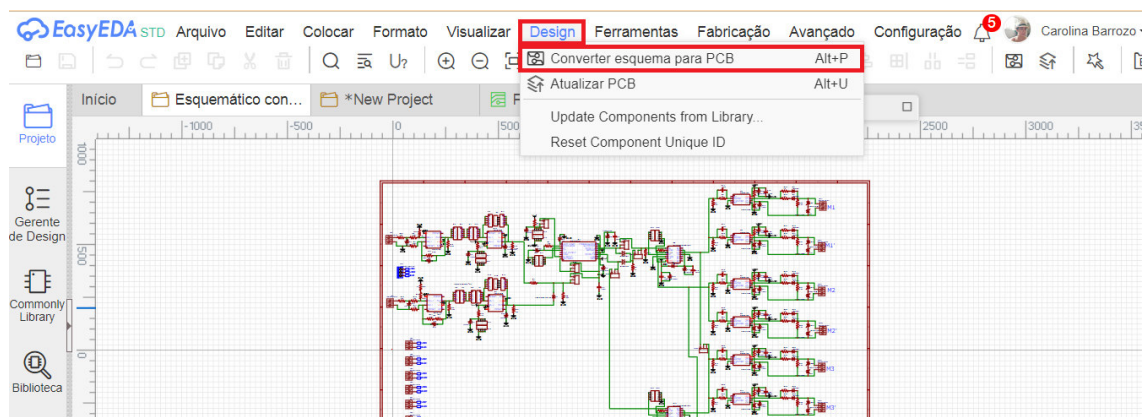
Símbolo	Função	Símbolo	Função
	Conectar, tecla de atalho W.		<i>NetFlag</i> VCC, tecla de atalho Ctrl+Q
	<i>Bus</i> , conecta vários fios.		<i>NetFlag</i> +5V
	<i>Bus entry</i> , se for conectar um bus é preciso conectar um bus entry.		Não conectado
	<i>NetLabel</i> dá nome aos fios, tecla de atalho N.		Sonda de tensão, usado na simulação, para verificar forma de onda.
	<i>Net Flag</i> GND, tecla de atalho Ctrl+G		<i>Pin</i> , criar pino para novo símbolo.
	<i>Net Flag</i> GND.		Agrupar/Desagrupar símbolos, criar símbolos na biblioteca.
	Porta-Net roteamento de fios.		

Fonte: EASYEDA

No esquemático uma das teclas de atalho mais usado foi o espaço, onde sua função é fazer a rotação dos componentes.

Como a principal abordagem do projeto está na fabricação da placa de circuito impresso, quando finaliza o esquemático na barra de menu clica em Design> Converter Esquema para PCB, Figura 53.

Figura 53 - Converter Esquema para PCB

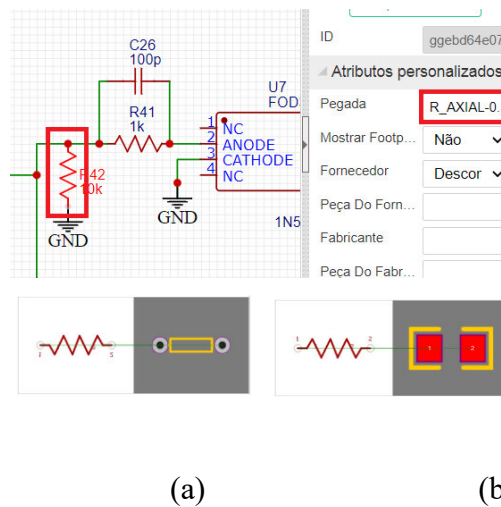


Fonte: EASYEDA

É importante verificar quando montamos o esquemático, se os componentes escolhidos estão em PTH (*pin through hole*) que é um componente que possui terminal

que precisa ser perfurado ou SMD (*surfasse-mount device*) onde não há a necessidade de furos e os componentes são mais compactos e soldados na superfície da placa, para quando passar para o ambiente PCB não seja necessário a troca dos componentes (SC, 2022). Para fazer a verificar os componentes, como exemplo clique no resistor, ele fica selecionado em vermelho, Figura 54 na lateral direita em Atributos Personalizados > Pegada, clica duas vezes para abrir uma tela para visualizar se o componente é PTH ou SMD, Figura 56 (a) e (b).

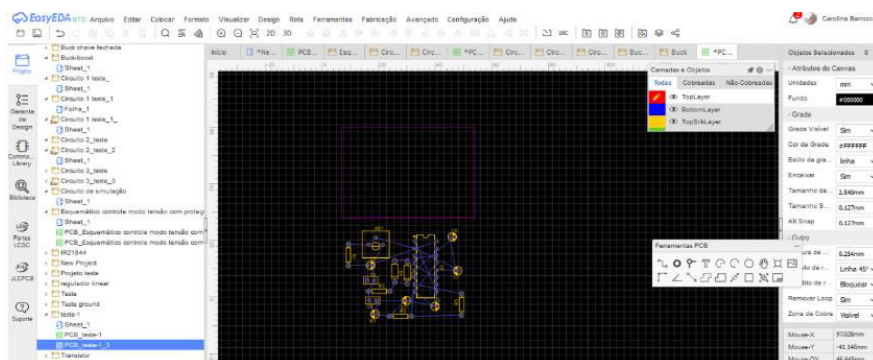
Figura 54 - Tipo de componente PTH (a) ou SMD (b)



Fonte: EASYEDA

O *layout* do ambiente para PCB é diferente do esquemático, temos ferramentas para a fabricação da PCB, camadas e objetos e quando os componentes vão para o ambiente PCB ficam embaralhados para serem ajustados de uma forma padrão e organizada. Podemos observar o *layout* na Figura 55.

Figura 55 - Ambiente de trabalho PCB

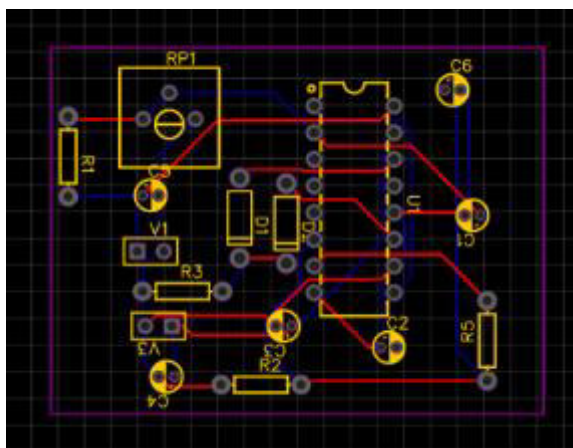


Fonte: EASYEDA



Para iniciar o projeto no ambiente PCB, os componentes devem ser alocados dentro do contorno, Figura 56, esse contorno especifica o tamanho da placa, como é um circuito pequeno foi feito o roteamento automático, mas não é aconselhado pois as trilhas estão na camada *toplayer*, é uma camada que não possui cobre, é mais usada para fazer jumpers, a camada mais indicada para as trilhas é a *bottomlayer*, que é a camada que possui cobre. Para todos os tipos de circuitos é aconselhado fazer manualmente os ajustes, de forma que não fique componente um em cima do outro, e que as trilhas passem entre os componentes com espaçamento que não permita encostar uma trilha na outra e para que não apareça erros no projeto.

Figura 56 - Roteamento automático



Fonte: EASYEDA



















Para a conexão dos componentes no ambiente PCB, temos as ferramentas PCB, Figura 57, algumas dessas ferramentas, possuem a mesma função das ferramentas do esquemático, Tabela 6.

Figura 57 - Ferramentas PCB



Fonte: EASYEDA

Tabela 6 - Símbolos e função das ferramentas PCB

Símbolo	Função	Símbolo	Função
	Permite desenhar trilhas, tecla de atalho W, teclando + ou – altera o tamanho da trilha, clicando na trilha pode ser ajustada a tecla de atalho L permite a mudança de ângulo da trilha, a tecla espaço permite rotacionar a trilha		Origem da tela
	<i>Pad</i> , tecla de atalho P, você pode modificar o <i>Pad</i>		Transferidor
	Via, tecla de atalho V, as vias funcionam como jumpers, corta trilhas de uma camada com trilhas de outra camada.		Conectar Pad ao Pad quando cria um PCB sem esquemático, a conexão tem que ser feita manualmente.
	No texto pode ser adicionado fontes, o EasyEDA não armazena cache então tem que baixar a fonte toda vez que for usar.		Área de cobre é conectada com GND ou trilho de alimentação.
	Arco, pode desenhar muitos arcos com tamanhos diferentes.		Região sólida é uma maneira de conectar Pads
	Arco central		Dimensão fazer e adicionar dimensões.
	Círculo só pode ser desenhado em algumas camadas <i>SilkLayer</i> e <i>Document Layer</i>		Retificar cria uma região sólida.
	Mover		Agrupar e desagrupar símbolos
	Furo que é colocado nas laterais da placa para suporte de parafuso.		Configuração do documento

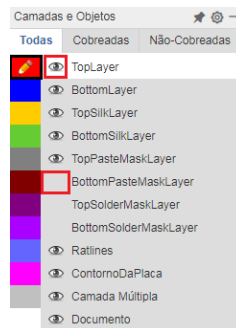


Inserir imagem

Fonte: *EASYEDA*

Nas camadas e objetos, Figura 58, para que a camada esteja ativa o ícone de um lápis tem que está ativado na camada desejada, e para que a camada fique ativa tem que aparecer um olho que informa se a camada está visível e se o olho não aparecer a camada está invisível. Essa forma de visualização das camadas ajuda muito no projeto para verificar o posicionamento das trilhas, deixar um ambiente mais limpo para fazer ajustes.

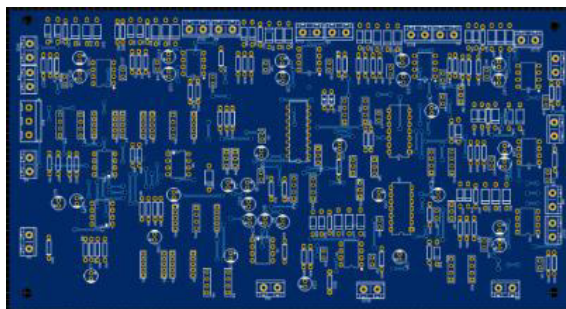
Figura 58 - Camadas e objetos



Fonte: *EASYEDA*

Na Figura 59, podemos observar a finalização da placa em 2D, foram feitos alguns ajustes para permitir o aproveitamento do espaço. Em relação ao formato dos *pads* que ficaram no formato oval, os furos que possuem três padrões para não precisar fazer a troca de brocas várias vezes, e para padronizar a aplicação dos componentes na placa foram colocados na vertical e os componentes que possuem polaridades ficaram alocados na mesma posição.

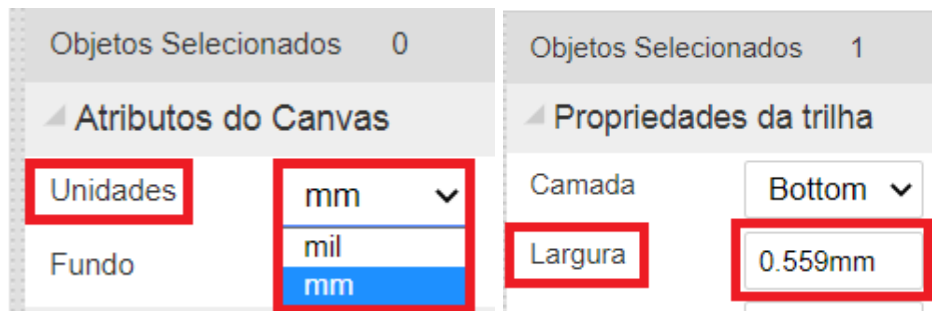
Figura 59 - Placa PCB em 2D



Fonte: *EASYEDA*

No projeto é necessário especificar a unidade que se quer trabalhar e a largura das trilhas. Para escolher a unidade, na lateral direita da tela aparece Objetos Seleccionados > Atributos do Canvas > Unidades, especificar a unidade que pode ser em mm ou em mil. Para modificar a largura das trilhas seleciona o objeto, procura todas as trilhas, na lateral direita em Propriedades da trilha > Largura e altera o valor como mostra a Figura 60.

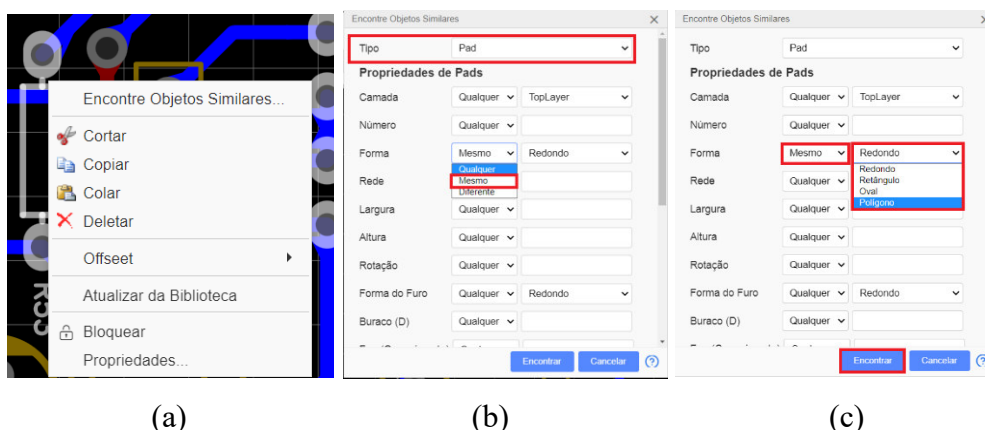
Figura 60 - Unidade dos componentes para projeto



Fonte: EASYEDA

Para selecionar vários objetos iguais e fazer ajustes, como padronizar o tamanho dos furos, assim como o formato dos furos, clica no botão direito do mouse em cima do objeto a ser modificado como mostra a Figura 61 (a), depois vai ser aberto uma caixinha com várias possibilidades, a seguinte escolha Encontre Objetos Similares lhe permite achar várias características para mudança desejada Figura 61(b), e para especificar o tipo de *pad* vai em Forma e clica em Mesmo. Depois procura o formato, sempre vai estar redondo modifica e clica em encontrar Figura 61(c), e todos os componentes com o formato desejado será selecionado, para ser modificado.

