

Ministério da Educação
Instituto Federal de Ciências e Tecnologia da Paraíba
Campus João Pessoa
Departamento de Engenharia Elétrica

DESENVOLVIMENTO DE UM MÓDULO DIDÁTICO COM REGULADOR DE TENSÃO
LM2596 PARA ENSINO EM ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

MARIA FERNANDA FERREIRA DE AGUIAR

João Pessoa PB
2025

MARIA FERNANDA FERREIRA DE AGUIAR

DESENVOLVIMENTO DE UM MÓDULO DIDÁTICO COM REGULADOR DE TENSÃO
LM2596 PARA ENSINO EM ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Ciências e Tecnologia da Paraíba como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau em Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Alvaro Medeiros Maciel

João Pessoa - PB
20 de Janeiro de 2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Nilo Peçanha do IFPB, *campus* João Pessoa

A283d Aguiar, Maria Fernanda Ferreira de.

Desenvolvimento de um módulo didático com regulador de tensão LM2596 para ensino em eletrônica de potência / Maria Fernanda Ferreira de Aguiar. – 2025.

63 f. : il.

TCC (Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica) Instituto Federal de Educação da Paraíba / Departamento de Engenharia Elétrica, 2025.

Orientação : Prof. Dr Alvaro Medeiros Maciel.

1. Regulador de tensão chaveado. 2. Eletrônica de potência - ensino 3. Conversor CC-CC. 4. Módulo regulador LM2596. 5. PWM e PCB. I. Título.

CDU 621.3.016.2:37(043)

Bibliotecária responsável: Lucrecia Camilo de Lima – CRB 15/132

MARIA FERNANDA FERREIRA DE AGUIAR

DESENVOLVIMENTO DE UM MÓDULO DIDÁTICO COM REGULADOR DE TENSÃO
LM2596 PARA ENSINO EM ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

Trabalho de conclusão de curso defendido e aprovado em João Pessoa, 20 de Janeiro de 2025 ,
pela banca examinadora constituída pelos professores:

Documento assinado digitalmente
 **ALVARO DE MEDEIROS MACIEL**
Data: 27/01/2025 08:20:11-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Alvaro Medeiros Maciel
Instituto Federal de Tecnologia da Paraíba
Orientador

Documento assinado digitalmente
 **EDGARD LUIZ LOPES FABRICIO**
Data: 27/01/2025 09:12:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Edgard Luiz Lopes Fabricio
Instituto Federal de Tecnologia da Paraíba
Examinador

Documento assinado digitalmente
 **JOSE ARTUR ALVES DIAS**
Data: 27/01/2025 11:03:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. José Arthur Alves Dias
Instituto Federal da Paraíba
Examinador

Agradecimentos

Alcançar o fim da graduação por meio deste Trabalho de Conclusão de Curso é uma realização significativa, pois representa a concretização de anos de esforço.

Primeiramente, agradeço a Deus, que, nos momentos difíceis, me deu a força e a sabedoria necessárias para superar os obstáculos e seguir em frente. À minha família, que sempre esteve ao meu lado, oferecendo amor, apoio e o suporte necessário. Ao meu noivo, que sempre acreditou no meu potencial e me inspira a alcançar lugares além. À Universidade e aos seus professores, que contribuíram para o meu crescimento acadêmico e pessoal, compartilhando conhecimentos e experiências valiosas. E, em especial, ao meu orientador, Álvaro Maciel, por sua orientação, paciência e pelos conselhos preciosos ao longo desta jornada.

A todos, minha eterna gratidão!

"Ao infinito e além"
BUZZ LIGHTYEAR, Toy Story.

Resumo

Reguladores de tensão são amplamente utilizados em sistemas eletrônicos e fontes de alimentação variadas, para garantir o fornecimento de tensões estáveis para dispositivos e circuitos diversos. Entre os modelos disponíveis, o regulador *buck* LM2596 possui eficiência, simplicidade de uso e ampla aplicabilidade. Não obstante, esse equipamento é útil para a aplicação didática em cursos de Engenharia Elétrica, possibilitando a integração entre teoria e prática no estudo de conversores CC-CC chaveados. Este trabalho propõe o desenvolvimento de um módulo didático baseado no regulador LM2596, voltado para o ensino do conversor de topologia rebaixadora de tensão. O módulo foi projetado com pontos de medição, permitindo a análise prática de parâmetros como *duty cycle* (ciclo de trabalho), *ripple*, a corrente no indutor e a tensão de saída para compreender o funcionamento do circuito. O projeto utilizou ferramentas como a plataforma *EasyEDA* e o software *KiCad* para confecção do layout da placa de circuito impresso, enquanto simulações no *LTspice* foram realizadas para prever o comportamento do sistema em diferentes condições operacionais. Os resultados experimentais e simulados validaram o uso do módulo como uma ferramenta para complementar o aprendizado dos discentes, proporcionando uma experiência educacional que alia conhecimento teórico e habilidade prática. O projeto contribui para o aprimoramento do ensino em Engenharia Elétrica, estimulando a capacidade dos discentes de aplicar os conceitos aprendidos em situações reais.

Palavras-chave: Regulador de tensão chaveado, Eletrônica de potência, Conversor CC-CC, Ensino, *buck*, PWM, PCB, Módulo regulador LM2596, Módulo didático.

Abstract

Voltage regulators are widely used in electronic systems and various power supplies to ensure the delivery of stable voltages to different devices and circuits. Among the available models, the *buck* LM2596 regulator stands out for its efficiency, ease of use, and wide applicability. Moreover, this device is useful for didactic applications in Electrical Engineering courses, enabling the integration of theory and practice in the study of switched-mode DC-DC converters. This work proposes the development of a didactic module based on the LM2596 regulator, aimed at teaching the step-down converter topology. The module was designed with measurement points, allowing practical analysis of parameters such as *duty cycle*, *ripple*, inductor current, and output voltage to understand the circuit's operation. The project utilized tools like the *EasyEDA* platform and *KiCad* software to design the printed circuit board layout, while simulations in *LTspice* were conducted to predict the system's behavior under different operating conditions. Experimental and simulated results validated the module's use as a tool to complement student learning, providing an educational experience that combines theoretical knowledge with practical skills. The project contributes to improving education in Electrical Engineering, fostering students' ability to apply learned concepts to real-world situations.

Keywords: Switched Voltage Regulator, Power Electronics, DC-DC Converter, Education, *Buck*, PWM, PCB, LM2596 Regulator Module, Didactic Module.

Lista de Figuras

Figura 1 – Circuito de um conversor CC chaveado básico	14
Figura 2 – Diagrama do regulador chaveado	15
Figura 3 – Diagrama do regulador <i>buck</i>	16
Figura 4 – Tensão de saída com a interferência do <i>ripple</i>	17
Figura 5 – Sinal de referência comparado com um sinal de portadora	18
Figura 6 – Encapsulamento do LM2596	21
Figura 7 – Diagrama de blocos funcional do LM2596	22
Figura 8 – Circuito do módulo Regulador de Tensão Ajustável LM2596	24
Figura 9 – Curvas de eficiência energética para os diferentes modos do regulador LM2596	25
Figura 10 – Curvas de seleção de indutores de acordo com a potência de saída do LM2596	26
Figura 11 – Circuito do regulador de tensão ajustável LM2596 no <i>LTspice</i>	28
Figura 12 – Circuito do regulador de tensão ajustável LM2596 no <i>EasyEDA</i>	29
Figura 13 – Visualização do <i>Layout</i> da PCB do módulo regulador de tensão em 3D	30
Figura 14 – Circuito do regulador de tensão ajustável LM2596 no <i>KiCad</i>	31
Figura 15 – Visualização do <i>layout</i> do módulo regulador de tensão em 3D: a) vista superior da PCB, b) vista inferior da PCB.	32
Figura 16 – Fonte de bancada Minipa MPL-3303	33
Figura 17 – Osciloscópio DPO-X 3034 da <i>Agilent Technologie</i>	34
Figura 18 – Alicates amperímetro <i>Keysight 1146B</i>	34
Figura 19 – Transitório de corrente no indutor	35
Figura 20 – Transitório da tensão de saída	36
Figura 21 – <i>Ripple</i> da tensão do indutor	36
Figura 22 – <i>Ripple</i> da corrente do indutor	37
Figura 23 – PWM do regulador	37
Figura 24 – corrente do indutor X PWM	38
Figura 25 – Protótipo do módulo regulador de tensão	39
Figura 26 – Transitório da corrente no indutor do protótipo	40
Figura 27 – Transitório da tensão de saída do protótipo	40
Figura 28 – <i>Ripple</i> da tensão de saída do protótipo	41
Figura 29 – <i>Ripple</i> da corrente do indutor no protótipo	42
Figura 30 – PWM do protótipo	42
Figura 31 – Corrente do indutor X tensão de saída	43
Figura 32 – Design para o módulo didático	44

Lista de tabelas

Tabela 1 – Especificações do LM2596	20
Tabela 2 – Especificações dos componentes do módulo LM2596	24

Lista de abreviaturas e siglas

PCB	<i>Printed Circuit Board</i> (Placa de Circuito Impresso)
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso)
CC	Corrente Contínua
D	Duty Cycle (Ciclo de Trabalho)
CI	Circuito integrado
LC	Indutor-Capacitor
ESR	Resistência Série Equivalente
GND	Ground (Terra)
FB	Feedback (Realimentação)

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS	12
1.1.1	Objetivo Geral	12
1.1.2	Objetivos Específicos	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1	Conversores CC-CC	13
2.1.1	Reguladores Chaveados	14
2.1.1.1	Regulador Buck	16
2.2	Tensão de Ripple	17
2.3	Controle PWM	17
3	METODOLOGIA	20
3.1	Funcionamento do LM2596	20
3.1.1	Diagrama funcional	21
3.1.2	Princípio de Funcionamento do Módulo	23
3.1.3	Dimensionamentos dos Componentes	25
3.2	Desenvolvimento do Protótipo	27
3.2.1	Elaboração da Simulação	27
3.2.2	Construção do <i>Layout</i> da PCB	29
3.2.2.1	Plataforma <i>EasyEDA</i>	29
3.2.2.2	Software <i>KiCad</i>	31
3.2.3	Validação da placa do módulo regulador de tensão	33
3.2.3.1	Equipamentos Utilizados	33
4	RESULTADOS	35
4.1	Resultados de Simulação	35
4.2	Resultados Experimentais	38
4.2.1	Módulo didático	43
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
	Referências	47

Apêndices	48
APÊNDICE A – BIBLIOTECAS NECESSÁRIAS NO LTSPICE	49
A.1 Lm2596xx.txt	49
A.2 Diodo	60

1 Introdução

O curso de Engenharia Elétrica exige abordagens de ensino além da teoria. (COLOMBO C. R.; SANTANA, 2006) afirmam que os métodos usualmente empregados nos cursos de engenharia geram insatisfação, em consequência dessas abordagens que não conseguem estimular o engajamento ou atender às expectativas dos discentes, contribuindo para elevados índices de desmotivação e evasão. Todos esses fatos tornam importante a inserção de novos métodos e ferramentas que estimulem a aprendizagem.