Figura 61 - Encontrar objetos similares



(a)

(b)

(c)

Fonte: EASYEDA

Na Figura 62, temos o resultado da procura dos componentes com os mesmos *pads*, desabilitei as camadas para visualizar melhor, em Atributos de objetos > Forma escolhe qual o formato que o *pad* tenha, todos são modificados.

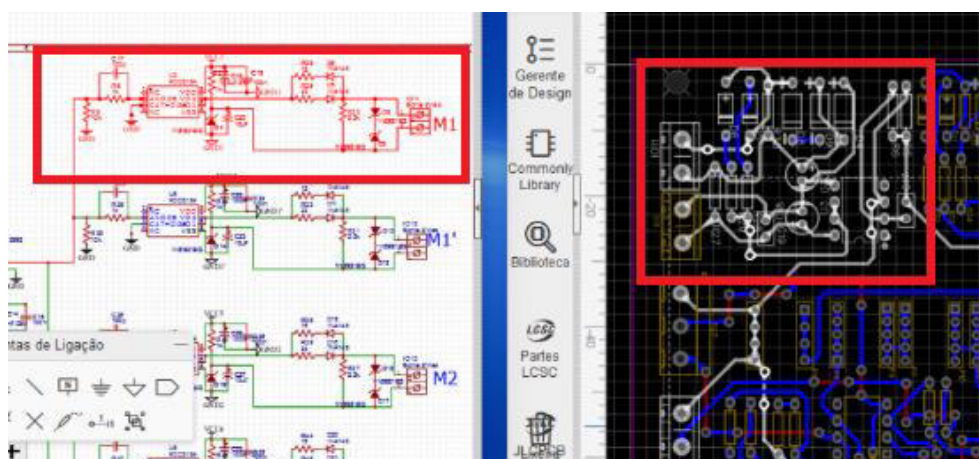
Figura 62 - Formato dos *pads*



Fonte: EASYEDA

Uma das formas de trabalhar com o EasyEDA é com as telas do esquemático e do PCB ao mesmo tempo, para saber o posicionamento dos componentes e até fazer a seleção de vários objetos. Quando usa a tecla de atalho *shift* + x, os componentes que foram selecionados no esquemático ficam selecionados no PCB como mostra a Figura 63.

Figura 63 - Posição dos componentes



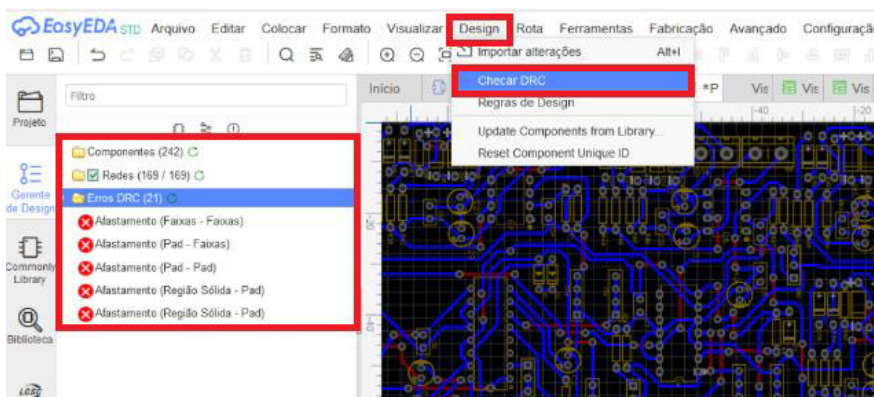
Fonte: EASYEDA

Antes de finalizar o projeto é importante checar o DRC (*Design Rule Check*) para verificar se tem algum erro clica em Design > Checar DRC e no painel de navegação o



gerente de design fica selecionado e aparece os erros de DRC como mostra a Figura 64, para que o projeto funcione perfeitamente é necessário eliminar todos os erros.

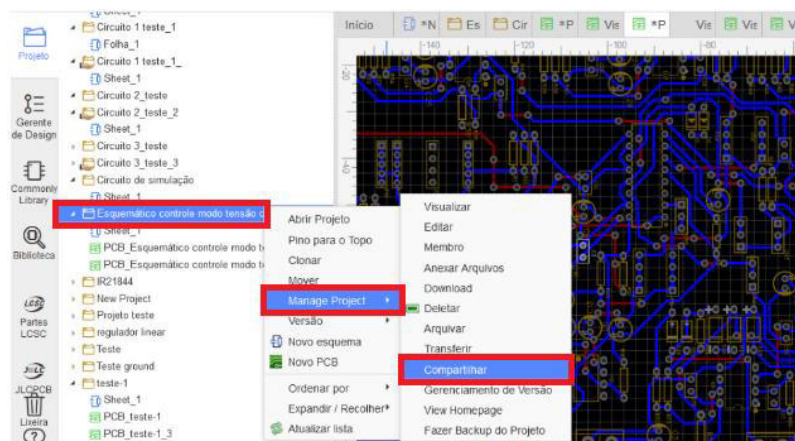
Figura 64 - Checar DRC



Fonte: EASYEDA

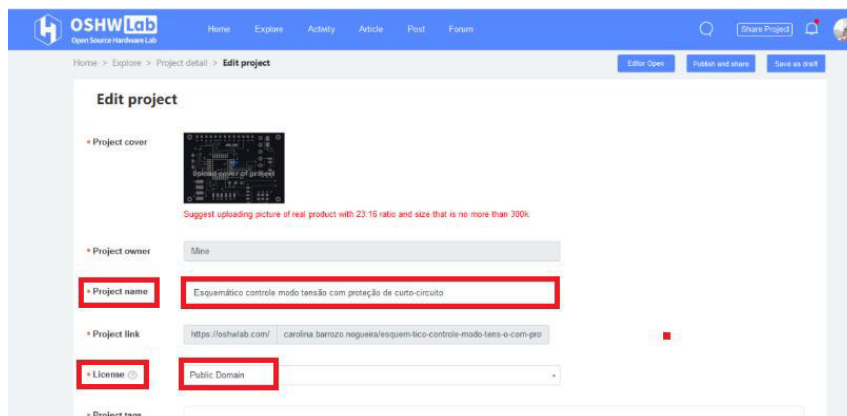
Uma das ferramentas mais interessantes na plataforma EasyEDA é o compartilhamento dos projetos para isso é necessário fazer o passo a passo a seguir, clica com o botão direito em cima da pasta que deseja compartilhar, selecione *Manage Project* >Compartilhar Figura 65, aparece uma caixa de texto, confirma, e depois aparece a tela para editar o projeto, Figura 66, é colocado o nome do projeto, e em licença colocar *Public Domain*, pois permite que outras pessoas possam ter acesso ao projeto, posteriormente, podemos adicionar o membro, quando adicionamos pode-se escolher qual a função desse membro que pode ser: observador, desenvolvedor ou administrador do projeto Figura 67 e 68, depois desse processo é só publicar e compartilhar, Figura 68.

Figura 65 - Compartilhar projeto



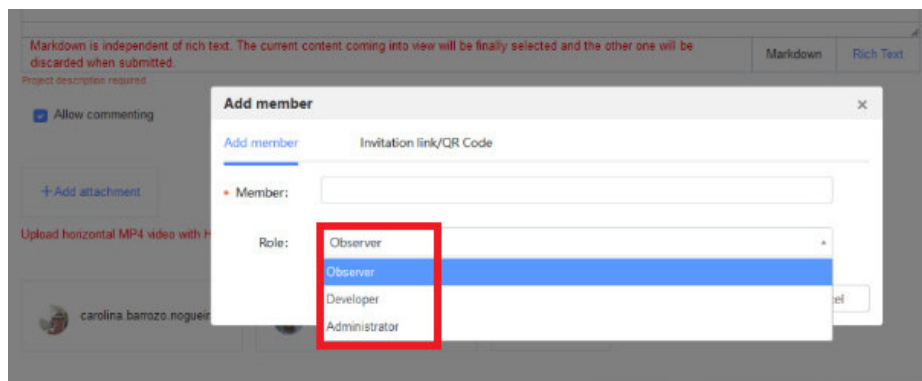
Fonte: EASYEDA

Figura 66 - Compartilhar projeto editar projeto



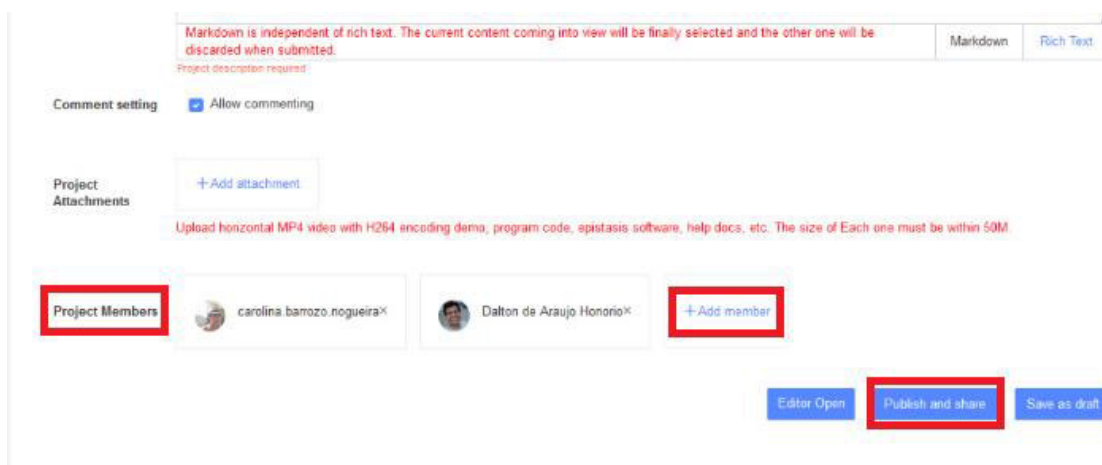
Fonte: *EASYEDA*

Figura 67 - Compartilhar projeto adicionar membros



Fonte: *EASYEDA*

Figura 68 - Compartilhar projeto publicar e compartilhar

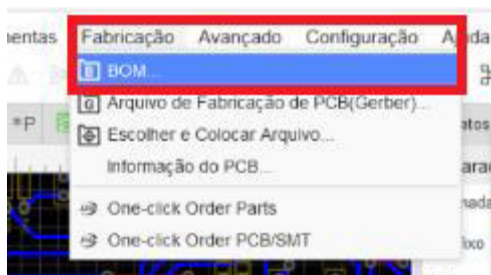


Fonte: *EASYEDA*

O EasyEDA fornece um arquivo BOM (*Bill Of Material*), que informa todos os componentes usados para a prototipagem da placa, para isso, clicamos em Fabricação

>BOM, Figura 69, é gerado um arquivo em *excel* com todas as informações dos componentes, ID, nome, fabricante, quantidade de componentes Figura 70.

Figura 69 - Lista dos componentes para prototipagem da placa



Fonte: EASYEDA

Figura 70 - Arquivo BOM da PCB

ID	Nome	Designador	Pegada	Qu...	Peça do Fabricante	Fabricante	Fornecedor	Peça do Fornecedor	Preço
1	100nF	C1,C9,C13...	CAP-TH_BD5...	5	50YXF10MEFC5X11	Rubycon	LCSC	C88726	0.04
2	1u	C2	CAP-TH_BD5...	1	50YXF10MEFC5X11	Rubycon	LCSC	C88726	0.04
3	100uF/35V	C4,C16,C1...	CAP-TH_BD5...	9	50YXF10MEFC5X11	Rubycon	LCSC	C88726	0.04
4	10uF/35V	C5	CAP-TH_BD5...	1	50YXF10MEFC5X11	Rubycon	LCSC	C88726	0.04
5	6.8nF	C6	CAP-TH_BD5...	1	50YXF10MEFC5X11	Rubycon	LCSC	C88726	0.04
6	100u/35V	C7	RAD-0.1	1					
7	1uF	C8,C19,C1...	CAP-TH_BD5...	4	50YXF10MEFC5X11	Rubycon	LCSC	C88726	0.04
8	47nF/35V	C14	CAP-TH_BD5...	1	50YXF10MEFC5X11	Rubycon	LCSC	C88726	0.04
9	100n	C3,C15,C1...	RAD-0.1	11					
10	10uF	C20,C23,C...	CAP-TH_BD5...	8	50YXF10MEFC5X11	Rubycon	LCSC	C88726	0.04
11	100uF	C25,C54	CAP-TH_BD5...	2	50YXF10MEFC5X11	Rubycon	LCSC	C88726	0.04
12	100p	C12,C17,C...	RAD-0.1	9					
13	47uF	C51	CAP-TH_BD5...	1	50YXF10MEFC5X11	Rubycon	LCSC	C88726	0.04
14	100u	C52	RAD-0.1	1					
15	DIP-Black...	CN1,CN2...	H3-2.54	8	?				

Fonte: EASYEDA

### 3.3 OPERAÇÃO APLICADA AOS CONVERSORES CC-CC COM COMUTAÇÃO DISSIPATIVA DA FAMÍLIA *BUCK*

Na operação dos conversores CC-CC da família *buck* através do sistema de controle mostrado no esquemático, Figura 31, serão mostrados as formas de acionamento de cada conversor mencionado anteriormente.

#### 3.3.1 Conversor CC-CC *Buck* Síncrono Não Isolado

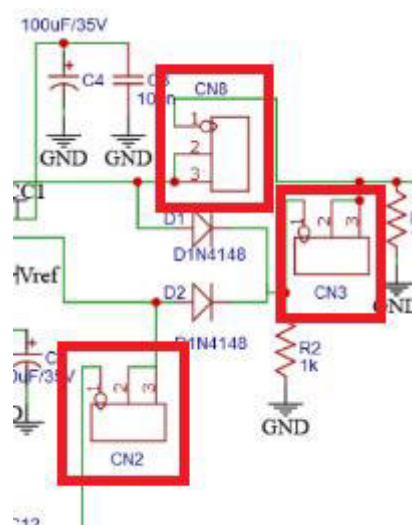
Para o acionamento do conversor *buck*, através do sistema de controle proposto, é necessário conectar alguns jumpers, Figura 71, conecta apenas o *jumper* CN3 e



desconecta os *jumpers* CN2 e CN8, será ligado o primeiro CI IR21844, o gerador de tempo morto, assim como as saídas M1 e M2 do optoacoplador, Figura 72. Como as saídas do optoacoplador são diferentes, M1 está em nível lógico alto e M2 está em nível lógico baixo, as chaves não são acionadas ao mesmo tempo, e não é gerado tempo morto.