No ensino de Eletrônica de Potência, a combinação da teoria e prática proporciona uma melhor compreensão aprofundada dos componentes e sistemas utilizados em conversão de energia. Entre os diversos dispositivos estudados, estão conversores CC-CC utilizados em sistemas como baterias ou circuitos eletrônicos sensíveis. Esses dispositivos atuam, por exemplo, como reguladores de tensão, mantendo a tensão de saída estável mesmo diante de variações na tensão de entrada ou na carga conectada. A educação sobre esses dispositivos, com foco nas suas aplicações práticas, é essencial para o desenvolvimento das habilidades. Estudos realizados em (MAZZI, 2024) destacam a importância de explorar o desempenho desses dispositivos em ambientes controlados para fins de ensino e pesquisa.

O CI LM2596 é um regulador de tensão CC-CC do tipo *step-down buck*, que permite a conversão de uma tensão de entrada mais alta para uma tensão de saída mais baixa com alta eficiência. Este regulador é capaz de fornecer até 3A de corrente contínua, o que o torna ideal para uma variedade de aplicações, desde circuitos de alimentação até sistemas de controle em projetos de engenharia (Texas Instruments, 2023). Esse CI se destaca devido à sua eficiência, baixo custo e versatilidade, sendo amplamente utilizado em fontes de alimentação e sistemas embarcados.

Neste contexto, o desenvolvimento de um módulo didático baseado no LM2596 é uma proposta para promover o ensino de reguladores de tensão. O módulo permite aos alunos entenderem melhor o funcionamento dos conversores CC-CC, além de possibilitar a realização de experimentos que evidenciem os principais parâmetros de operação, como eficiência, *ripple* e regulação de tensão. Além disso, o uso de plataformas educacionais facilita a compreensão do conceito de conversão de energia e a aplicação de tecnologias em sistemas reais.

Sendo assim, este trabalho propõe o desenvolvimento de um módulo didático voltado ao aprimoramento do ensino em Eletrônica de Potência. Como objeto de estudo, foi selecionado o conversor CC-CC *buck*, cuja implementação busca atender tanto ao aspecto funcional quanto à avaliação de sua aplicabilidade no contexto educacional. Para, assim, promover o aperfeiçoamento das metodologias pedagógicas, contribuindo para uma formação profissional mais sólida e alinhada às exigências do mercado.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um módulo didático com regulador de tensão LM2596 para ensino em Engenharia Elétrica. Com efeito, será utilizado o ambiente de simulação *LTspice*, com o intuito de verificar o funcionamento do circuito proposto e identificar seus parâmetros de operação ideais. Além disso, a plataforma online *EasyEDA* e o software *KiCad* serão empregados na confecção da placa de circuito impresso (PCB), enquanto o software *Inkscape* será utilizado no design do suporte acrílico do módulo.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Explorar conceitos teóricos sobre reguladores de tensão *buck*, com foco no LM2596.
- Projetar um circuito integrado CI funcional que incorpore o regulador LM2596 e seus componentes complementares.
- Construir um protótipo físico, com recursos didáticos, para utilização em sala de aula.
- Elaborar um manual de instruções para professores e alunos.

2 Referencial Teórico

No capítulo a seguir será descrito as principais bibliografias utilizadas para a composição do entendimento mais profundo sobre o tema. Além de estabelecer conceitos de extrema importância para o entendimento da metodologia empregada.

2.1 Conversores CC-CC

Os conversores CC-CC são dispositivos com capacidade para transformação e regulação de energia em circuitos eletrônicos, convertem a tensão de uma fonte de energia em corrente contínua para outro nível de tensão. Esse mecanismo vem se popularizando mediante sua aplicabilidade em energias renováveis, carregamento de baterias e carros elétricos. Com efeito, esses conversores possuem a capacidade de ajustar os níveis de tensão, regulam a saída para nível maior, menor ou inversa à tensão de entrada, para atender aos requisitos de diferentes dispositivos, garantindo eficiência e estabilidade. Eles propiciam um controle uniforme de aceleração, alta eficiência e uma resposta dinâmica rápida (RASHID, 2014).

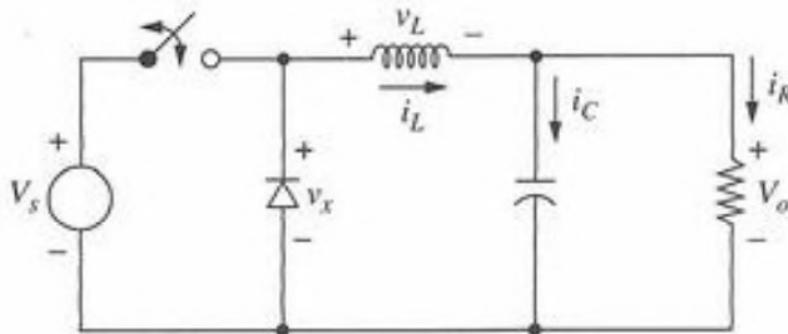
Os conversores CC atuam de duas formas: linear e chaveada (comutação). O conversor CC linear é capaz de fornecer uma tensão de saída estável, diante das variações na tensão de entrada ou na corrente de carga, funciona controlando um regulador que dissipa o excesso de energia como calor. Esse tipo de conversor possui simplicidade em seu circuito e funcionamento concomitante com a sua utilização, sendo aplicado onde a eficiência energética não é crítica, assim, apresenta pouca interferência na saída. Entretanto, apesar da sua simplicidade, apresenta eficiência baixa devido ao seu funcionamento baseado na dissipação de calor, visto que, principalmente, de acordo com (HART, 2012), em aplicações de potências elevadas, a potência dissipada pelo circuito torna-se maior que a potência absorvida pela carga, desperdiçando energia.

Por outro lado, o conversor CC chaveado é um dispositivo que regula uma tensão CC de entrada em outra tensão CC na saída, podendo ser maior, menor ou inversa, baseado na comutação de chaves. Seu funcionamento depende da posição na qual a chave está: aberta ou fechada. Com efeito, na condição fechada, está em condução, enquanto na aberta fica retida. Esse dispositivo utiliza o chaveamento em alta frequência e componentes como indutores, capacitores e diodos para armazenar e transferir energia. Esses conversores são vastamente utilizados devido à sua alta eficiência energética com menos perdas, ademais, é compacto e leve devido ao uso de componentes menores. Em contrapartida, gera ruído devido à comutação em alta frequência, como a tensão de *ripple*; logo, requer filtragem para reduzir interferências. Existem diversas topologias de conversores CC chaveados que podem ser aplicadas conforme a necessidade: *buck* (rebaixador de tensão), *boost* (elevadora de tensão), a *buck-boost* e a topologia *Cúk* (RASHID, 2014).

2.1.1 Reguladores Chaveados

O conversor CC é capaz de atuar com o regulador chaveado, para isso, utiliza um componente de comutação, como um transistor, para alternar rapidamente entre estados de condução e retido, alternando entre os estados de condução e corte em alta frequência. Isso reduz as perdas de energia em comparação com reguladores lineares. Esses dispositivos são mais eficientes que reguladores lineares, pois minimizam a dissipação de energia em forma de calor. Na Figura 1 é apresentado o circuito de um conversor CC chaveado básico.

Figura 1 – Circuito de um conversor CC chaveado básico

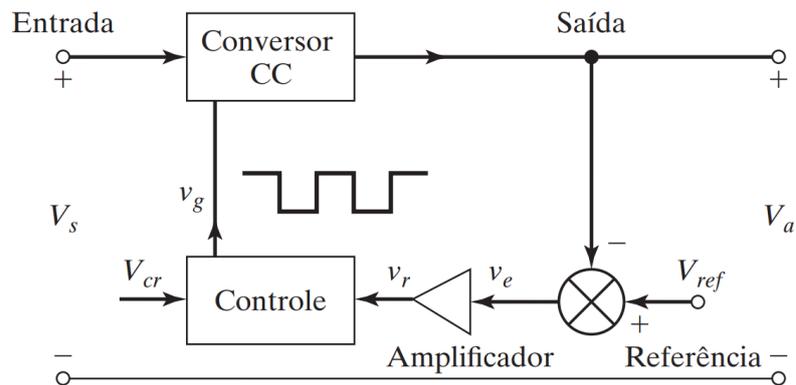


Fonte: Hart (2012)

Esse dispositivo é composto por componentes principais como uma chave, um indutor, um capacitor e um diodo. A chave controla o fluxo de corrente no circuito regulando o ciclo de trabalho e a tensão de saída por meio do *Pulse With Modulation* (PWM), o indutor armazena e libera energia dependendo do estado da chave, o capacitor filtra a tensão de saída para estabilizá-la, e o diodo permite que a corrente continue fluindo quando a chave está desligada.

A Figura 2, de acordo com (RASHID, 2014), ilustra o diagrama dos elementos constituintes desse regulador no qual a tensão de saída é comparada com uma tensão de referência, gerando tensão de controle V_e . A tensão pode ser comparada com um sinal em forma de dente de serra V_{cr} para produzir o sinal de controle PWM necessário para o conversor CC.

Figura 2 – Diagrama do regulador chaveado



Fonte: Rashid (2014)

Os conversores CC com reguladores chaveados estão disponíveis para aquisição no formato de Circuito Integrado CI. Incluem quatro topologias básicas: *buck*, *boost*, *buck-boost* e *Cúk*. Na topologia *buck* a tensão de entrada, fonte CC é maior do que a tensão de saída, por isso é conhecido como rebaixador de tensão, opera alternando a tensão de entrada através de uma chave e utiliza um indutor e um capacitor para suavizar a corrente e estabilizar a tensão de saída. Sua aplicação é comum em diversos dispositivos: como circuitos lógicos; em carregadores de bateria para celulares, notebooks e *power banks*; e para a alimentação de computadores e placas-mães e carregadores solares.

O regulador *boost*, também conhecido como elevador de tensão, aumenta a tensão de entrada CC, resultando em uma maior tensão na saída CC. Neste contexto, o indutor acumula energia durante o processo de ativação da chave e, ao desligar, a libera, que é incorporada à tensão de entrada para elevar o nível de saída. Este tipo de regulador é comumente aplicado em áreas como a eletrônica industrial, automobilística e sistemas de energia renováveis.

A topologia *buck-boost* une as propriedades dos reguladores *buck* e *boost*, que atuam como rebaixadores e elevadores de tensão. Este aparelho tem a capacidade de diminuir ou aumentar a tensão de entrada, conforme o ciclo de trabalho, além de inverter a polaridade da tensão de saída (MOHAN N.; UNDELAND, 1995). Esse regulador é indicado para usos onde a tensão de entrada pode oscilar acima ou abaixo do nível desejado, aprimorando a saída de energia de um painel solar ao harmonizar a tensão de saída com as necessidades de sistemas alimentados por baterias.

O *Cúk* tem a capacidade de diminuir ou aumentar a tensão de entrada CC, similar ao *buck-boost*, porém com particularidades de funcionamento com a polaridade contrária à da entrada. O elemento principal de armazenamento de energia é a principal distinção entre essas duas topologias. A topologia *buck-boost* emprega o indutor, enquanto a topologia *Cúk* emprega o capacitor. Segundo (WEINERT, 2017), tem aplicação em carregamento de baterias de sistemas fotovoltaicos.