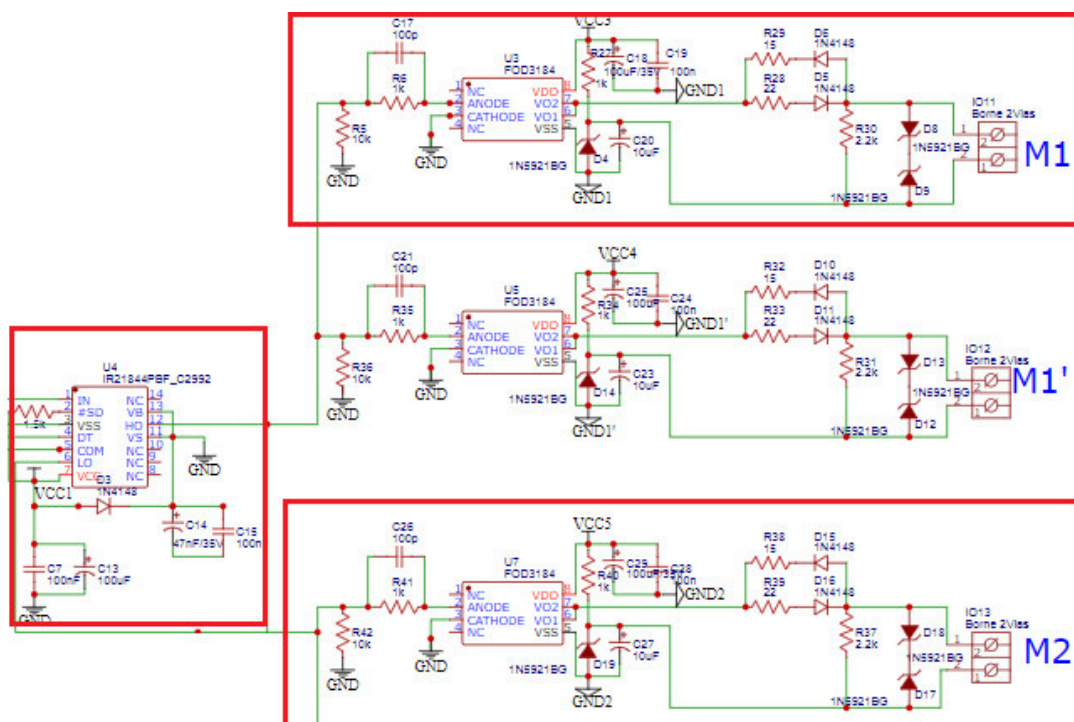
A topologia do conversor *buck*, Figura 73, foi alterada com a substituição do diodo por outra chave, para que o acionamento diferencie do conversor *forward* de uma chave.

Figura 71 - Jumpers para escolha do conversor



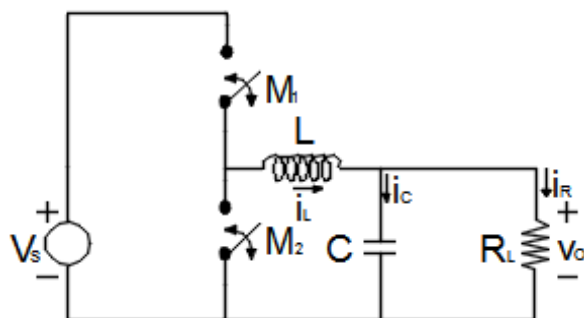
Fonte: Adaptado BASCOPE (2022).

Figura 72 - Chave de acionamento do esquemático do conversor *buck*



Fonte: Adaptado BASCOPE (2022)

Figura 73 - Chave de acionamento do conversor *buck*

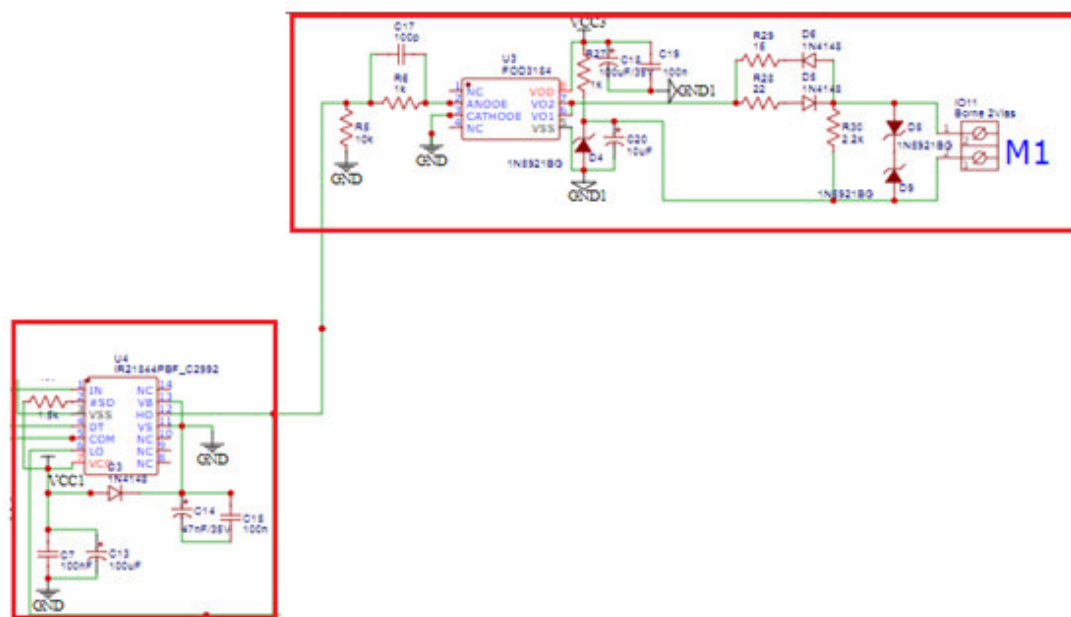


Fonte: Adaptado BASCOPE (2022).

### 3.3.2 Conversor CC-CC *Forward* de Uma Chave

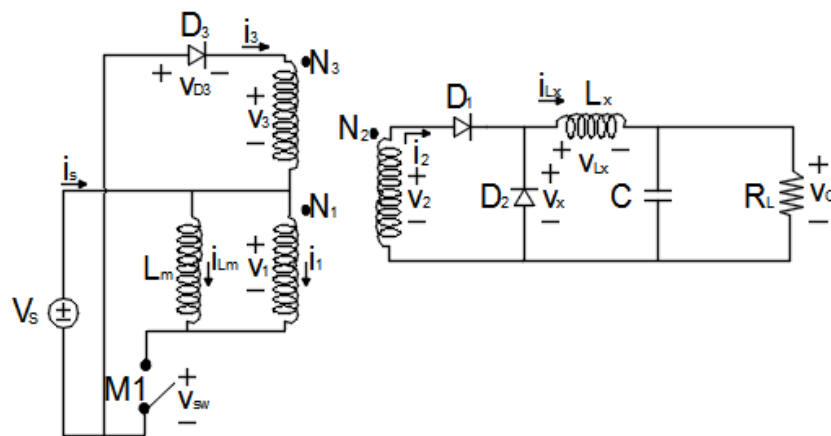
Como o conversor *forward* de uma chave, Figura 75, possui as mesmas características iniciais do conversor *buck*, o *jumper* de acionamento, Figura 71, é o mesmo do *buck*, além da alimentação do primeiro CI IR 21844, Figura 74, e possui apenas uma chave de acionamento M1, nesse circuito não será gerado tempo morto.

Figura 74 - Chave de acionamento do esquemático do conversor *forward* de uma chave



Fonte: Adaptado BASCOPE (2022).

Figura 75 - Chave de acionamento do conversor *forward* uma chave

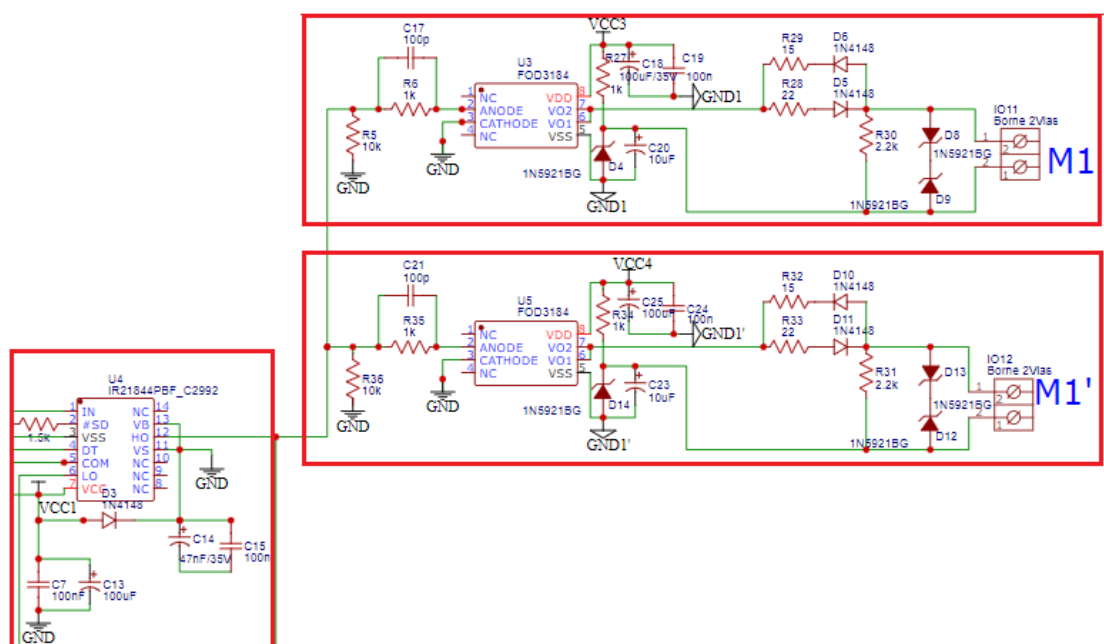


Fonte: Adaptado BASCOPE (2022).

### 3.3.3 Conversor CC-CC *Forward* de Duas Chaves

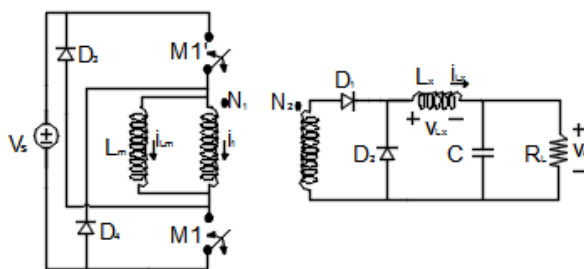
Como o conversor *forward* de duas chaves, Figura 77, possui o mesmo funcionamento inicial do conversor *buck*, mas como o acionamento das chaves M1 e M1' Figura 76, será usado a mesma saída do CI IR 21844, e como isso não pode ocorrer. Será necessário a geração de um tempo morto, para que as chaves não sejam acionadas simultaneamente, caso isso ocorra, pode ocasionar queima do circuito.

Figura 76 - Chave de acionamento do esquemático do conversor *forward* de duas chave



Fonte: Adaptado BASCOPE (2022).

Figura 77 - Chave de acionamento do conversor *forward* duas chaves

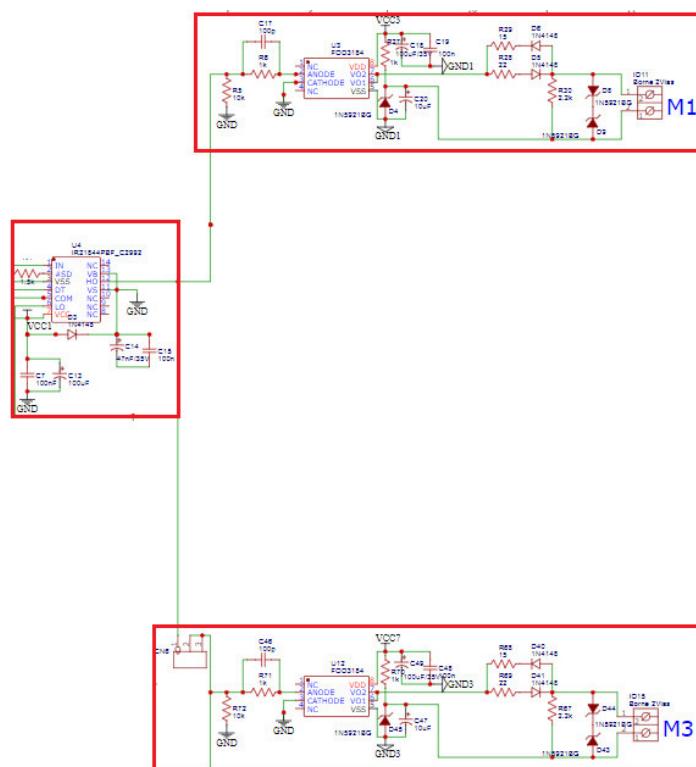


Fonte: Adaptado BASCOPE (2022).

### 3.3.4 Conversor CC-CC *Push-Pull* Alimentado em Tensão

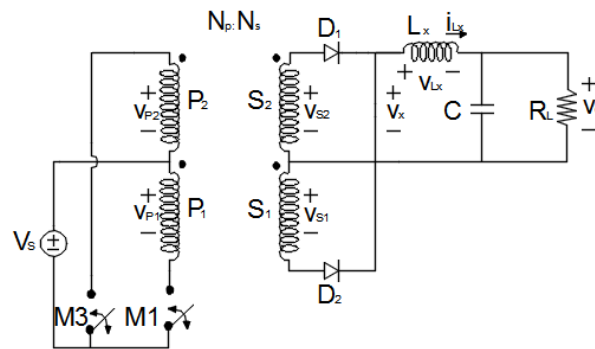
O conversor *push-pull*, Figura 79, a conexão dos jumpers desse conversor é diferente dos conversores anteriormente mencionados, pois no acionamento do *push-pull* serão acionados os dois CIs IR 21844, e para isso, os jumpers CN2 e CN8 estão conectados e o CN3 está desconectado. Serão acionados as chaves M1 e M3, Figura 78, e como estão conectados na mesma saída, pois existe um jumper que conecta os geradores de tempo morto IR 21844, será gerado um tempo morto que não permite o acionamento simultâneo das chaves.

Figura 78 - Chave de acionamento do esquemático do conversor *push-pull*



Fonte: Adaptado BASCOPE (2022).

Figura 79 - Chave de acionamento do conversor *push-pull*

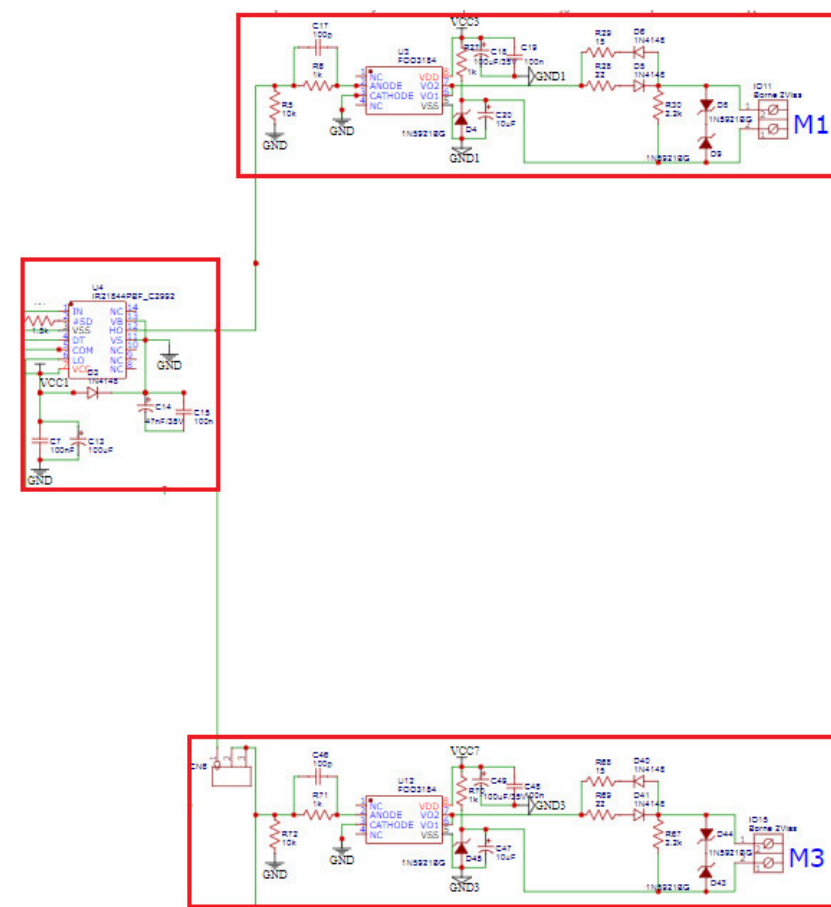


Fonte: Adaptado BASCOPE (2022).

### 3.3.5 Conversor CC-CC Meia Ponte (*Half-Bridge*)

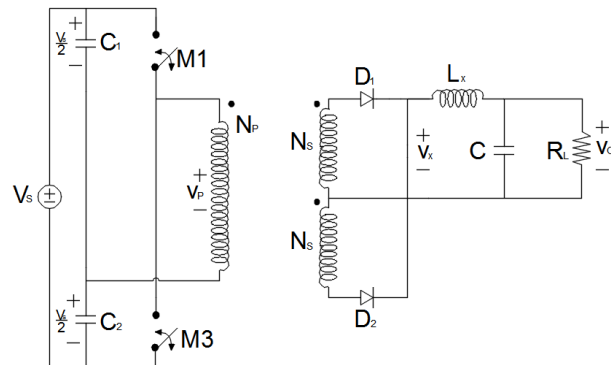
O conversor meia ponte, Figura 81, possui o mesmo princípio de acionamento com o *push-pull*, tanto no acionamento dos jumpers, como dos geradores de tempo morto como dos optoacopladores, Figura 80.

Figura 80 - Chave de acionamento do esquemático do conversor meia ponte



Fonte: Adaptado BASCOPE (2022).

Figura 81 - Chave de acionamento do conversor meia ponte

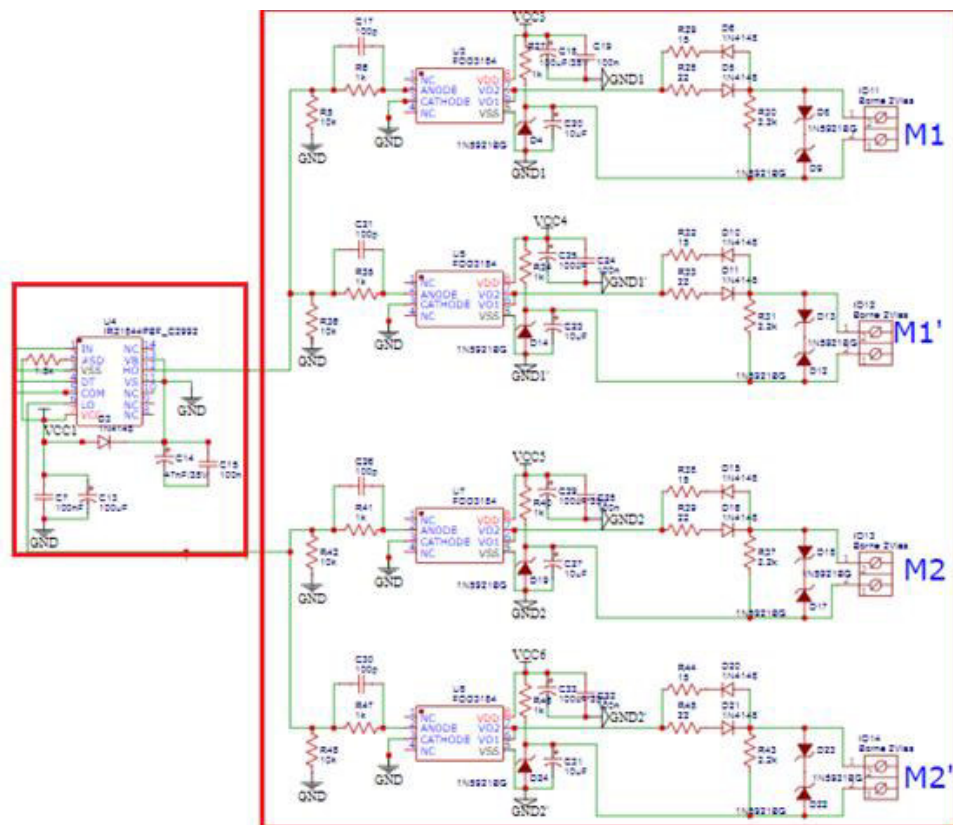


Fonte: Adaptado BASCOPE (2022).

### 3.3.6 Conversor CC-CC Ponte Completa (*Full-Bridge*)

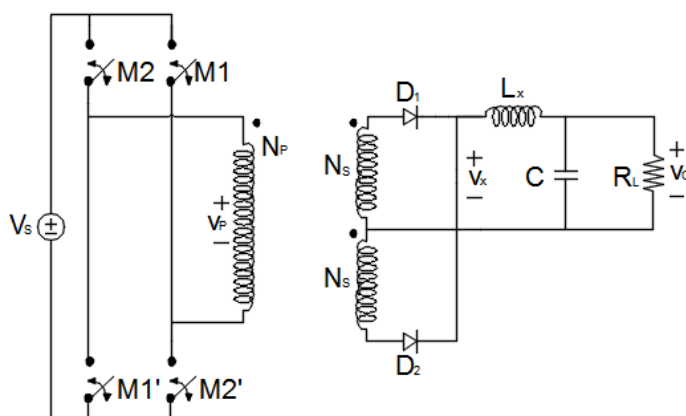
O conversor ponte completa, Figura 83, possui o mesmo funcionamento inicial do conversor *push pull*, para acionamento das chaves M1, M1' como estão conectados no nível lógico alto e M2, M2' estão ligados no nível lógico baixo, como as chaves são acionadas ao mesmo tempo, há a necessidade de gerar tempo morto, Figura 82.

Figura 82 - Chave de acionamento do esquemático do conversor ponte completa



Fonte: Adaptado BASCOPE (2022).

Figura 83 - Chave de acionamento do conversor ponte completa



Fonte: Adaptado BASCOPE (2022).

### 3.4 CONCLUSÃO

Para cada conversor foram realizadas operações de como usar a placa de circuito impresso através do comportamento dos jumpers conectados na saída do modulador PWM, qual driver IR21844 será ligado, se está conectado na mesma saída do optoacoplador, se será necessário a geração de tempo morto, cada conversor tem suas particularidades alguns tem seus princípio de funcionamento como acionamento das chaves iguais, como é o caso do *push-pull* e do meia ponte, o conversor *buck* e o *forward* de uma chave possui o mesmo chaveamento mas para essa situação o diodo do *buck* foi substituído por uma chave. Quando o acionamento das duas chaves, sejam no mesmo conector, seja através do nível lógico alto ou nível lógico baixo é preciso gerar um tempo morto para não ocasionar a queima da fonte de alimentação quando as chaves aos conectores estão conectados em saídas diferentes não há necessidade de gerar tempo morto, enquanto uma saída está no nível lógico alto a outra saída está em nível lógico baixo.

## 4 EXEMPLO DE APLICAÇÃO AO CONVERSOR CC-CC *BUCK* NÃO ISOLADO

Neste capítulo será apresentado um exemplo de projeto de um conversor buck, com as malhas de tensão e a malha de corrente.

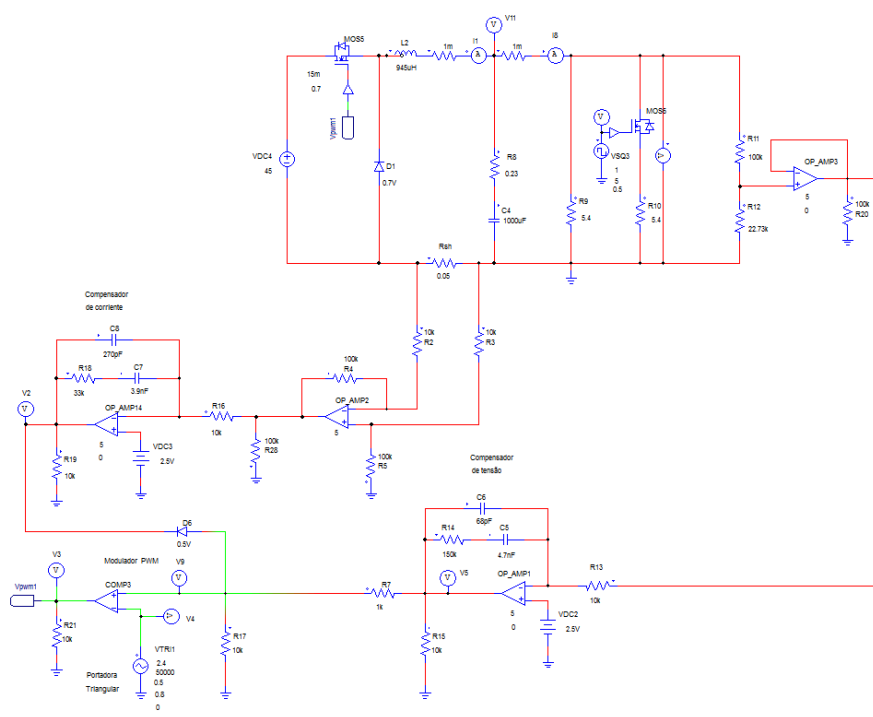
### 4.1 INTRODUÇÃO

Nesse exemplo de aplicação usamos o conversor *buck* por apresentar características abaixadora e ser um dos conversores escolhido para esse projeto, para fazer o controle de uma fonte de alimentação e ajustar a corrente e a tensão de saída através de sinais das malhas de corrente e de tensão. Será apresentado nessa simulação o passo a passo das técnicas de controle em modo tensão com proteção contra sobrecorrente, pois a técnica usa duas malhas de controle uma de tensão e outra de corrente primeiro é apresentado a arquitetura do circuito e depois será mostrado os cálculos abaixo (BASCOPE, 2022)

### 4.2 ARQUITETURA INTEGRADA MOSTRANDO CIRCUITOS DE POTÊNCIA E CONTROLE

Podemos observar na Figura 84, o circuito de alimentação do conversor *buck*, no esquemático temos circuito eletrônico e em seguida o sistema de controle.

Figura 84 - Circuito da fonte de alimentação conversor *buck*



Fonte: BACOPÉ (2022)



### 4.2.1 Especificações do Conversor *Buck*

Na tabela 7, temos as especificações de projeto do conversor *buck*, onde são dados os valores iniciais, na entrada do circuito e na saída.

#### Projeto do conversor *buck*

Tabela 7 - Especificações do conversor *buck*

<b>Entrada</b>	
Tensão de entrada máxima	$V_{\text{imax\_cc}} = 45 \text{ V}$
Tensão de entrada mínima	$V_{\text{imin\_cc}} = 25 \text{ V}$
<b>Saída</b>	
Tensão de saída máxima	$V_o = 13,5 \text{ V}$
Corrente de saída máxima	$I_o = 5 \text{ A}$

Fonte: BASCOPE (2022).

### 4.2.2 Considerações do Projeto

Para as considerações iniciais do projeto são levados em consideração: a ondulação da corrente, ondulação de tensão no capacitor, frequência de chaveamento e a razão cíclica, Tabela 8.

Tabela 8 - Considerações do conversor *buck*

<b>Considerações</b>	
Ondulação da corrente	$\Delta I_{Lo} = 0,5 \text{ A}$
Ondulação de tensão no capacitor filtro de saída	$\Delta V_c = 0,2 \text{ A}$
Frequência de chaveamento	$f_s = 20000 \text{ Hz}$
Razão cíclica máxima	$D_{\text{max}} = 0,8$

Fonte: BASCOPE (2022).