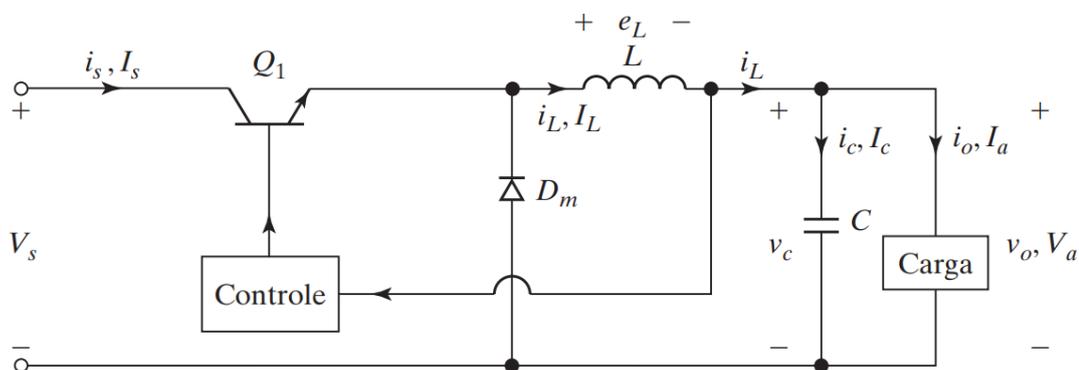
Além dos mencionados, existem outros conversores de tensão que são variações dos

modelos apresentados (POMILIO, J.A, 2018). Eles são nomeados SEPIC e Zeta. O conversor SEPIC é um dispositivo capaz de elevar ou abaixar a tensão. Além disso, possui características de fonte de corrente na entrada e de fonte de tensão na saída. A característica de fonte de corrente se dá pelo indutor em série com uma fonte de tensão, enquanto a característica de fonte de tensão é proporcionada pelo capacitor paralelo à saída, que, por motivos de análise, pode ser considerado uma fonte de tensão. O conversor Zeta também possui uma característica abaixadora-elevadora de tensão. A diferença entre este conversor e o SEPIC está apenas na posição relativa dos componentes.

2.1.1.1 Regulador Buck

O conversor *buck*, também chamado de abaixador ou *step-down*, é um tipo de conversor CC-CC utilizado para converter uma tensão contínua de entrada em uma tensão de saída de menor valor. Na Figura 3, é apresentada a estrutura básica de um conversor *buck*. Uma fonte de chaveamento equipada com um filtro passa-baixas LC (indutor e capacitor) na sua saída. Ao ser ativado por um comando PWM de liga/desliga na frequência de chaveamento, o transistor emite pulsos de tensão na entrada do filtro, oscilando entre a alimentação e o zero. Contudo, o filtro atua como um amortecedor dessa ondulação, tornando a tensão de saída mais constante e, conseqüentemente, eliminando o ruído de alta frequência de chaveamento. De acordo com (RASHID, 2014), o regulador *buck* tem uma eficiência elevada, maior que 90%.

Figura 3 – Diagrama do regulador *buck*



Fonte: Rashid (2014)

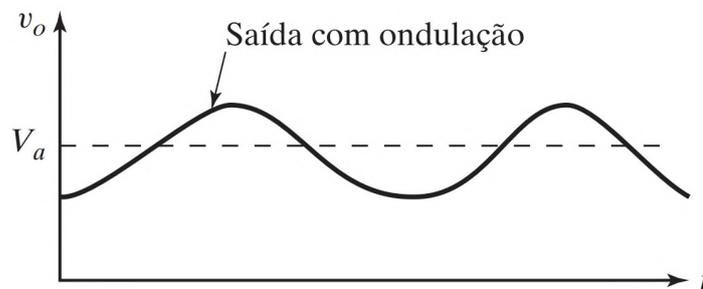
Quando a chave está ligada, o diodo se torna reversamente polarizado e não conduz, fazendo com que a fonte direcione a corrente para o indutor e para o capacitor. No entanto, ao desligar a chave, o diodo D_m começa a conduzir, abrindo caminho para a corrente do indutor. Dessa forma, o indutor transfere sua energia para o capacitor e a carga, resultando na redução da corrente no indutor. O capacitor é carregado enquanto a corrente do indutor excede a da carga. Se não, o capacitor se descarrega, fornecendo a corrente necessária para a carga. O controle da tensão de saída por meio de PWM, o comutador liga e desliga, controlando a quantidade

de energia entregue à carga. O *duty cycle* (ciclo de trabalho) é o tempo em que o comutador permanece ligado e determina a tensão média na saída.

2.2 Tensão de Ripple

Nos circuitos de corrente contínua, a corrente de entrada e a tensão de saída, de maneira ideal, são contínuas puras. No conversor CC, essa premissa é válida, contudo, na prática, podem surgir interferências decorrentes de harmônicos ou oscilações de corrente alternada na sua saída, também conhecida como tensão de *ripple* (RASHID, 2014). A Figura 4 ilustra a influência dessa interferência na tensão.

Figura 4 – Tensão de saída com a interferência do *ripple*



Fonte: Rashid (2014)

O fator de ondulação da tensão de saída CC, a tensão de *ripple*, apresentada na Equação (2.1) na forma de porcentagem, V_{ripple} representa o valor de *ripple* de pico-a-pico em relação ao valor de tensão de saída V_{out} .

$$Ripple\% = \frac{V_{ripple}}{V_{out}} \quad (2.1)$$

A função da filtragem, que consiste em um capacitor, é tornar a forma do sinal de saída o mais semelhante possível a uma tensão contínua ideal. Contudo, conforme o valor do capacitor e a corrente utilizada pela carga, surge o *ripple*. Portanto, podemos determinar a tensão de *ripple* e, conseqüentemente, dimensionar o capacitor de filtro da fonte para minimizar esse efeito de variação da carga.

Em relação ao regulador chaveado, o *ripple* pode ser causado pela variação constante na tensão de saída causada pelo processo de comutação, em alta frequência, e pelas características dos componentes do circuito, elementos do filtro, como também influências da carga conectada ao regulador.

2.3 Controle PWM

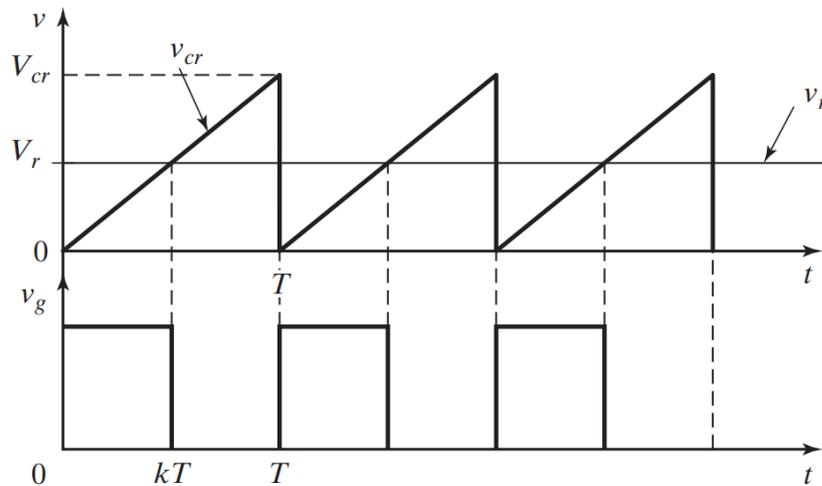
A técnica de modulação por largura de pulso (PWM) consiste na variação da largura dos pulsos em um sinal elétrico. É comumente empregada em conversores eletrônicos de potência,

tais como drivers de LED e inversores de frequência.

Em um PWM, é possível regular a amplitude da tensão através da modulação das formas de onda. Essa técnica apresenta duas vantagens: a diminuição dos requisitos de filtro para a redução de harmônicos e o controle da amplitude da tensão de saída. No entanto, apresenta circuitos de controle mais complexos para as chaves e um aumento nas perdas devido ao alto grau de chaveamento (HART, 2012). O controle de chaveamento para a saída de um PWM requer um sinal de referência, chamado de modulação ou sinal de controle, e um sinal portador, que pode ser uma onda triangular ou dente de serra que controla a frequência de chaveamento.

Em um regulador chaveado, o PWM permite uma regulação eficiente e precisa, ajustando a largura do pulso conforme as necessidades da carga, sem perdas significativas de energia (RASHID, 2014). O *duty cycle* (ciclo de trabalho) k ou D é uma medida que expressa a proporção de tempo em que o sistema está ligado, ou seja, a chave está fechada, durante um período total. Esse pode ser gerado pela comparação de um sinal CC de referência v_r com um sinal de portadora dente de serra v_{cr} . Isso é ilustrado na Figura 5 na qual V_r é o valor de pico de v_r e V_{cr} , o valor de pico de v_{cr} .

Figura 5 – Sinal de referência comparado com um sinal de portadora



Fonte: Rashid (2014)

O ciclo de trabalho expressa o tempo em que o transistor permanece ligado (t_{on}) dentro de um período (T) determina o ciclo de trabalho (D) apresentado na Equação 2.2. Seu resultado é o índice de modulação, o ciclo de trabalho D pode variar de 0 a 1.

$$D = \frac{t_{on}}{T} \quad (2.2)$$

Em um conversor *step-down* (rebaixador de tensão), a tensão de saída média (V_{out}) que é proporcional à tensão de entrada (V_{in}) e ao ciclo de trabalho, disposto na Equação 2.3.

$$V_{out} = V_{in} * D \quad (2.3)$$

Dessa forma, caso o ciclo de trabalho for igual a 0, o transistor estará desligado e o (V_{out}) também será 0, já que o circuito está aberto. Em contrapartida, ciclo de trabalho igual a 1 o transistor estará ligado e o (V_{out}) será igual ao (V_{in}). Para os demais valores de (D), o (V_{out}) será proporcional ao seu valor.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, é apresentada a metodologia aplicada para o desenvolvimento do projeto e a compreensão do módulo regulador de tensão LM2596, destacando o diagrama funcional, o princípio de funcionamento e o dimensionamento dos componentes. Além disso, são abordadas as etapas utilizadas para a confecção do módulo, como a simulação no *LTspice* para avaliar o comportamento do regulador em diferentes condições operacionais, o design da PCB com as plataformas *EasyEDA* e *KiCad*, e a realização de testes experimentais para validar a funcionalidade do módulo.

3.1 Funcionamento do LM2596

O LM2596 da (Texas Instruments, 2023) é um CI de um conversor CC chaveado *buck* com funcionalidade de regulador de tensão. Esse CI converte a tensão de entrada CC em um nível mais baixo na tensão de saída CC. Comumente utilizado em aplicações de fontes de alimentação, um exemplo é no desenvolvimento de uma bomba de água solar (NIGADE et al., 2022). Devido à sua alta eficiência, com capacidade de fornecer saída estável, disponibilidade no mercado e também os componentes já utilizados anteriormente, pela facilidade de integração em projetos, na disciplina de Eletrônica de Potência.

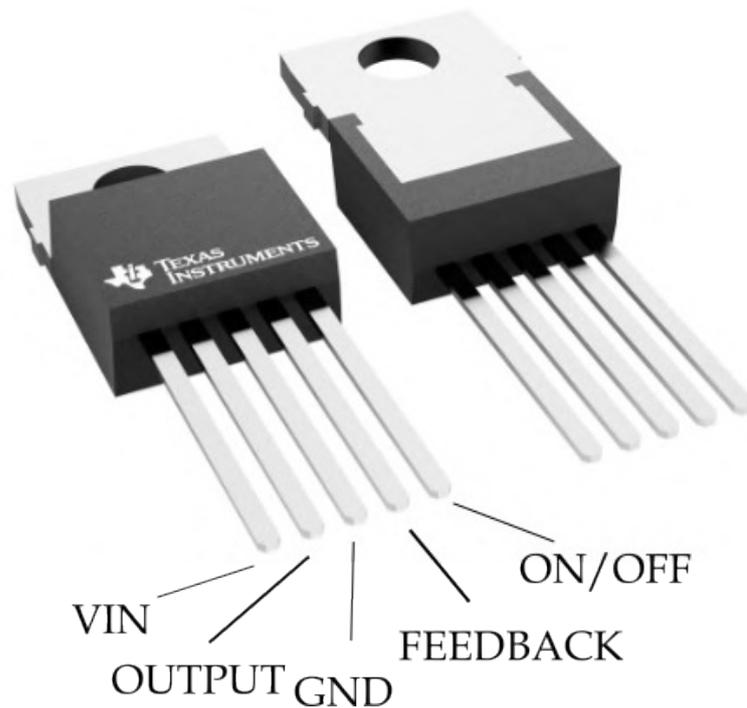
O *datasheet* do circuito integrado LM2596 contém todas as informações e especificações técnicas necessárias para o seu uso adequado. A Tabela 1 contém algumas das especificações fundamentais para o uso do regulador em formato de saída ajustável.

Tensão de Entrada	4,5 à 40 V
Tensão de saída	1,5 à 36 V
Corrente de saída	até 3 A
Frequência de chaveamento	150 kHz

Tabela 1 – Especificações do LM2596

O componente é fornecido em encapsulamentos, sendo compacto e ideal para aplicações que necessitam de um uso limitado da área de um PCB, como também requer poucos componentes externos. Este componente, além de ter 5 pinos funcionais, também inclui um *metal tab GND*, uma área metálica localizada no plano de terra da placa, conforme mostrado na Figura 6.

Figura 6 – Encapsulamento do LM2596



Fonte: adaptado do [Texas Instruments \(2023\)](#)

O primeiro pino V_{IN} tem a finalidade de fornecimento de entrada positiva para o regulador de comutação. O pino 2 (*output* ou *OUT*) é o interruptor interno, a tensão neste pino alterna aproximadamente com o ciclo de trabalho de $\frac{V_{OUT}}{V_{IN}}$. O pino 3 (*ground* ou *GND*) apresenta o aterramento do circuito. O pino 4 (*feedback* ou *FB*) detecta a tensão de saída regulada para completar o loop de *feedback*. Enquanto o pino 5 (*ON/OFF*) permite que o circuito regulador de comutação seja desligado usando sinais lógicos, reduzindo assim a corrente de alimentação de entrada quando necessário. Caso contrário, o pino (*ON/OFF*) pode ser conectado ao pino de terra ou deixado desconectado. Em ambos os casos, o regulador estará na condição LIGADA (ON).

3.1.1 Diagrama funcional

Para compreender o funcionamento interno do CI, na Figura 7 é ilustrada sua arquitetura interna em seu diagrama de blocos funcional.

regulador está no formato de saída ajustável, o divisor de tensão é externo ao CI. Esse pino é responsável pelo controle da tensão de saída. Quando o capacitor é totalmente carregado pelo indutor, o divisor atinge 1,235 V (tensão fixa de referência) na entrada positiva (+) do amplificador de erro interno. Nesse momento, o pino *feedback* desativa o CI para manter a saída no valor setado. No momento em que o capacitor é alimentado pelo diodo, devido à descida do valor de 1,235 V, no divisor de tensão. Nesse momento, o *feedback* reativa o integrado, assim, o pino *OUTPUT* regula o pino V_{IN} , com o intuito de manter o valor da tensão de saída configurada.

O LM2596 também possui circuitos de proteção. O *CURRENT LIMIT* é composto por dois amplificadores, um conectado a uma tensão de -0,22 V e o outro de -0,2 V, em suas entradas positivas (+), e ambos conectados a um resistor em suas entradas negativas (-). A corrente da carga flui pelo último transistor e pelo resistor mencionado. Enquanto a corrente na carga se mantiver abaixo do limite do CI, a queda de tensão do resistor será abaixo de 0,2 V. Nesse caso, os terminais negativos (-) dos amplificadores ficarão menos negativos que os terminais positivos (+), mantendo os amplificadores desligados. Suas saídas habilitam o *LATCH* e o oscilador.

Quando a corrente subir além do limite, como em caso de curto-circuito, a tensão no resistor aumenta acima de 0,22 V. Isso resulta em que suas entradas negativas (-) ficarão mais negativas que suas entradas positivas(+) ativando as saídas dos amplificadores e desativando o *LATCH* e o oscilador.

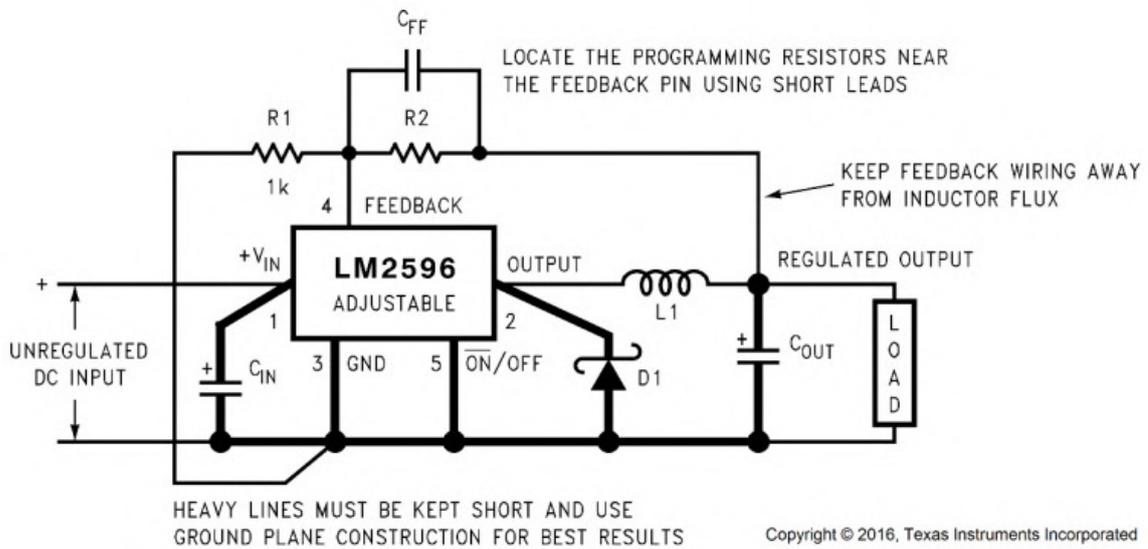
Outra proteção é o *THERMAL LIMIT*, refere-se ao limite térmico do circuito integrado. Quando a temperatura do CI aumenta em demasia, pode desabilitar o *DRIVER* e os transistores.

O *ACTIVE CAPACITOR* funciona como um filtro de tensão para possíveis *ripple* no *feedback* ou no *OUTPUT*. Esse filtro está conectado à entrada negativa (-) do amplificador de comparação, cuja variação é de 1 a 2,5 V, enquanto o oscilador é o terminal positivo(+), conforme mencionado anteriormente neste capítulo, esse conjunto é responsável por ativar o *LATCH*.

3.1.2 Princípio de Funcionamento do Módulo

O módulo Regulador de Tensão Ajustável LM2596 apresenta componentes externos ao CI LM2596, como resistores, capacitores, indutor e diodo. Na Figura 8 é ilustrado o circuito do módulo e seus componentes. Os componentes possuem valores específicos dependendo da atuação designada. No modo ajustável, seus valores estão apresentados na Tabela 2.

Figura 8 – Circuito do módulo Regulador de Tensão Ajustável LM2596



Fonte: Texas Instruments (2023)

O pino V_{IN} está conectado ao capacitor de entrada (C_{in}), que serve como filtro de ruído da fonte de alimentação. Os resistores (R1 e R2) são usados como divisor de tensão para ajustar a tensão de saída. A tensão gerada entre eles é conectada ao *feedback* até atingir o valor de referência ou o valor configurado para saída. O indutor (L1) armazena e transfere a corrente de forma gradual. Quando os transistores estão ativos dentro do CI, o indutor alimenta a carga e cria uma tensão inversa ao V_{IN} para manter-se energizado. Dessa forma, sua corrente aumenta gradualmente e carrega o capacitor de saída (C_{OUT}). Quando o circuito atinge a tensão desejada, o diodo (D1) conduz energia para o capacitor. Nesse momento, o *feedback* reativa o circuito integrado e o pino *OUTPUT* regula o pino V_{IN} , com o intuito de manter o valor da tensão de saída configurada. A configuração do capacitor na saída atua também como filtro passa-baixas, devido a frequência de chaveamento é alta. O capacitor *Feedforward* (C_{FF}) tem a função de melhorar a resposta transitória e a estabilidade do circuito de controle. Os valores para cada um desses componentes estão apresentados na Tabela 2 fornecidos por (Texas Instruments, 2023).

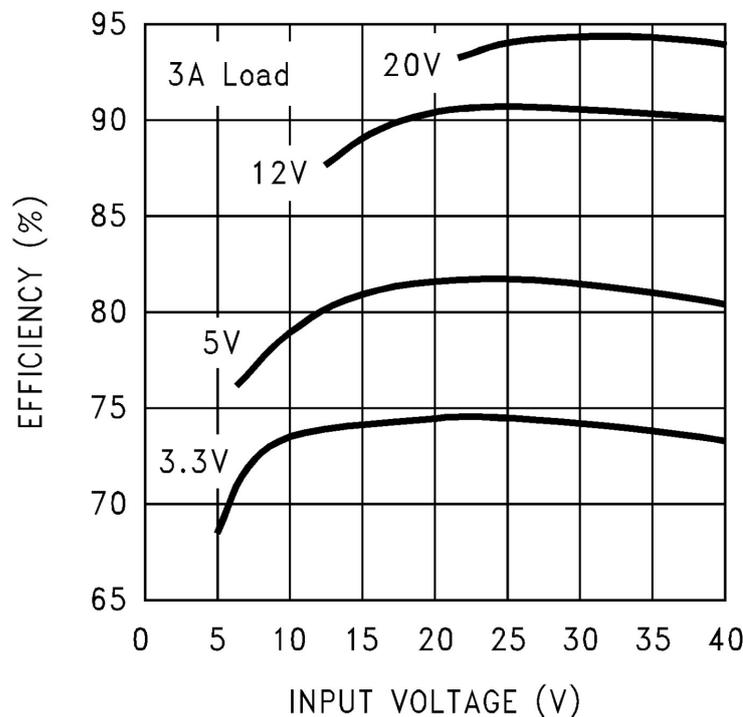
Capacitor de entrada (C_{in})	470 μF
Resistor (R1)	1 $\text{k}\Omega$
Resistor (R2)	Regulável
Capacitor Feedforward (C_{FF})	1 nF
Capacitor de saída (C_{OUT})	220 μF
Indutor (L1)	68 μH
Diodo (D1)	5-A, 40-V Schottky Rectifier

Tabela 2 – Especificações dos componentes do módulo LM2596

Na versão de saída ajustável, a tensão de entrada deve assumir valor mínimo de 4,5 V e máximo 40 V, como apresentado na Tabela 1. Conforme se pode observar na Figura 9, seu menor

valor de eficiência energética, com uma tensão de entrada de 5 V, tensão de saída ajustada para 3 V e operando com uma corrente de saída de 3 A, é de aproximadamente 70%. Entretanto, para a mesma corrente de saída fixa em 3 A, os reguladores que permitem uma tensão de saída mais alta apresentam maior eficiência energética. No caso do regulador com tensão de saída ajustável, sua eficiência é próxima de 95% quando se aplica uma tensão de entrada de aproximadamente 30 V. Dessa forma, torna-se evidente que quanto maior a tensão de saída desejada em concordância com uma tensão de entrada maior, resulta em um valor alto de eficiência, principalmente, em torno dos 30 V de entrada.