### 4.2.3 Razão Cíclica Mínima

Para encontrar a razão cíclica operando em modo contínuo, a tensão de entrada mínima é encontrada através da razão cíclica máxima e a tensão de entrada máxima é encontrada através da razão cíclica mínima.

O ganho estático do conversor *buck* é dada por:

$$\frac{V_o}{V_{\text{imin\_cc}}} = D_{\text{max}} \quad (4.1)$$

A razão cíclica mínima é dada através da equação abaixo:

$$D_{\text{min}} = \frac{V_o}{V_{\text{imax\_cc}}} = \frac{13,5}{45} = 0,3 \quad (4.2)$$

#### 4.2.4 Indutor Filtro de Saída $L_o$

Para encontrar a indutância do filtro de saída, usa-se a expressão apresentada por (HART,2012).

$$L_o = \frac{V_{\text{imax\_cc}} \cdot D_{\text{min}} \cdot (1 - D_{\text{min}})}{f_s \cdot \Delta I_{L_o}} = \frac{45 \cdot 0,3 \cdot (1 - 0,3)}{20000 \cdot 0,5} = 9,45 \times 10^{-4} \text{ H} \quad (4.3)$$

#### 4.2.5 Capacitor Filtro de Saída $C_o$

A capacitância do filtro de saída é dado a partir da equação (RASHID,1999):

$$R_{se} = \frac{\Delta V_c}{\Delta I_{l_o}} = \frac{0,2}{0,5} = 0,4 \Omega \quad (4.4)$$

Como o capacitor eletrolítico não possui o valor comercial de 15,63uF e a resistência em série equivalente é menor que 0,4  $\Omega$ , foram considerados capacitor e resistor comercial da fabricante EPCOS, da série B4 1821 de 35 V que apresentam os seguintes valores.

$$C_o = 1000 \times 10^{-6} \text{ F}$$

$$R_{se} = 0,23 \Omega$$

#### 4.2.6 Resistor de Carga Equivalente para Potência Máxima

O valor da resistência é dada através da seguinte equação,

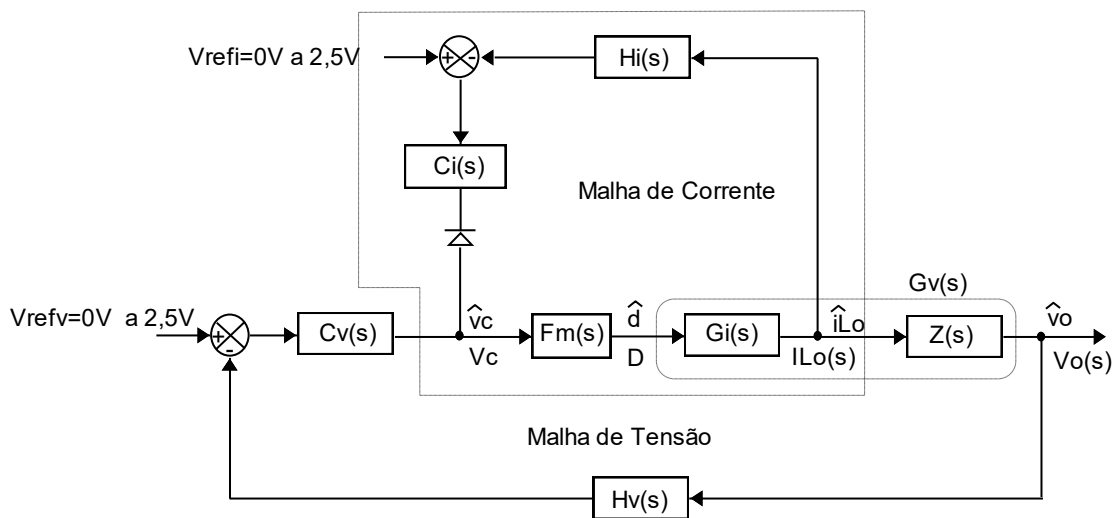
$$R_o = \frac{V_o}{I_o} = \frac{13,5}{5} = 2,7 \quad (4.5)$$

No esquemático, a resistência da carga é representada por dois resistores em paralelo no valor de 5,5 $\Omega$ .

### Projeto de Controle

O projeto de controle, apresentado pelo diagrama de blocos, Figura 85, possui duas malhas uma de tensão e uma de corrente. Pelo diagrama, a lógica usada no circuito, foi do tipo “OU”, o que permite apenas que uma malha funcione, ou a malha de corrente será acionada sem carga até que a corrente nominal de saída dependa do sinal de referência ou que malha de tensão funcione de maneira similar à malha de corrente. (BASCOPE, 2022).

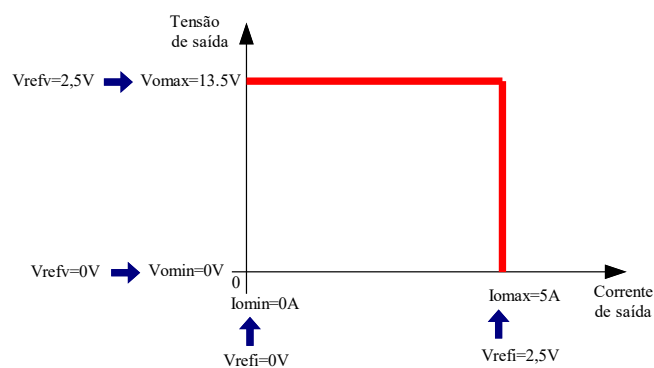
Figura 85 - Diagrama de blocos do controle



Fonte: BASCOPE (2022).

A forma de onda na Figura 86 apresenta a tensão de saída máxima pela corrente máxima, quando a tensão de referência está em 2,5V.

Figura 86 - Forma de onda tensão x corrente



Fonte: Adaptado de BASCOPE (2022).

#### 4.2.7 Projeto da Malha de Tensão

Para o projeto, os valores a serem considerados podem ser observados na Tabela 9.

Tabela 9 - Considerações da malha de tensão

<b>Dados do projeto</b>	
Amplitude do dente de serra CI UC3525A	VD = 2,4V
Tensão de referência	Vrefv = 2,5V

Fonte: BASCOPE (2022).

A função de transferência para medição da tensão é a relação entre a tensão de referência e a tensão de saída, e é dada pela seguinte equação:

$$Hv(s) = \frac{V_{refv}}{V_o} = \frac{2,5}{13,5} = 0,185 \quad (4.6)$$

A partir da amplitude do dente de serra da onda portadora é VD=2,4V, podemos calcular a função de transferência para o comparador PWM que é dado por:

$$Fm(s) = \frac{1}{VD} = \frac{1}{2,4} = 0,417 \quad (4.7)$$

Depois de calcular as funções de transferência, que serão usadas na função de transferência do laço aberto sem compensador, iniciamos o passo a passo do sistema de controle.

A função de transferência da planta que relaciona a tensão de saída com a razão cíclica ( $Gv(s) = \frac{vo}{d}$ ) é equivalente a:

$$Gv(s) = \frac{s \cdot j \cdot Co \cdot Rse + 1}{(s \cdot j)^2 \cdot Lo \cdot Co \cdot \left(\frac{Rse}{Ro} + 1\right) + s \cdot j \cdot \left(\frac{Lo}{Ro} + Co \cdot Rse\right) + 1} \quad (4.8)$$

$$fo = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{Lo \cdot Co}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{9,45 \times 10^{-4} \cdot 1000 \times 10^{-6}}} = 163,721 \text{Hz} \quad (4.9)$$

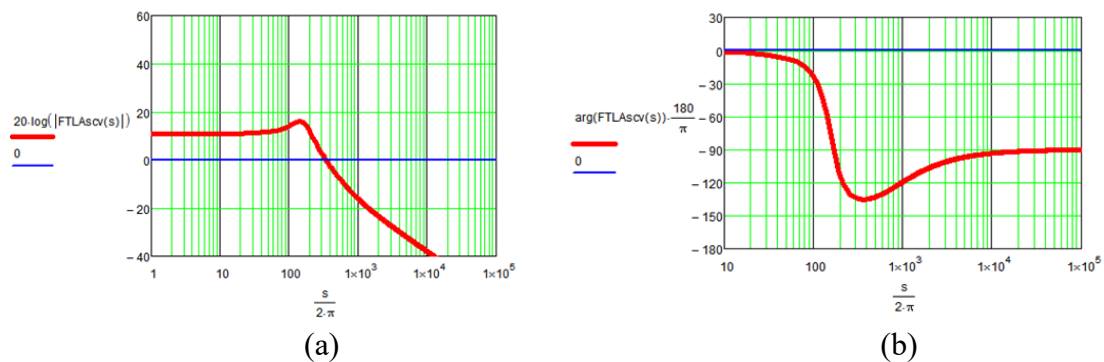
$$fz = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot Co \cdot Rse} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1000 \times 10^{-6} \cdot 0,23} = 691,978 \text{Hz} \quad (4.10)$$

A função de transferência de laço aberto sem compensador tem a seguinte expressão

$$FTLAsc(s) = Gv(s) \cdot Fm(s) \cdot Hv(s) \quad (4.11)$$

Assim do diagrama de bode de Gv(s) na Figura 87, apresenta (a) ganho (b) fase:

Figura 87 - Diagrama de bode Gv(s) (a) ganho (b) fase



Fonte: Adaptado de BASCOPE (2022).

Através da frequência de chaveamento adotada  $f_s = 20000$  Hz calculamos a frequência de cruzamento que é dada pela equação abaixo:

$$f_{cv} = \frac{f_s}{10} = \frac{20000}{10} = 2 \times 10^3 \text{ Hz} \quad (4.12)$$

Através do diagrama de Bode da Figura 84, e a frequência de cruzamento adotada, para o sistema que apresenta uma atenuação de  $-23.58$  dB, o compensador deve ser capaz de proporcionar um ganho ( $23.58$  dB) que permite o cruzamento pela frequência escolhida. Também para a frequência de cruzamento, a fase é de aproximadamente  $-106,54$  graus:

$$P = -106,54^\circ$$

A partir do diagrama de Bode da função de transferência em malha aberta sem compensador, dado na Figura 84 a margem de fase,  $MF = 60^\circ$ .

Para determinar o ganho do compensador de acordo com o ganho de transferência de laço aberto da malha de tensão usa-se o valor da atenuação que foi encontrado no diagrama de bode.

$$AV = 23,58 \text{ dB}$$

A partir dos valores encontrados através do diagrama de bode calcula-se o avanço de fase como mostrado em XX.

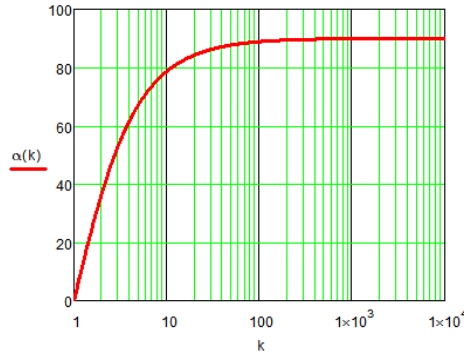
$$\alpha = MF - P - 90 = 60^\circ - (-106,54^\circ) - 90^\circ = 76,54^\circ \quad (4.13)$$

Como o avanço de fase é menor que  $90^\circ$  é escolhido o compensador do tipo 2 pois apresenta parâmetros adequados para o uso.

A partir das curvas do diagrama de bode Figura 88 determinamos o fator K onde  $\alpha = f(K)$ .

$$\alpha(K) = (2 \cdot \text{atan}(k) - \frac{\pi}{2}) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (4.14)$$

Figura 88 - Curvas de avanço de fase do fator K



Fonte: Adaptado de BASCOPE (2022)

A partir da análise da curva do gráfico que correspondente ao compensador tipo 2 para um avanço de fase de  $\alpha = 76,54^\circ$ , o fator K é igual a:

$$K = 8,5$$

Com a descoberta do fator K podemos calcular a alocação dos zeros e dos polos do compensador, através das equações abaixo:

$$f_{z1} = \frac{f_{cv}}{K} = \frac{2 \times 10^3}{8,5} = 235,294 \text{ Hz} \quad (4.15)$$

$$f_{p1} = (f_{cv} \cdot K) = 1,7 \times 10^4 \text{ Hz} \quad (4.16)$$

Para calcular o ganho do compensador em termos do valor absoluto usamos o ganho de transferência de laço aberto da malha de tensão que é dado por:

$$G = 10^{\frac{|AV|}{20}} = 15,101 \quad (4.17)$$

Para calcular os componentes do compensador é necessário fazer considerações para o valor da resistência e a partir disso calcular os componentes do compensador, segue as equações:

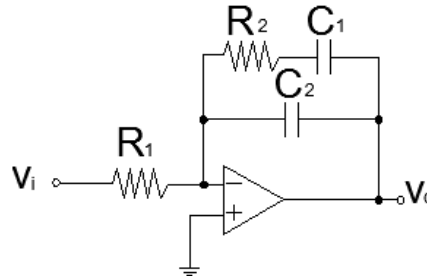
Adotando  $R_1 = 1000 \ \Omega$ ,

$$C_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{cv} \cdot G \cdot K \cdot R_1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 2 \times 10^3 \cdot 15,101 \cdot 8,5 \cdot 1000} = 6,2 \times 10^{-11} \text{ F} \quad (4.18)$$

$$C_1 = C_2 \cdot (K^2 - 1) = 6,2 \times 10^{-11} \cdot (8,5^2 - 1) = 4,417 \times 10^{-9} \text{ F} \quad (4.19)$$

$$R_2 = \frac{K}{2 \cdot \pi \cdot f_{cv} \cdot C_1} = \frac{8,5}{2 \cdot \pi \cdot 2 \times 10^3 \cdot 4,417 \times 10^{-9}} = 1,531 \times 10^5 \Omega \quad (4.20)$$

Figura 89 - Compensador tipo 2

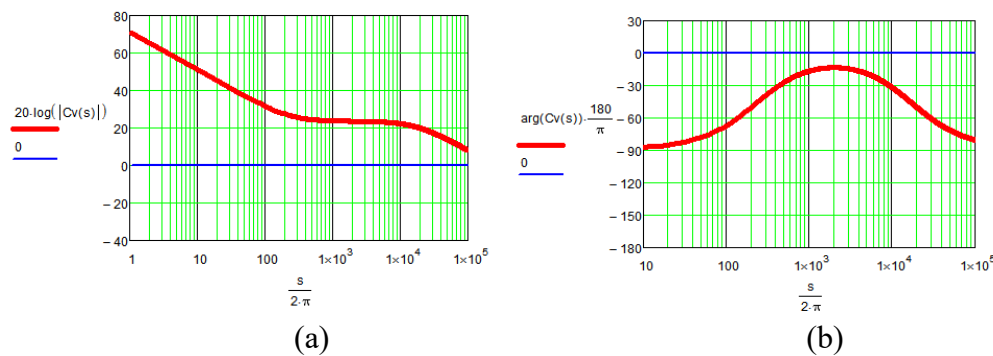


Fonte: Próprio da autora

A função de transferência do compensador Tipo 2 é expressa abaixo,

$$C_v(s) = \frac{1 + sC_1R_2}{sR_1(C_1 + C_2 + sR_2C_1C_2)} \quad (4.21)$$

Com isso temos o diagrama de bode do compensador  $C_v(s)$ , Figura 90.