Figura 9 – Curvas de eficiência energética para os diferentes modos do regulador LM2596

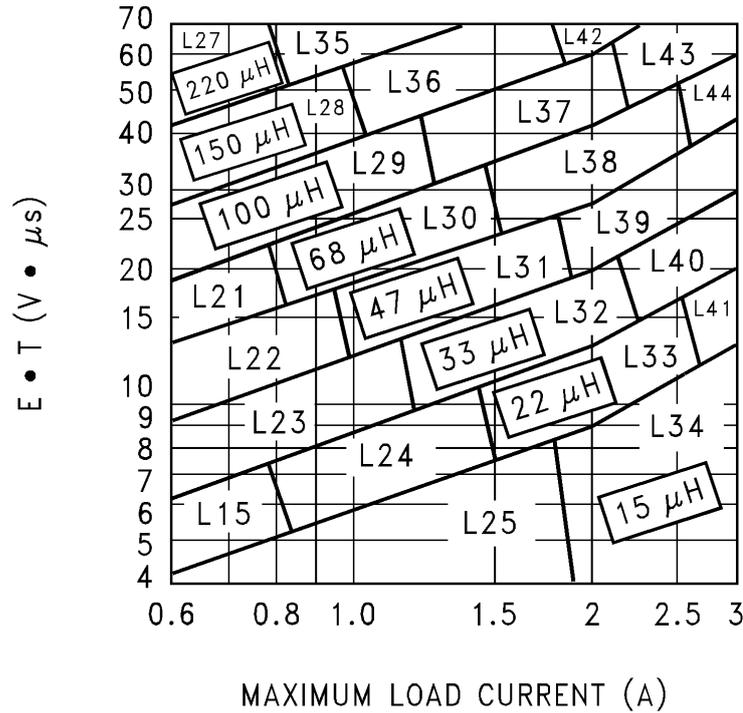


Fonte: Texas Instruments (2023)

3.1.3 Dimensionamentos dos Componentes

Para dimensionar o indutor, é analisada a corrente do circuito. Durante os dois estados da chave, a corrente que flui pelo indutor pode causar sua saturação e, conseqüentemente, o superaquecimento do componente. Portanto, ao dimensionar o indutor, deve-se consultar os gráficos disponíveis no *datasheet* do fabricante (Texas Instruments, 2023), mostrados na Figura 10, e verificar se a potência fornecida atende às exigências da carga. Dessa maneira, para evitar a entrada de mais calor no circuito, é importante que o valor de indutância mostrado nos gráficos da Figura 10 seja respeitado. Assim, o indutor, além de não ser uma fonte de calor no circuito, pode também contribuir para a dissipação da energia térmica dos outros componentes.

Figura 10 – Curvas de seleção de indutores de acordo com a potência de saída do LM2596



Fonte: Texas Instruments (2023)

No dimensionamento do Capacitor de entrada (C_{in}) é indicado o capacitor eletrolítico de *bypass* de alumínio de baixa *ESR* (Resistência Equivalente Série) ou de tântalo, que deve ser instalado entre o pino de entrada e o pino de aterramento para evitar grandes transientes de tensão na entrada e fornecer a corrente instantânea necessária cada vez que a chave for acionada. Além disso, possui uma tensão máxima de operação especificada para suportar a tensão de entrada, nesse caso de 50 V para ser utilizado de acordo com o requisito de projeto.

O capacitor de saída (C_{out}) deve ser usado eletrolítico de baixo ESR (Resistência Equivalente Série), ou de tântalo sólido projetados para aplicações de reguladores chaveados, na maioria das aplicações 82 μF e 820 μF (Texas Instruments, 2023). Esse capacitor tem a função de filtrar a saída e fornecer estabilidade ao circuito de regulação. A tensão nominal do capacitor deve ser pelo menos 1,5 vezes maior que a tensão de saída. Para uma saída máxima de 35 V, um capacitor de 50 V é necessário.

Para a seleção dos resistores, o R1 possui um valor já pré-estabelecido de 1 $k\Omega$, um valor menor de resistor minimiza a captação de ruído no pino sensível de *feedback*. Já para a escolha do R2, é necessário realizar um cálculo baseado na Equação 3.1 de divisão de tensão para ajustar V_{out} .

$$V_{out} = V_{ref} \left(1 + \frac{R2}{R1} \right) \quad (3.1)$$

O valor de $V_{ref} = 1,23$ V. A Equação 3.2 obtém o valor de R2.

$$R2 = R1 \left(\frac{V_{out}}{V_{ref}} - 1 \right) \quad (3.2)$$

A resistência deve ser escolhida de acordo com a tensão de saída (V_{out}) necessária para o projeto. Como a forma necessária do LM2596 é de tensão ajustável, foi utilizado o valor máximo da tensão para aplicá-lo de forma plena, resultando no valor de R2 de aproximadamente 27,45 $k\Omega$ e para variar a tensão no formato de potenciômetro com um valor de 28 $k\Omega$.

A seleção do Diodo (D1) depende da classificação de corrente do diodo que deve ser pelo menos 1,3 vezes maior do que a corrente máxima de carga. Além disso, se o design da fonte de alimentação necessitar suportar um curto-circuito contínuo na saída, o diodo deve ter uma classificação de corrente igual ao limite máximo de corrente do LM2596. A condição mais exigente para este diodo é uma sobrecarga ou condição de saída em curto-circuito. Devido à sua velocidade de comutação rápida e baixa queda de tensão direta, os diodos Schottky fornecem o melhor desempenho e eficiência. Neste projeto, um diodo Schottky 1N5825 de 5 A e 40 V pode ser uma boa escolha. A classificação de 5 A do diodo é mais do que adequada e não será sobrecarregado, mesmo em uma saída em curto.

Para tensões de saída superiores a aproximadamente 10 V, é necessário um capacitor adicional, chamado Capacitor *Feedforward* (C_{FF}). O capacitor de compensação geralmente varia entre 100 pF e 33 nF, é conectado em paralelo com o resistor de ajuste da tensão de saída, R2. Ele proporciona estabilidade adicional para altas tensões de saída, baixas tensões de entrada ou saída, ou para capacitores de saída com ESR muito baixo, como os capacitores sólidos de tântalo. Calcule o valor de (C_{FF}) com a Equação 3.3.

$$C_{FF} = \frac{1}{31 * 10^3 * R2} \quad (3.3)$$

O valor de (C_{FF}), obtido com o R2 de 28 $k\Omega$ fornecido pela 3.2, obtém o valor de aproximadamente 1 nF. Este tipo de capacitor pode ser cerâmico, plástico, mica prata, etc.

3.2 Desenvolvimento do Protótipo

Durante o desenvolvimento do protótipo, foi necessário utilizar softwares de simulação, como o *LTspice*, para analisar o comportamento do circuito antes da montagem física. Além disso, recorreu-se a softwares de design para a construção da placa de circuito impresso (PCB), como o *KiCad* e o *EasyEDA*, garantindo um layout otimizado e funcional para o projeto final.

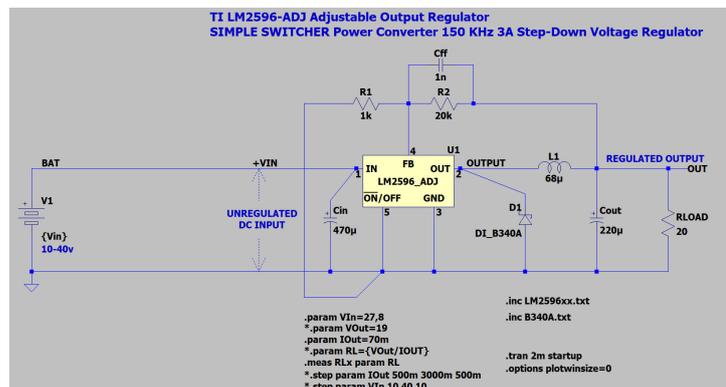
3.2.1 Elaboração da Simulação

Para o desenvolvimento do protótipo, foi necessário realizar simulações prévias para analisar o desempenho do sistema com os componentes projetados, garantindo que eles fossem capazes de fornecer uma resposta constante e estável. Um dos pontos críticos foi avaliar o comportamento do regulador de tensão do LM2596.

O único software que possuía uma biblioteca específica e compatível com o modelo do LM2596 foi o *LTspice*, o que o tornou essencial para essa etapa do desenvolvimento. Além de reproduzir melhor o modelo do CI, o *LTspice* foi fundamental para simular e prever o comportamento do sistema em diferentes condições de operação, permitindo ajustes e validações antes da implementação física.

Este circuito ilustrado na Figura 11 é um regulador de tensão ajustável LM2596 configurado como um conversor *buck* projetado para reduzir uma tensão de entrada não regulada para uma saída regulada com uma corrente máxima de 3 A. O circuito é alimentado pela fonte de entrada (V1), que fornece tensões de 10 V a 40 V. Os cinco pinos principais do regulador de tensão LM2596 são: IN (tensão de entrada), FB (*feedback*), usado para controle de saída), OUT (saída regulada), ON/OFF (ativação) e GND (terra). C_{in} (470 μ F) atua como um filtro de ruído na entrada, enquanto C_{out} (220 μ F) reduz a ondulação na saída.

Figura 11 – Circuito do regulador de tensão ajustável LM2596 no *LTspice*



Fonte: Autoral (2024).

O indutor $L1$ (68 μ H) trabalha com o regulador para transferir energia de forma eficiente, enquanto o diodo Schottky (D1) conduz corrente durante o ciclo de desligamento do MOSFET interno. Uma rede *feedback* composta por resistores $R1$ (1 $k\Omega$), $R2$ (20 $k\Omega$) e capacitor C_{FF} (1 nF) regula a tensão de saída e melhora a estabilidade do circuito. A carga, representada por R_{LOAD} (20 Ω), consome a energia regulada na saída. Essa carga foi escolhida para ser possível uma melhor representação da corrente, com um valor maior, do indutor, resultando no *ripple* mais visual.

Os parâmetros definidos para simulação incluem V_{in} (tensão de entrada), V_{out} (tensão de saída de 19 V) e I_{out} (corrente da carga, variando de 70 mA até 3 A em passos de 500 mA). Os comandos *LTspice* configuram a simulação para avaliar o desempenho do circuito, como a estabilidade da saída e a eficiência do regulador. Os arquivos de modelo *SPICE* para o LM2596 e o diodo Schottky são incluídos para simular o comportamento realista dos componentes. Este circuito é utilizado para conversão de tensão, estabilização da saída e avaliação de desempenho em diferentes condições de entrada e carga.

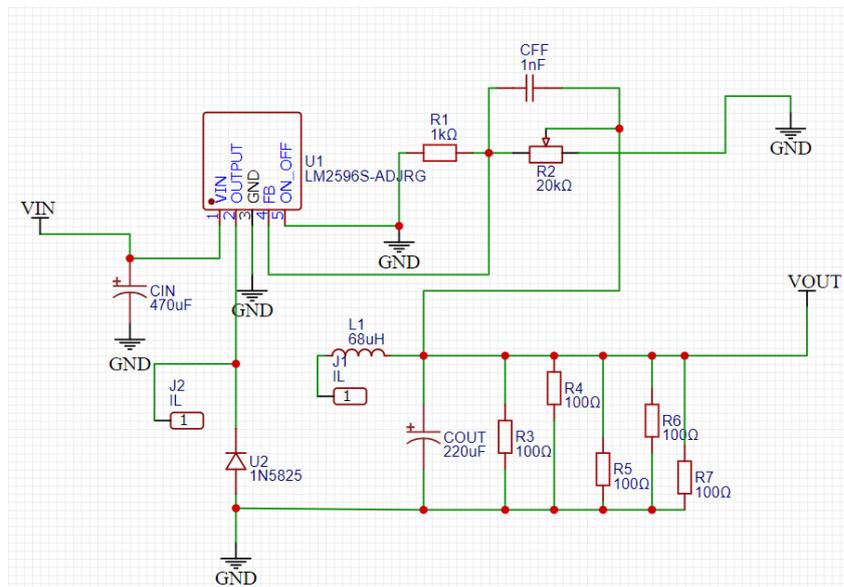
3.2.2 Construção do *Layout* da PCB

Para a construção do design da placa de circuito impresso (PCB), foi utilizado o software *KiCad* e o *EasyEDA*, garantindo a elaboração do módulo do regulador de tensão ajustável com o LM2596, bem como a integração dos componentes externos. O layout foi projetado para distribuir corretamente as trilhas de corrente, minimizar ruídos e garantir a eficiência elétrica e térmica do circuito, resultando em uma montagem compacta e funcional.

3.2.2.1 Plataforma *EasyEDA*

O *EasyEDA* é uma plataforma online gratuita para desenvolver o design e simulação de circuitos eletrônicos, além da construção da PCB. Além do design da placa, essa plataforma oferece o serviço de confecção dela e envio para seus clientes. A plataforma possibilita a criação do design da sua placa, o envio do arquivo Gerber para a produção e, posteriormente, o recebimento da placa pronta. A *EasyEDA* possui uma biblioteca de componentes eletrônicos, com modelos disponíveis para uso em projetos de circuitos. Além disso, oferece componentes de fabricantes conhecidos, como Texas Instruments, Microchip, Analog Devices, entre outros.

Figura 12 – Circuito do regulador de tensão ajustável LM2596 no *EasyEDA*



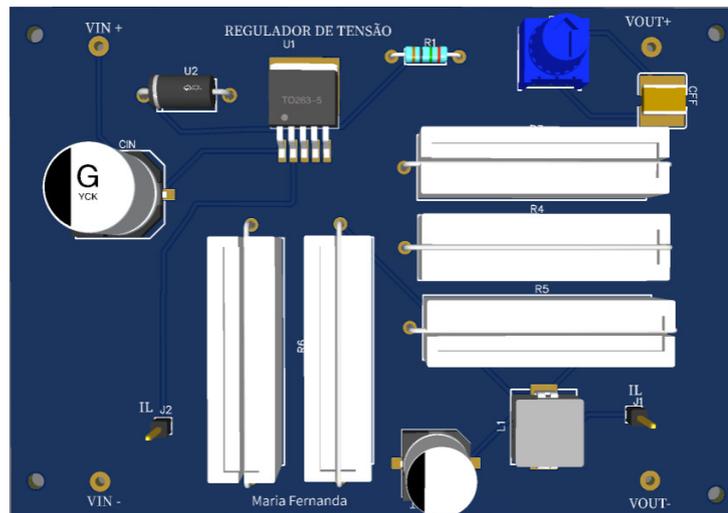
Fonte: Autoral (2024).

Na Figura 12 é apresentado um circuito regulador de tensão utilizando o CI LM2596S, que é um conversor CC do tipo *buck* (*step-down*), projetado para reduzir a tensão de entrada (V_{IN}) para uma tensão de saída ajustável (V_{OUT}). O CI possui cinco pinos principais: IN (entrada de tensão), OUT (saída de tensão regulada), GND (terra), FB (*feedback* para ajustar a saída) e ON/OFF (habilitação do regulador). O capacitor de entrada C_{in} ($470 \mu\text{F}$), o indutor L1 ($68 \mu\text{H}$) e o diodo Schottky U2 (1N5825). O capacitor de saída C_{OUT} ($220 \mu\text{F}$) e o capacitor C_{FF} (1 nF). Além disso, os resistores R1 ($1 \text{ k}\Omega$) e R2 ($20 \text{ k}\Omega$) variáveis, com valor menor que o do

projeto devido à disponibilidade da plataforma. Os resistores R3 a R7 ($100\ \Omega$ cada), conectados em paralelo, simulam uma carga conectada na saída, com a resistência equivalente de $20\ \Omega$. A entrada do indutor com o CI no pino V_{IN} está aberta para possibilitar a leitura da corrente e, assim, visualizar o *ripple* da corrente.

Na Figura 13 é ilustrada a visualização da PCB do módulo regulador de tensão projetado em 3D. Os nomes dos componentes estão de acordo com o esquemático da Figura 12. É possível observar o regulador U1 (TO-263-5) centralizado e conectado por trilhas largas para minimizar resistência e quedas de tensão. O potenciômetro azul R2, próximo ao resistor R1, de fácil acesso, permite ajustes da tensão de saída ao interagir com o divisor resistivo. Os resistores (R3, R4, R5, R6 e R7) estão organizados linearmente, configurados em paralelo, resultando na carga. Os capacitores C_{IN} e C_{FF} estão próximos ao regulador, garantindo filtragem de ruído e estabilidade, enquanto o diodo U2 protege contra polaridade reversa.

Figura 13 – Visualização do *Layout* da PCB do módulo regulador de tensão em 3D



Fonte: Autoral (2024).

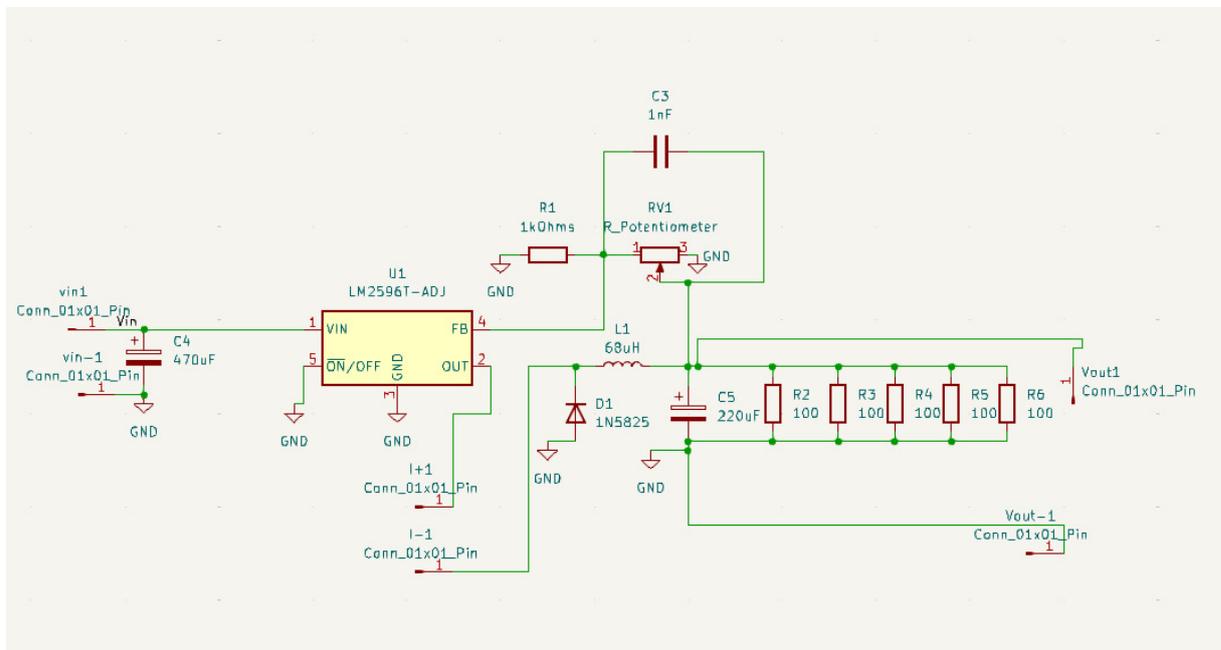
O capacitor de saída (C_{OUT}) está posicionado para suavizar *ripples* e estabilizar a tensão de saída, trabalhando em conjunto com o indutor L1 para reduzir ruídos, o que sugere uma topologia de conversor CC. Os conectores de entrada ($V_{IN+/-}$) e saída ($V_{OUT+/-}$) estão separados nos extremos da placa, reduzindo interferências e facilitando a conexão. O terminal IL possibilita o monitoramento da corrente. A PCB apresenta áreas de cobre amplas, serigrafia e posicionamento para dissipação térmica e redução de interferências. Além disso, inclui o nome do projeto e o autor.

A PCB construída com este módulo possui duas camadas, uma camada superior e uma inferior, e conta com vias e microvias, que estão presentes apenas em algumas das camadas. Os planos de terra, tensões elétricas e a interconexão dos sinais estão localizados nas camadas internas da placa.

3.2.2.2 Software KiCad

O *KiCad* 8.0 foi utilizado para a confecção da PCB temporária do módulo do regulador de tensão. Esse software é útil para a criação de design de *layout* de PCB de forma gratuita, permitindo desenhar o *layout* da placa, posicionar os componentes e criar trilhas nela. Ele oferece ferramentas de roteamento de trilhas e verificação de conflitos, além de permitir a geração de arquivo Gerber para fabricação da PCB. O *KiCad* conta com bibliotecas de componentes padrão, mas é possível a criação e importação de novas bibliotecas. Outrossim, permite a visualização 3D, possibilitando ao usuário observar o projeto de diferentes ângulos e identificar possíveis erros.