Figura 90 - Diagrama de bode do compensador  $C_v$  (a) ganho (b) fase

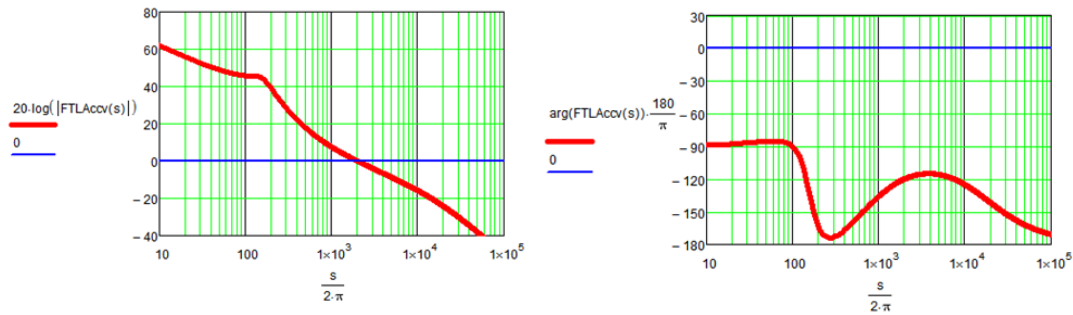
Fonte: Adaptado de BASCOPE (2022)

Adicionando o compensador a função de transferência em malha aberta sem compensador do sistema, dada em (4.11), obtém-se a função de transferência de laço aberto com compensador  $FTL_{accv}(s)$ :

$$FTL_{accv}(s) = FTL_{scv}(s) \cdot C_v(s) \quad (4.22)$$

Assim, o diagrama de Bode para o sistema compensado fica como mostrado na Figura 91.

Figura 91 -Diagrama de Bode de FTLAccv: (a) ganho e (b) fase



Fonte: Adaptado de BASCOPE (2022)

$$\text{Margem\_fase} = \left| -180 - \frac{180}{\pi} \cdot \arg(FTLAccv(2 \cdot \pi \cdot f_{cv})) \right| = 60,088 \quad (4.23)$$

Dessa forma, resultando em uma margem de fase MF = 60,088 e uma margem de ganho MG = infinito.

#### 4.2.8 Projeto da Malha de Corrente

Para a malha de corrente são considerados a tensão de referência da malha de corrente, a resistência do sensor resistivo e o ganho do amplificador diferencial, Tabela 10.

Tabela 10 - Considerações da malha de corrente

Considerações	
Tensão de referência da malha de corrente	Vrefi = 2,5V
Resistência do sensor resistivo	Rsh = 0,05
Ganho do amplificador diferencial	Kdif = 10

Fonte: BASCOPE, 2022

A função de transferência, do elemento de medição de corrente é dado a partir da resistência do sensor resistivo e do ganho do amplificador diferencial, como mostra a equação:

$$H_i(s) = Rsh \cdot Kdif \quad (4.24)$$

A função de transferência da planta que relaciona a corrente no indutor com a razão cíclica ( $G_i(s) = iL/d$ ) é igual a equação:

$$G_i(s) = \frac{V_{imax\_cc}}{R_o} \cdot \frac{s \cdot j \cdot C_o \cdot (R_o + R_{se}) + 1}{(s \cdot j)^2 \cdot L_o \cdot C_o \cdot \left( \frac{R_{se}}{R_o} + 1 \right) + s \cdot j \cdot \left( \frac{L_o}{R_o} + C_o \cdot R_{se} \right) + 1} \quad (4.25)$$



$$f_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_o \cdot C_o}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{(9,45 \times 10^{-4}) \cdot (1000 \times 10^{-6})}} = 163,721 \text{ Hz} \quad (4.26)$$

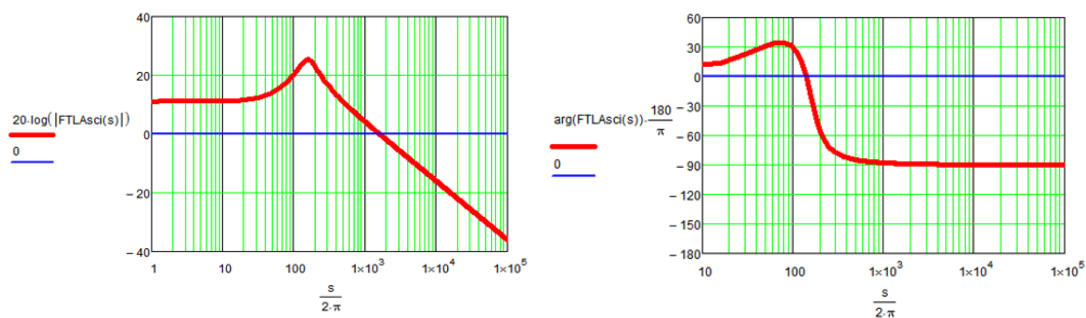
$$f_z = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C_o \cdot R_{se}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1000 \times 10^{-6} \cdot 0,23} = 691,978 \text{ Hz} \quad (4.27)$$

A função de transferência de laço aberto sem compensador está relacionada com a função de transferência da planta, do elemento de medição de corrente e do comparador PWM que tem a seguinte expressão:

$$FTL_{Asci}(s) = G_i(s) \cdot F_m(s) \cdot H_i(s) \quad (4.28)$$

Com isso obtemos o diagrama de bode  $FTL_{Asci}(s)$ , Figura 92:

Figura 92 - Diagrama de bode com (a) ganho (b) fase



Fonte: Adaptado de BASCOPE (2022)

A frequência de cruzamento para a malha de corrente tem que apresentar um valor maior que a frequência de cruzamento da malha de tensão, como podemos mostrar na equação

$$f_{ci} = \frac{f_s}{4} = \frac{20000}{4} = 5 \times 10^3 \text{ Hz} \quad (4.29)$$

O diagrama de Bode, para esta frequência de cruzamento encontrada através da equação (4.30) apresenta uma atenuação de -10.1dB, assim o compensador deve proporcionar um ganho de 10.1dB. Também para esta frequência o ângulo de fase é de 89,6 graus,

A partir do diagrama de Bode da função de transferência em malha aberta sem compensador, dado na Figura 89, tem-se a margem de fase que é de  $MF = 60$ .

Para determinar o ganho do compensador de acordo com o ganho de transferência de laço aberto da malha de tensão usa-se o valor da atenuação que foi encontrado no diagrama de bode.

$$AV = 10,1\text{dB}$$

Para calcular o avanço de fase usa-se a Equação (4.13)

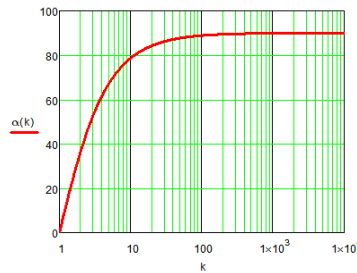
$$\alpha = 59,6^\circ$$

Como o avanço de fase possui um ângulo menor que  $90^\circ$  o compensador usado será o do tipo 2.

A partir da Equação (4.30) podemos plotar o gráfico para determinar o fator K

$$\alpha(k) = \left(2 \cdot \text{atan}(k) - \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (4.30)$$

Figura 93 - Curvas de avanço de fase em função do fator K



Fonte: Adaptado de BASCOPE (2022)

A partir da curva  $\alpha=f(K)$  verifica-se que para o avanço de fase de  $59,6^\circ$  se refere ao valor do fator que é aproximadamente  $K = 3,7$ .

Para alocar os zeros e os polos da malha de corrente usamos as seguintes equações,

$$f_{z1} = \frac{f_{ci}}{K} = \frac{5 \times 10^3}{3,7} = 1,351\text{Hz} \quad (4.31)$$

$$f_{p1} = (f_{ci} \cdot K) = 1,85 \times 10^4\text{Hz} \quad (4.32)$$

O ganho do compensador em termos do valor absoluto é dado por:

$$G = 10^{\frac{|AV|}{20}} = 3,199 \quad (4.33)$$

Para calcular os componentes do compensador é necessário fazer considerações para o valor da resistência e a partir disso calcular os componentes do compensador segue as equações,

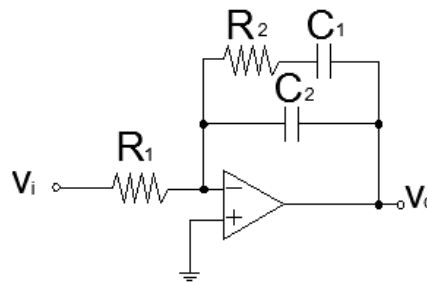
Adotando  $R_1 = 1000\Omega$ ,

$$C_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{ci} \cdot G \cdot K \cdot R_1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 5 \times 10^3 \cdot 15,101 \cdot 8,5 \cdot 1000} = 2,689 \times 10^{-10} \text{F} \quad (4.34)$$

$$C_1 = C_2 \cdot (K^2 - 1) = 6,2 \times 10^{-11} \cdot (8,5^2 - 1) = 3,413 \times 10^{-9} \text{F} \quad (4.35)$$

$$R_2 = \frac{K}{2 \cdot \pi \cdot f_{ci} \cdot C_1} = \frac{8,5}{2 \cdot \pi \cdot 5 \times 10^3 \cdot 4,417 \times 10^{-9}} = 3,45 \cdot 10^4 \Omega \quad (4.36)$$

Figura 94 - Compensador tipo 2



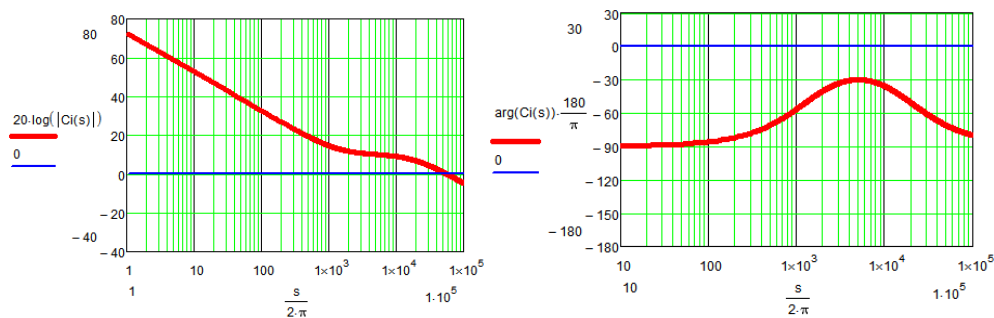
Fonte: Próprio da autora.

A função de transferência do compensador Tipo 2 é expressa na Equação,

$$C_i(s) = \frac{1 + s \cdot j \cdot C_1 \cdot R_2}{R_1 \cdot s \cdot j \cdot (C_1 + C_2 + s \cdot j \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2)} \quad (4.37)$$

Com isso temos o diagrama de bode do compensador  $C_v(s)$ , Figura 95.

Figura 95 - Diagrama de bode do compensador  $C_v$  (a) ganho (b) fase



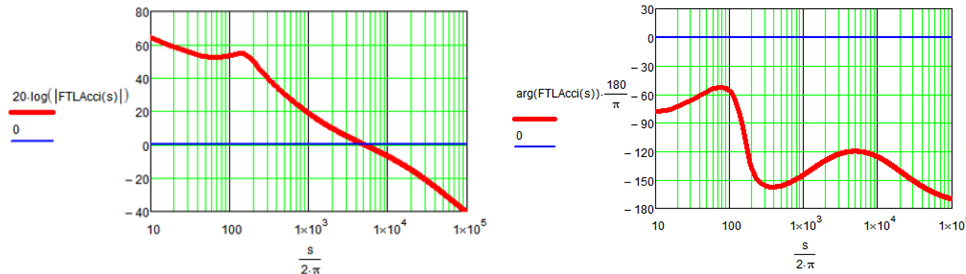
Fonte: Adaptado de BASCOPE (2022)

Adicionando o compensador a função de transferência em malha aberta do sistema, dada em (4.11), obtém-se a função de transferência de laço aberto com compensador  $FTL_{Acci}(s)$ :

$$FTL_{Acci}(s) = FTL_{Sci}(s) \cdot C_i(s) \quad (4.38)$$

Assim, o diagrama de Bode para o sistema compensado fica como mostrado na Figura 96.

Figura 96 -Diagrama de Bode de FTLAccv: (a) ganho e (b) fase.



Fonte: Adaptado de BASCOPE (2022)

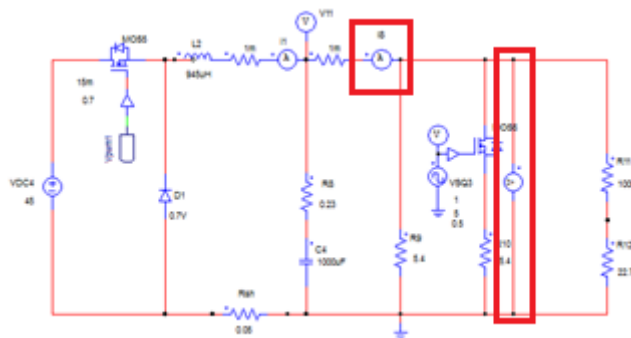
$$\text{Margem\_fase} = \left| -180 - \frac{180}{\pi} \cdot \arg(\text{FTLAcci}(2 \cdot \pi \cdot f_{ci})) \right| = 60,162 \quad (4.39)$$

Dessa forma, resultando em uma margem de fase MF = 60,162 e uma margem de ganho MG = infinito

### 4.3 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO COM POTÊNCIA DE SAÍDA MENOR QUE A NOMINAL

Para a simulação com potência de saída menor que a nominal a resistência tem que ser maior que o valor apresentado nos cálculos da resistência de saída, foram colocados um voltímetro e um amperímetro, Figura 97 na saída do circuito eletrônico para as visualizar as formas de onda, Figura 98 e 99.

Figura 97 - Medição da tensão e da corrente na saída do circuito eletrônico



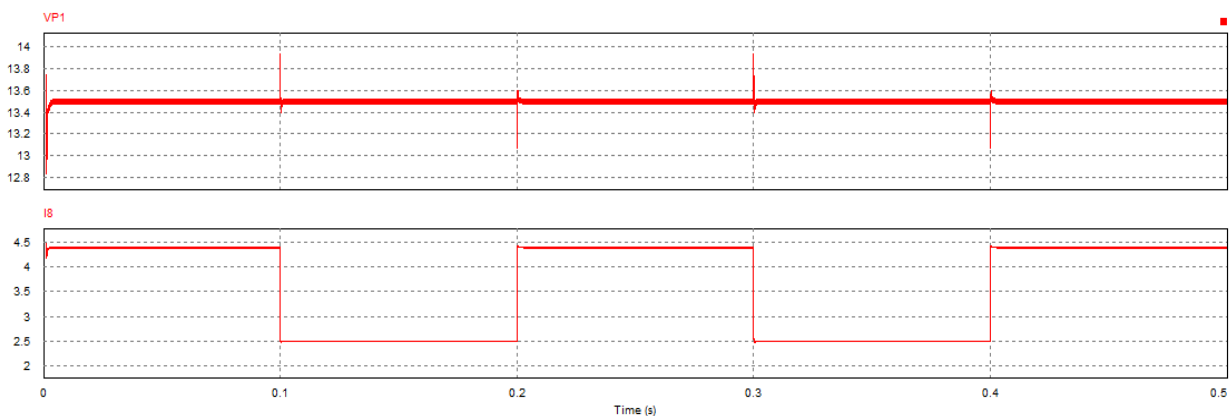
Fonte: BACOPÉ (2022)

#### 4.3.1 Em Regime Permanente

No regime permanente, Figura 98, a tensão medida na saída Vp1, possui um pequeno transitório inicial e alguns picos de tensão, quando ocorre o chaveamento, esses

picos de tensão variam entre 14 V e 13 V e a tensão em regime permanente é de 13,5V que é a tensão de saída máxima. A corrente de saída medida I8, quando a chave é fechada a corrente mede 4,38 A, valor próximo à corrente máxima, quando a chave é aberta a corrente mede 2,5 A valor da corrente de referência. Podemos verificar, através dessa análise que na tensão da carga há pequenas variações, no regime permanente possui uma estabilidade maior, como pode ser observado nas formas de onda apresentadas.

Figura 98 - Formas de onda da tensão e corrente no regime permanente potência de saída menor

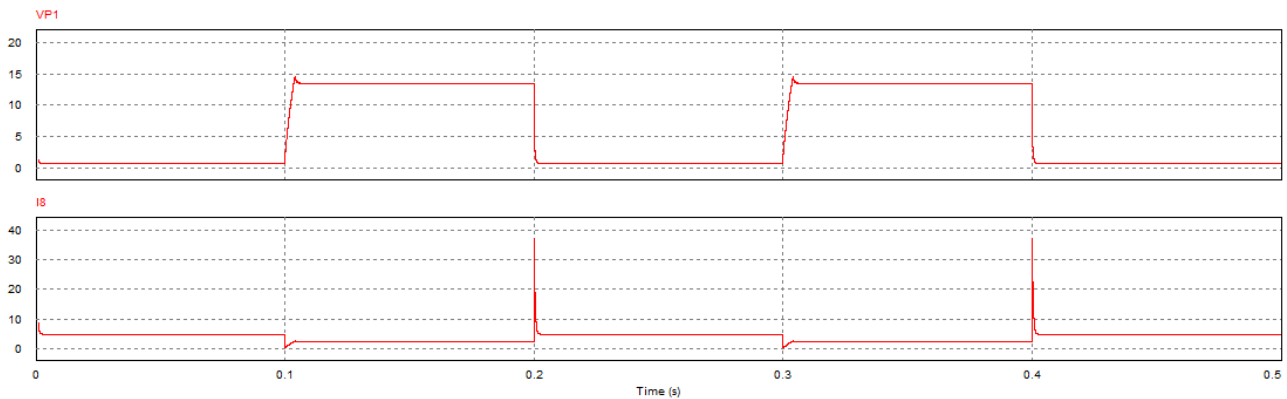


Fonte: Própria da autora PSIM.

#### 4.3.2 Em Regime Dinâmico

Para o regime dinâmico, uma carga resistiva é colocada em curto circuito para ocasionar perturbação no sistema, quando a chave é fechada a tensão se estabiliza em aproximadamente 1V, quando a chave é aberta a tensão é de 13,5V que é a tensão máxima. A corrente medida no regime dinâmico, mede 2,5 A, valor da corrente de referência, quando a chave é fechada ocorre um pico de corrente de aproximadamente 38 A o que caracteriza um sistema lento, essa corrente cai bruscamente em milésimos de segundo para alcançar o valor de 4,38 A, valor próximo da corrente máxima. Mesmo com a perturbação a tensão com a chave aberta se estabiliza em 13,5V que é a tensão de projeto, a corrente no regime dinâmico sofre alterações bruscas nesse regime como mostra a Figura 99.

Figura 99 - Formas de onda da tensão e corrente no regime dinâmico potência de saída menor



Fonte: Própria da autora PSIM.

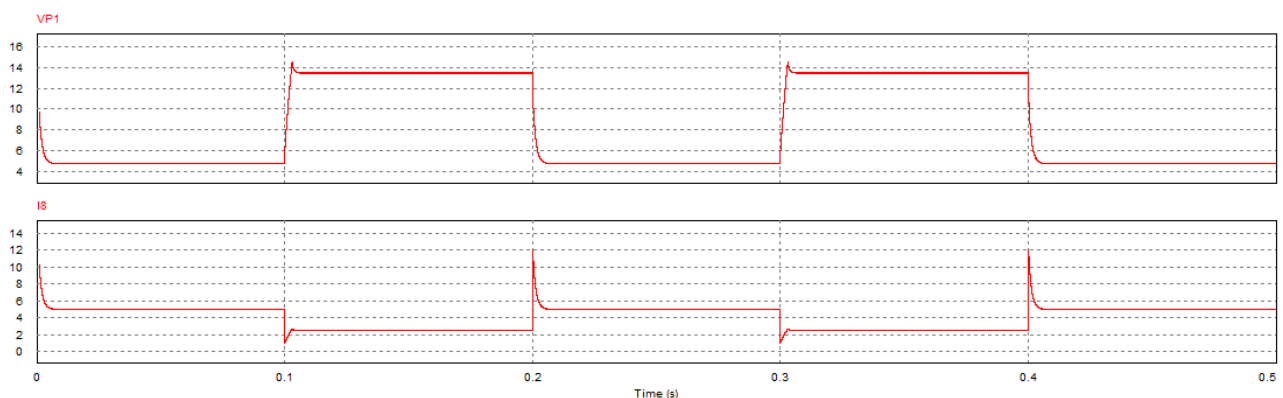
#### 4.4 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO COM POTÊNCIA DE SAÍDA MAIOR QUE A NOMINAL

Para a simulação com potência de saída maior que a nominal, a resistência tem que ser menor que o valor apresentado nos cálculos da resistência de saída, foram colocados um voltímetro e um amperímetro, Figura 97 na saída do circuito eletrônico para as visualizar as formas de onda, Figura 100 e 101.

##### 4.4.1 Em Regime Permanente

Quando a chave é fechada a tensão medida  $V_{p1}$  é de 4,73V e a corrente  $I_8$  é limitada em 4,99 A que é a corrente máxima. Quando a chave é aberta a tensão atinge a nominal e a corrente é 2,5 A corrente de referência. Os picos de corrente no regime permanente é menor que no regime dinâmico e a corrente sempre fica limitada a 4,99 A. Figura 100.

Figura 100 - Formas de onda da tensão e corrente no regime permanente potência de saída maior

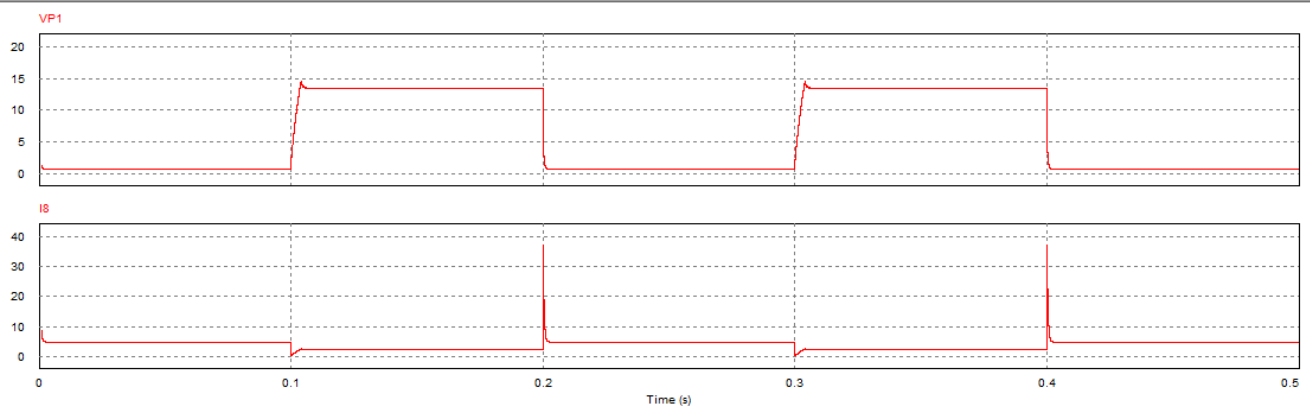


Fonte: Própria autora PSIM

#### 4.4.2 Em Regime Dinâmico

Para o regime dinâmico, a carga resistiva é colocada em curto circuito, para ocasionar perturbação no sistema, quando a chave é fechada a tensão se estabiliza em aproximadamente 1V, quando a chave é aberta a tensão é de 13,5V. A corrente no regime dinâmico em 0,1s quando a chave é aberta a corrente vai de 0 A para 2,5 A quando a chave é fechada ocorre um pico de corrente de aproximadamente 38 A essa corrente cai bruscamente em milésimos de segundo para alcançar o valor de 4,38 A, mesmo trocando o valor do resistor a tensão e a corrente ficam limitadas as Figuras 99 e Figuras 101 são iguais.

Figura 101 - Formas de onda da tensão e corrente no regime dinâmico potência de saída maior



Fonte: Própria da autora PSIM.

#### 4.5 ALGUNS DADOS EXPERIMENTAIS

Para os dados experimentais será mostrado os materiais usados para a fabricação da placa PCB, assim como o desenvolvimento da placa na plataforma EasyEDA.

##### 4.5.1 Material para prototipagem da placa

Para a prototipagem da placa foram usados os seguintes materiais, Tabela 11.

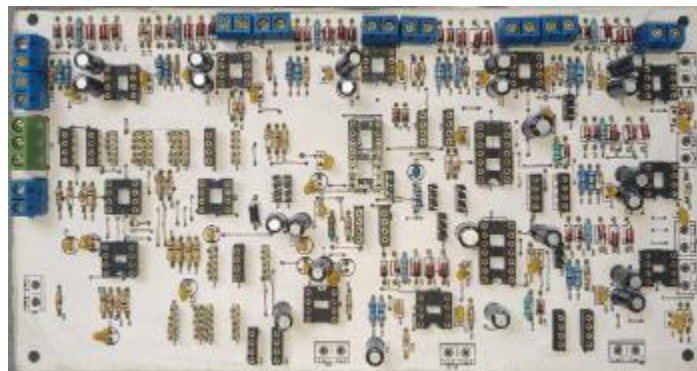
Tabela 11 - Materiais para montagem da placa

Placa de fenolite
Fresa
Capacitores eletrolíticos, cerâmico e tântalo
Resistores

Amplificadores Operacionais LM741
<i>Headers</i> macho e fêmea
Conectores KRE 3 vias, 2 vias
Diodos
CI UC 3525 A
CI IR21844
CI FOD3184
Soquetes para CI

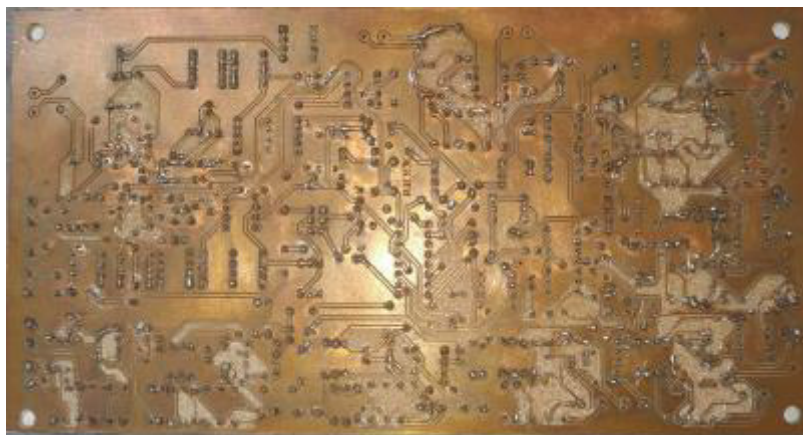
Fonte: Próprio da autora

Figura 102 – Projeto da placa de circuito



Fonte: Próprio da autora.