Figura 14 – Circuito do regulador de tensão ajustável LM2596 no *KiCad*

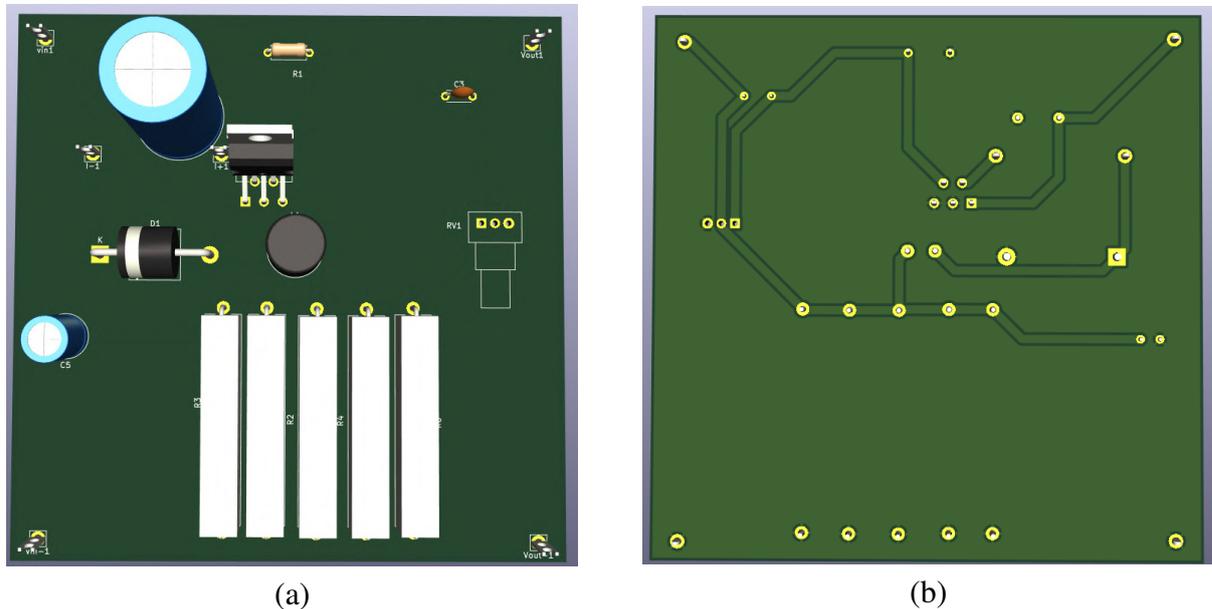


Fonte: Autoral (2024).

De forma similar ao circuito projetado pelo *EasyEDA* na Figura 12, a Figura 14 apresenta um circuito regulador de tensão utilizando o CI LM2596S, que é um conversor CC do tipo *buck* (*step-down*), projetado para reduzir a tensão de entrada (V_{IN}) para uma tensão de saída ajustável (V_{OUT}). A entrada de tensão (V_{IN}) está conectada ao pino 1 do LM2596T, e é estabilizada pelo capacitor $C4$ (C_{IN}) de $470 \mu\text{F}$. O pino 3 (GND) do regulador está conectado ao terra. A saída regulada (V_{OUT}) é fornecida pelo pino 2 do LM2596T e passa pelo capacitor $C5$ (C_{OUT}) de $220 \mu\text{F}$, e pelo indutor $L1$ de $68 \mu\text{H}$. O divisor de tensão, formado pelo resistor $R1$ ($1 \text{ k}\Omega$) e pelo potenciômetro $RV1$, está conectado ao pino 4 (FB) do LM2596T. O capacitor de *feedforward* ($C3$, 1 nF) está posicionado próximo ao resistor $R1$. O pino 5 (ON/OFF) está aterrado, mantendo o regulador sempre habilitado. Além disso, um diodo Schottky ($D1 - 1\text{N}5825$) está conectado entre o lado positivo do indutor e o terra. Resistores de carga ($R2$ a $R6$, 100Ω cada) estão conectados à saída para simular uma carga conectada. A entrada do indutor com o CI no pino V_{IN} está aberta

para possibilitar a leitura da corrente e, assim, visualizar o *ripple* da corrente.

Figura 15 – Visualização do *layout* do módulo regulador de tensão em 3D: a) vista superior da PCB, b) vista inferior da PCB.



Fonte: Autoral (2024).

Na Figura 15 é apresentada a visualização da PCB do módulo regulador de tensão projetado em 3D, mostra a correspondência entre a parte elétrica (trilhas) e a montagem física dos componentes. Os nomes dos componentes estão de acordo com o esquemático da Figura 14. Na Figura 15 a) está ilustrada a visão superior do projeto, com os componentes montados na PCB em formato 3D. O regulador LM2596T-ADJ está no centro, conectado aos capacitores de entrada (C4, 470 μ F) e saída (C5, 220 μ F), que filtram ruídos e estabilizam a tensão. O indutor L1 e o diodo Schottky D1 (1N5825) também estão posicionados próximos ao regulador. Os resistores de carga (R2 a R6, 100 Ω cada) estão alinhados na parte inferior direita da placa, enquanto o potenciômetro RV1 está localizado na borda direita da PCB próximo do resistor R1, que, junto ao potenciômetro, atua como divisor de tensão, que ajustar a tensão de saída. Enquanto o capacitor *feedforward* (C3, 1 nF) está próximo do resistor R1.

Na Figura 15 b) é exibido a parte inferior da PCB, com as trilhas condutoras que conectam os componentes. As trilhas são organizadas para fornecer as conexões de energia (V_{IN} , GND, V_{OUT}) e sinais de controle. Cada furo na figura corresponde a um terminal de componente que será soldado. As trilhas mais largas foram projetadas para suportar correntes mais altas, conectando os pinos de entrada (V_{IN}), saída (V_{OUT}) e terra (GND). As trilhas menores são usadas para sinais de controle, como o *feedback* (FB). A figura também mostra as conexões para componentes como o indutor (L1), o diodo (D1) e o capacitor de saída (C5). A PCB construída com este módulo possui uma única camada e conta com trilhas largas projetadas para correntes elevadas, enquanto as trilhas menores conectam os sinais de controle. Os planos de terra, as tensões elétricas e a

interconexão dos sinais estão localizados nas camadas internas da placa.

3.2.3 Validação da placa do módulo regulador de tensão

3.2.3.1 Equipamentos Utilizados

Com o protótipo da PCB finalizado e todos os componentes externos devidamente montados, foi possível realizar a verificação prática do circuito projetado para o módulo regulador de tensão. A placa contendo os circuitos de interesse para as medições e aferições foi alimentada por uma fonte de bancada contínua, ajustada para fornecer 28 V. A fonte utilizada, modelo Minipa MPL-3303 ilustrada na Figura 16, apresenta precisão, com regulação de carga de 0,01% + 3 mV.

Figura 16 – Fonte de bancada Minipa MPL-3303



Fonte: Autoral (2024).

As medições foram realizadas utilizando o osciloscópio DPO-X 3034, da *Agilent Technologies* apresentada na Figura 17, um equipamento com banda de frequências de até 100 MHz, para análises de sinais e *ripple* no circuito regulador.

Figura 17 – Osciloscópio DPO-X 3034 da *Agilent Technologies*

Fonte: Autorial (2024).

Adicionalmente, para monitorar a corrente consumida pelo circuito durante os testes, foi utilizada o alicate amperímetro ou sonda de corrente *Keysight 1146B*, conforme apresentado na Figura 18. Esta sonda de corrente CA/CC proporciona exibição e medição precisas de correntes de até 100 A (CC ou pico CA) e opera na faixa de DC a 100 kHz, sem a necessidade de interromper o circuito. O modelo 1146B é indicado para capturar sinais de corrente transitórios, como os encontrados em reguladores chaveados, permitindo também a análise do *ripple* da corrente.

Figura 18 – Alicates amperímetro *Keysight 1146B*

Fonte: Autorial (2024).

4 Resultados

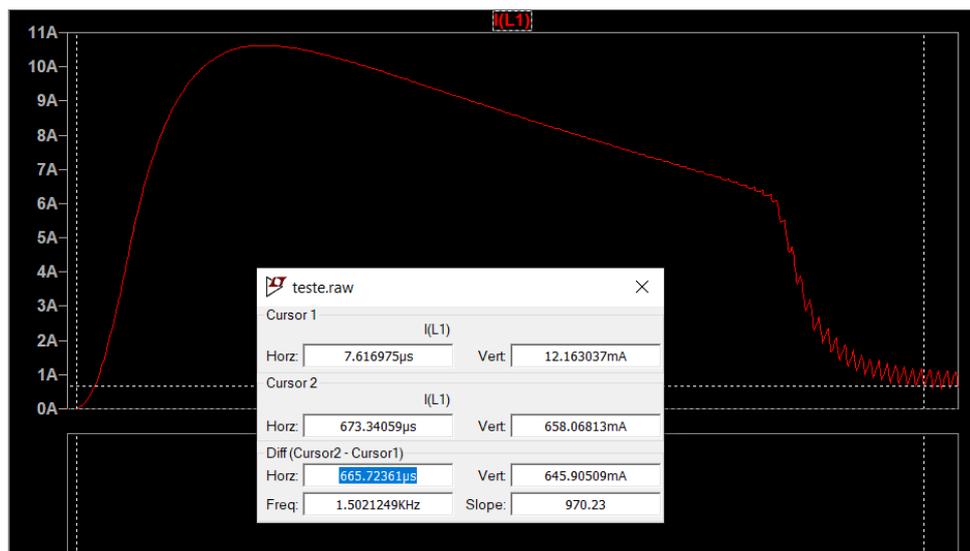
Neste capítulo, são apresentados os resultados alcançados durante todo o trabalho, bem como uma discussão e comparação com os resultados obtidos nas simulações e nos testes empíricos, destacando a importância desta pesquisa no contexto acadêmico. Utilizando-se dos equipamentos citados no Capítulo 3, foram realizadas medições do tempo de regime transitório, além da tensão nominal de saída, da corrente no indutor e de seus respectivos *ripple*, como também o PWM no módulo do regulador.

Para ambos os resultados foram utilizados os mesmos componentes apresentados na 2 apresentados no Capítulo 3. Além do valor de tensão de entrada de 28 V e ajustado no divisor de tensão para uma saída de 20 V.

4.1 Resultados de Simulação

Na ferramenta *LTspice*, é possível realizar simulações transientes, que variam no tempo, para analisar o comportamento do circuito, além de realizar alterações diretamente na ferramenta para verificar os efeitos causados. Na Figura 19 é ilustrada a corrente transitória no indutor até seu assentamento. Observa-se que, inicialmente, a corrente se eleva, aproximadamente, em 10 A e, gradativamente, reduz até atingir seu valor de regime permanente, como resultado de um tempo de estabelecimento curto de $665,72 \mu\text{s}$.

Figura 19 – Transitório de corrente no indutor

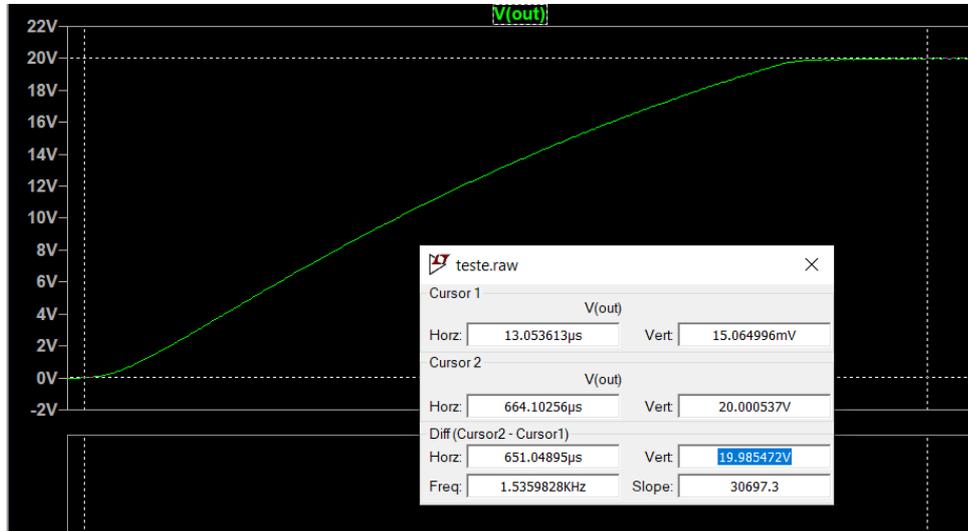


Fonte: Autoral (2024).