Figura 103 - Placa desenhada na fresa de acordo com o projeto



Fonte: Próprio da autora.

O projeto da placa de circuito de controle, foi estruturado em uma placa de fenolite, onde foi usado uma fresa para fazer o desenho das trilhas e os furos dos componentes, os componentes foram soldados, e como a placa possui alguns circuitos isolados foi feito uma raspagem na placa Figura 99. A raspagem da placa foi necessária,



pois os optoacopladores possuem circuitos isolados, Figura 103, para que não ocorra curto na placa foi necessário.

Para o desenvolvimento desse projeto foi usado a plataforma EasyEDA, todo o processo de esquemático e PCB. Além disso, o projeto inicial era uma placa de 100mm x 100mm, como a placa possui vários componentes, mesmo com vários ajustes ficou impossível esse tamanho, no final a placa possui o tamanho de 208,53mm x 108,71mm. A placa foi montada com todos os materiais Tabela 11, foram feitos alguns testes de continuidade das trilhas e de curto circuito, para que quando a placa for alimentada, não apresente problemas de curto circuito.

#### **4.6 CONCLUSÃO**

Nesse capítulo tivemos o projeto de controle do conversor *buck* onde foi feita considerações iniciais dos valores das variáveis de tensão de saída e de corrente de saída, foi calculado o indutor e o capacitor para filtrar o sistema, e desenvolvido as malhas de tensão e corrente, foi construído o diagrama de bode para encontrar a atenuação, o ângulo de defasagem, a margem de fase para fazer uma análise do circuito, no simulador PSIM foi realizada a simulação do projeto do conversor *buck* com cargas com potência de saída menor que a nominal e maior que a nominal nessa análise percebe-se que tanto a tensão varia entre 0 à 13,5V como a corrente varia entre 0 à 5 A, a corrente oscila entre 2,5 A corrente de referência à 5 A que é a corrente máxima. No regime dinâmico os valores mostrados nas simulações, as formas de onda, apresentam tanto com o valor menor, quanto com o valor maior da potência nominal, apresentam os mesmos valores tanto a corrente como a tensão, pois são limitados e variam apenas até os valores máximos da corrente e da tensão.

## CONCLUSÃO GERAL

Esse trabalho envolve várias áreas da engenharia, como a eletrônica de potência, sistemas de controle, mas esse estudo vai além dessas duas disciplinas o principal assunto foi o uso da plataforma EasyEDA para prototipagem da placa de PCB.

Para a realização dessa placa foi usado como exemplo um sistema de controle com conversores CC-CC da família *buck*, onde foi apresentado apenas suas funções e características, e como é feita a modulação PWM através do acionamento das chaves dos optoacopladores. Foi mostrado os detalhes de como projetar o sistema de controle para o desenvolvimento da malha de tensão e da malha de corrente, além de mostrar o funcionamento do sistema de controle de limitação de corrente para a prototipagem da placa.

O trabalho abordou uma das aplicações do sistema de controle de limitação de corrente que foi o carregador de bateria do tipo íon lítio, muito usada em celulares, notebooks, carros elétricos, e o uso das técnicas de carregamento com o emprego do sistema de controle.

Foram abordados os circuitos integrados aplicados nas malhas de tensão e corrente, os amplificadores operacionais em anexo com suas funções específicas como subtrator, seguidor de tensão ou *buffer e* compensador, o modulador de PWM UC 3525 A, o gerador de tempo morto IR21844 e o optoacoplador FOD3184, também foi apresentado a fonte auxiliar de um conversor *flyback* usada para a ligação da placa de controle com suas características de funcionamento.

Para o manual de operação da plataforma foi feito um tutorial com dicas de projeto, onde foi mostrado as principais ferramentas para fazer o esquemático e transforma-lo em PCB para a prototipagem da placa, depois desse processo a placa foi estruturada em uma placa de fenolite, onde foi usada uma fresa para desenhar o circuito com as trilhas e fazer a perfuração para encaixar os componentes.

Para o acionamento da placa de controle, foi preciso uma fonte alimentação onde é apresentado um projeto do conversor *buck* com o desenvolvimento do sistema de controle que foi mencionado ao longo desse estudo, e a realização de simulações desse conversor no software PSIM.

Essa trabalho pode servir como objeto de estudo para o desenvolvimento de outros projetos, pois é um trabalho aberto que pode evoluir, como podemos perceber através do esquemático proposto que possui oito saídas a serem controladas, para o estudo foram usados apenas cinco saídas, tem como ampliar seu uso. Esse trabalho pode abranger mais conversores da família *buck* assim como outros conversores.

Espero que esse trabalho seja usado por outros alunos tanto para dá continuidade ao estudo de controle dos conversores, como para uso da plataforma EasyEDA.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PCBMAY. **História PCB**. Disponível em: <https://www.pcbmay.com/pt/hist%C3%B3ria-pcb/>. Acesso em: 23 jul. 2022.

RASHID, Muhammad H. **Eletrônica de Potência Dispositivos, Circuitos e Aplicações**. São Paulo: Pearson, 1999.

HART, Daniel W. **Eletrônica de Potência Análise e Projeto de Circuitos**. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2012.

BARBI, Ivo *et al.* **Eletrônica de Potência: Conversores CC-CC Básicos Não Isolados**. Florianópolis: Edição do Autor, 2000.

PETRY, Clóvis Antônio. **Conversores Estáticos e Fontes Chaveadas**. Disponível em: [https://www.professorpetry.com.br/Ensino/Repositorio/Docencia\\_CEFET/Conversores\\_Estaticos/Pos\\_2014/Apresentacao\\_Aula\\_05.pdf](https://www.professorpetry.com.br/Ensino/Repositorio/Docencia_CEFET/Conversores_Estaticos/Pos_2014/Apresentacao_Aula_05.pdf). Acesso em: 06 maio 2022.

POMILIO, J. A.. **Topologias básicas de conversores CC-CC com isolamento**. Disponível em: <https://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/it505/CAP2.pdf>. Acesso em: 06 maio 2022.  
(POMILIO, 2022)

MATAKAS JUNIOR, Lourenço; KOMATSU, Wilson. **PEA-2488 Eletrônica de Potência II - NOTAS DE AULA Conversores CC/CC**. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1589055/mod\\_resource/content/1/Conversores%20CC-CC\\_2015\\_v\\_1\\_1.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1589055/mod_resource/content/1/Conversores%20CC-CC_2015_v_1_1.pdf). Acesso em: 08 maio 2022.  
(MATAKAS JUNIOR; KOMATSU, 2022)

BOJORGE, Ninoska. **Álgebra de Diagramas de Blocos**. Disponível em: [https://www.professores.uff.br/ninoska/wp-content/uploads/sites/57/2017/08/Aula08\\_-\\_Control\\_Diagrama\\_Blocos.pdf](https://www.professores.uff.br/ninoska/wp-content/uploads/sites/57/2017/08/Aula08_-_Control_Diagrama_Blocos.pdf). Acesso em: 24 fev. 2022.

TOFOLI, Fernando Lessa. **Conversores CC-CC Não Isolados**. São Paulo: Artliber, 2018.

TOZIM, Felipe. **Polos e Zeros**. Disponível em: <https://eletriacomscilab.blogspot.com/2017/09/funcao-plzr.html>. Acesso em: 24 fev. 2022.

UTFPR. **Polos, zeros e estabilidade**. Disponível em: [https://paginapessoal.utfpr.edu.br/mkaster/disciplinas-pos-graduacao/ppgee-pg-fundamentos-de-controle/4.%20Polos,%20Zeros%20e%20Estabilidade\\_2011\\_2.pdf/at\\_download/file](https://paginapessoal.utfpr.edu.br/mkaster/disciplinas-pos-graduacao/ppgee-pg-fundamentos-de-controle/4.%20Polos,%20Zeros%20e%20Estabilidade_2011_2.pdf/at_download/file). Acesso em: 01 mar. 2022.

JF-PAREDE. **Compreendendo a pinagem do SG3525 IC**. Disponível em: <https://jf-parede.pt/understanding-sg3525-ic-pinouts>. Acesso em: 28 abr. 2022.

CIA, Arduino e. **EasyEDA: Desenho de circuitos eletrônicos e PCB**. Disponível em: <https://www.arduinoocia.com.br/easyeda-circuitos-eletronicos-pcb/>. Acesso em: 23 jul. 2022.

EMBARCADOS. **Novas funcionalidades do EasyEDA.** Disponível em: <https://www.embarcados.com.br/novas-funcionalidades-do-easyeda/>. Acesso em: 29 mar. 2022.

GRIFFUS. **GERANDO ARQUIVOS GERBER e FURAÇÃO ALTIUM DESIGNER.** Disponível em: <https://www.griffuspcb.com.br/files/GERANDO-ARQUIVOS-GERBER-E-FURACAO-ALTIUM-DESIGNER.pdf>. Acesso em: 29 mar. 2022.

REIS, Fábio dos. **O Amplificador Operacional LM741 – Características e Aplicações.** Disponível em: <http://www.bosontreinamentos.com.br/electronica/o-amplificador-operacional-lm741-caracteristicas-e-aplicacoes/>. Acesso em: 03 maio 2022.

CARVALHO, Erick Bezerra de. **Driver de motor da locomoção.** Disponível em: [http://redmine.robome.com.br/projects/batalha-de-robos/wiki/Driver\\_de\\_motor\\_da\\_locomo%C3%A7%C3%A3o/1](http://redmine.robome.com.br/projects/batalha-de-robos/wiki/Driver_de_motor_da_locomo%C3%A7%C3%A3o/1). Acesso em: 03 maio 2022.

INDUSTRIES, Semiconductor Components. **FOD3184: 3A Output Current, High Speed MOSFET/IGBT Gate Driver Optocoupler.** Disponível em: <https://www.onsemi.com/products/interfaces/igbt-mosfet-gate-drivers-optocouplers/fod3184>. Acesso em: 08 maio 2022.

MOHAN, Ned; UNDELAND, Tore M.; ROBBINS, William P.. **Power Eletronics converters,applications, and design.** [S.I.]: Wiley, 2003.

MONARETTO, Vinícius Reginato. **PROJETO E ANÁLISE DE CONTROLE DE UM CARREGADOR DE BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO.** Disponível em: <ume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/222449/001126424.pdf?sequence=1>. Acesso em: 22 maio 2022.

EASYEDA.**EasyEDA Tutorial.** Disponível em: [https://easyeda.com/Doc/Tutorial/Doc/EasyEDA\\_Tutorial\\_20170908.pdf](https://easyeda.com/Doc/Tutorial/Doc/EasyEDA_Tutorial_20170908.pdf). Acesso em: 19 jun. 2022.

ELECTRONICSFORU. **Protection Mechanisms For Batteries And Their Charging Systems.** Disponível em: <https://www.electronicsforu.com/electronics-projects/electronics-design-guides/protection-mechanisms-batteries-charging-systems/amp>. Acesso em: 23 jun. 2022.

BASCOPE, René Pastor Torrico. **Fonte de alimentação com tensão e corrente de saída ajustáveis baseado no conversor buck.** Fortaleza: Departamento de Engenharia Elétrica, 2022.

ADDTHERM. **Características dos Sensores de Temperatura NTC e PTC.** Disponível em: <https://www.addtherm.com.br/sensores-de-temperatura-ntc-e-ptc/#:~:text=Os%20sensores%20NTC%20e%20PTC,uma%20boa%20toler%C3%A2ncia%20e%20precis%C3%A3o..> Acesso em: 04 jul. 2022

SPORCK, Chris. **Battery Charger Fundamentals.** Disponível em: <https://www.monolithicpower.com/battery-charger-fundamentals>. Acesso em: 05 jul. 2022.

PCBMAY. **Placa de circuito impresso.** Disponível em: <https://www.pcbmay.com/pt/placa-de-circuito-impresso/>. Acesso em: 08 jul. 2022.

SC, Falcon Indústria Eletrônica. **O QUE SÃO PTH, SMD E QUANDO USAR CADA UM?** Disponível em: <https://falconeletronica.com.br/o-que-sao-ptth-smd-e-quando-usar-cada-um/>. Acesso em: 08 jul. 2022

## ANEXOS

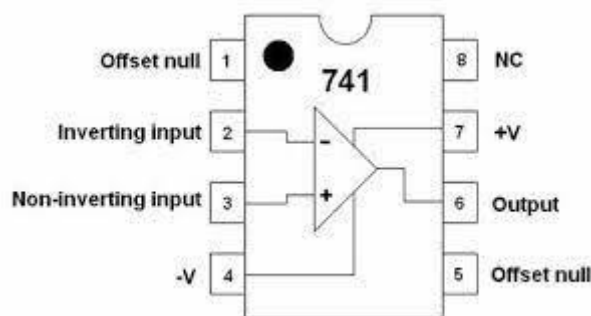
### LM741

O amplificador operacional LM741 é um amplificador de tensão de alto ganho que possui uma alta impedância na entrada e uma baixa impedância na saída, será abordado suas características em malha aberta, em malha fechada, suas aplicações e a função de cada pino.

Amplificador operacional em malha fechada tem como função reduzir o ganho do circuito, o *feedback* negativo permite que uma parte da tensão de saída seja aplicada na entrada inversora (pino 2) (REIS, 2022).

Amplificador operacional em malha aberta possui alto ganho, não possui *feedback* negativo pode atuar como comparador se a entrada inversora (pino 2) tiver 0V e a não inversora (pino 3), se for positiva a saída será positiva, se a tensão na entrada não inversora (pino 3) for negativa a saída será negativa (REIS, 2022).

O LM741 é aplicado nos seguintes circuitos eletrônicos: integradores, comparadores, amplificadores somadores, filtros ativos, buffers, seguidores, amplificadores DC (REIS, 2022).



Pino	Nome do pino	Descrição
1	Offset null	Pino de compensação usado para equilibrar a tensão de entrada.
2	Inverting input	Entrada do sinal inversor
3	Non- inverting input	Entrada do sinal não inversor.
4	-V	Alimentação negativa
5	Offset null	Cancela o deslocamento de tensão e remove a tensão de compensação.
6	Output	Saída do sinal amplificado

<b>7</b>	+V	Alimentação positiva
<b>8</b>	NC	Pino não está conectado