Na Figura 20 é apresentada a tensão transitória na saída do regulador. Observa-se a elevação da tensão até atingir seu valor de regime permanente de 20 V na saída, com um tempo

de estabelecimento curto de aproximadamente $665,72 \mu\text{s}$, próximo ao tempo de estabelecimento da corrente, definido pelo capacitor (C_{FF}) de 1 nF .

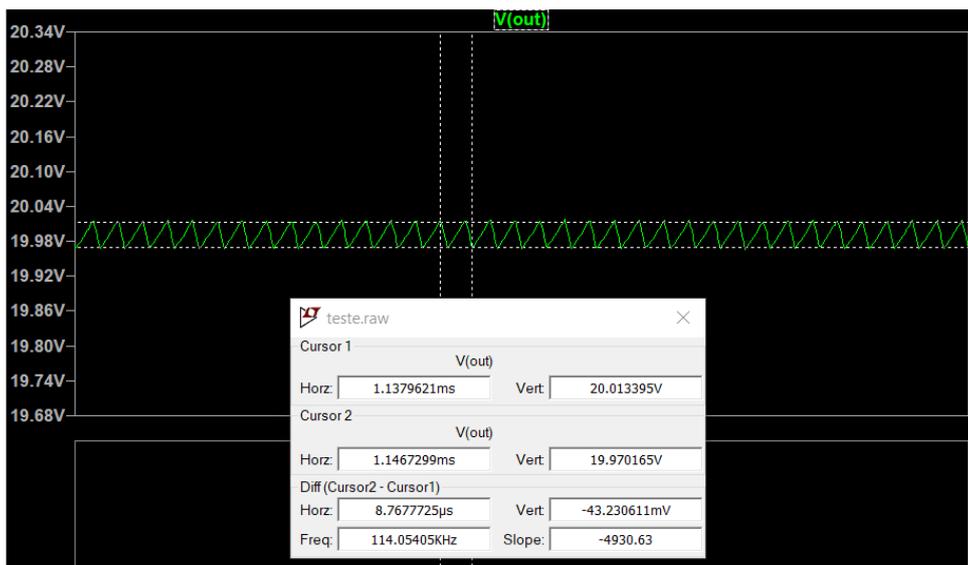
Figura 20 – Transitório da tensão de saída



Fonte: Autoral (2024).

Os dados de *ripple* também podem ser conferidos na simulação *LTspice*. Conforme mostrado na Figura 21, obtida a partir da simulação, observa-se uma tensão de *ripple* de $43,23 \text{ mV}$ pico-a-pico na saída, equivalente a $0,22\%$, conforme calculado pela Equação 2.1. Esse baixo valor deve-se ao filtro proporcionado pelo capacitor de saída.

Figura 21 – *Ripple* da tensão do indutor

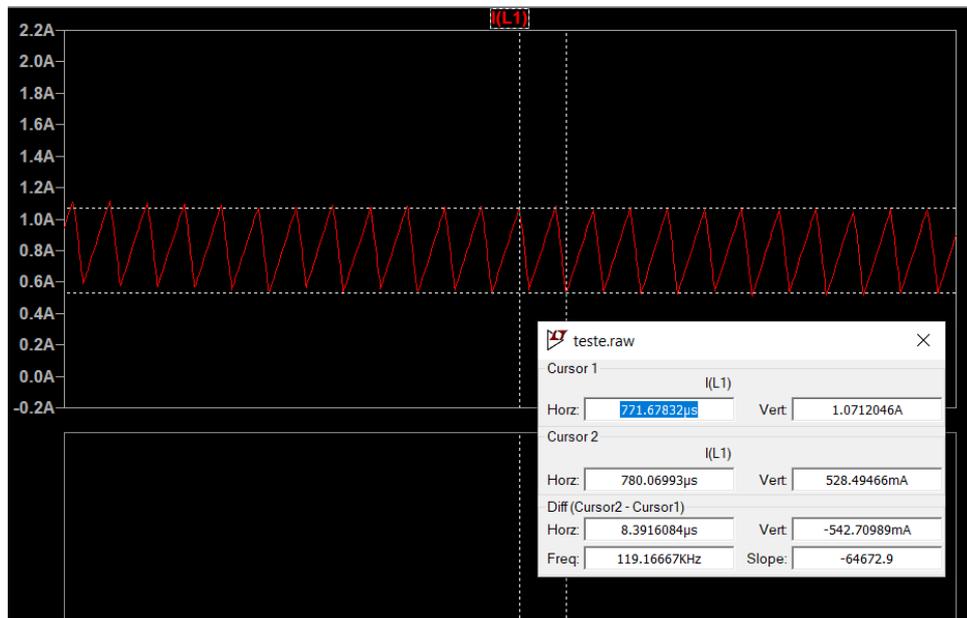


Fonte: Autoral (2024).

Além disso, é possível observar na Figura 22 uma corrente de *ripple* pico-a-pico de $542,71 \text{ mA}$ sob o indutor, com uma corrente média de aproximadamente $0,8 \text{ A}$. Para aplicações didáticas,

é um valor visível e fácil de analisar.

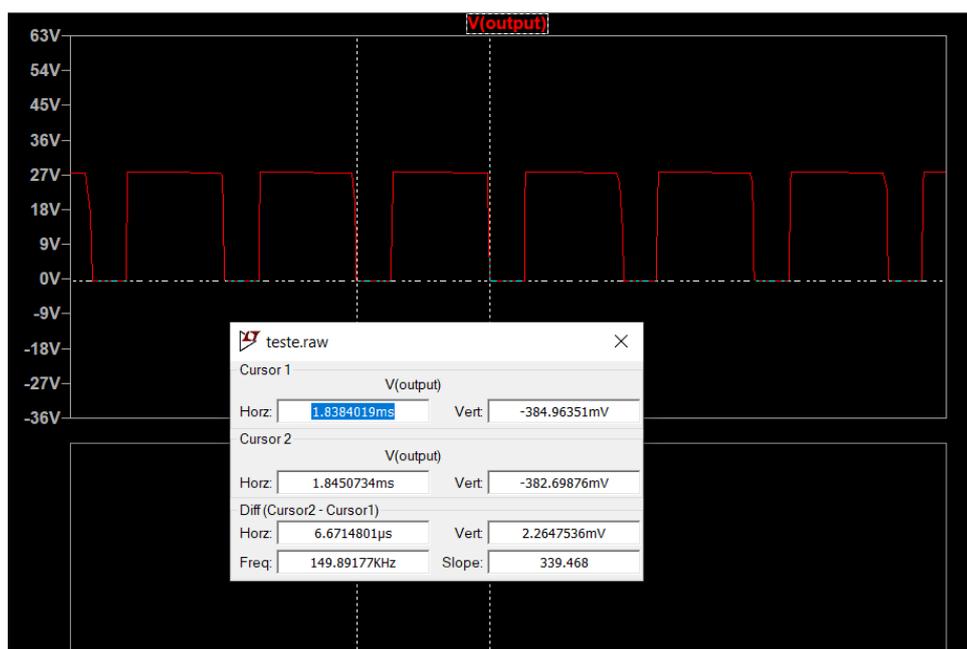
Figura 22 – *Ripple* da corrente do indutor



Fonte: Autoral (2024).

O PWM do regulador foi obtido a partir da simulação da tensão no diodo, conforme observado na Figura 23. Utilizando o tempo em que o transistor permanece ligado ($4,77 \mu s$) dentro de um período de $6,67 \mu s$, o cálculo do ciclo de trabalho pela Equação 2.3 resulta em um valor aproximado de 71,51%. Além do PWM, é apresentada na Figura a frequência de chaveamento de 150 kHz, indicando que o transistor estará ligado por 71,51% do período.

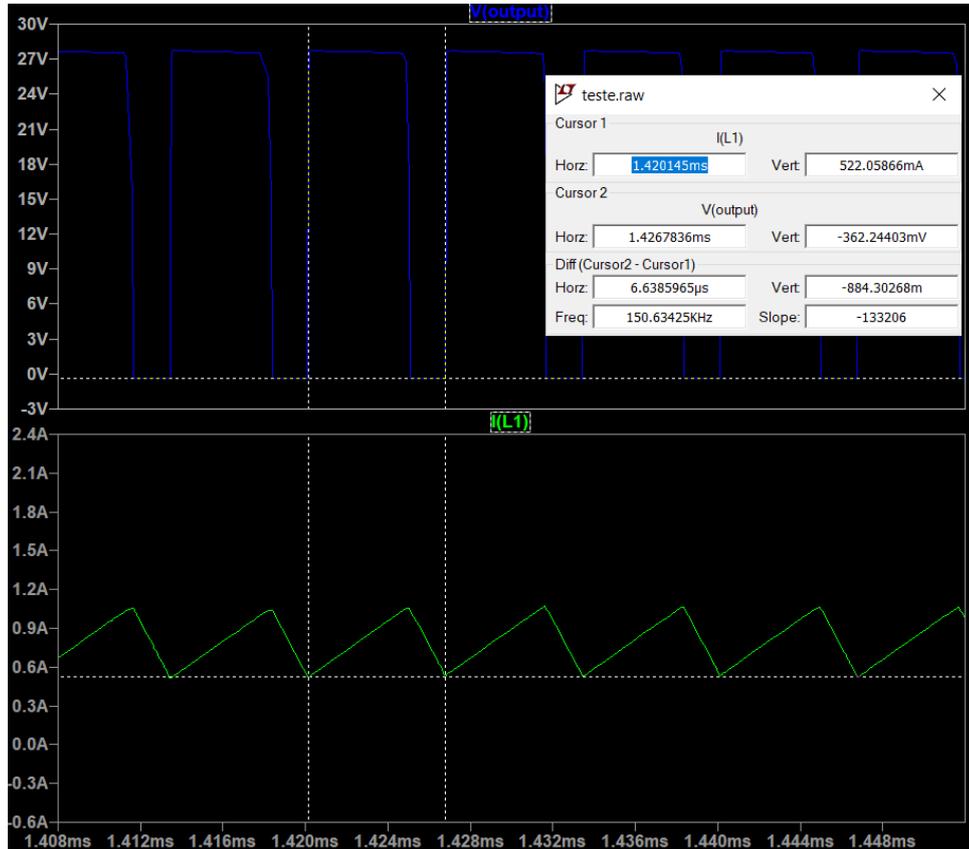
Figura 23 – PWM do regulador



Fonte: Autoral (2024).

Na Figura 24 é demonstrada a equivalência da frequência de chaveamento do *ripple* da corrente do indutor com a frequência do período do PWM. O *ripple* da corrente do indutor responde ao chaveamento do regulador; observa-se a subida gradual da corrente quando o transistor está ligado e o início do seu decaimento quando o transistor é desligado.

Figura 24 – corrente do indutor X PWM

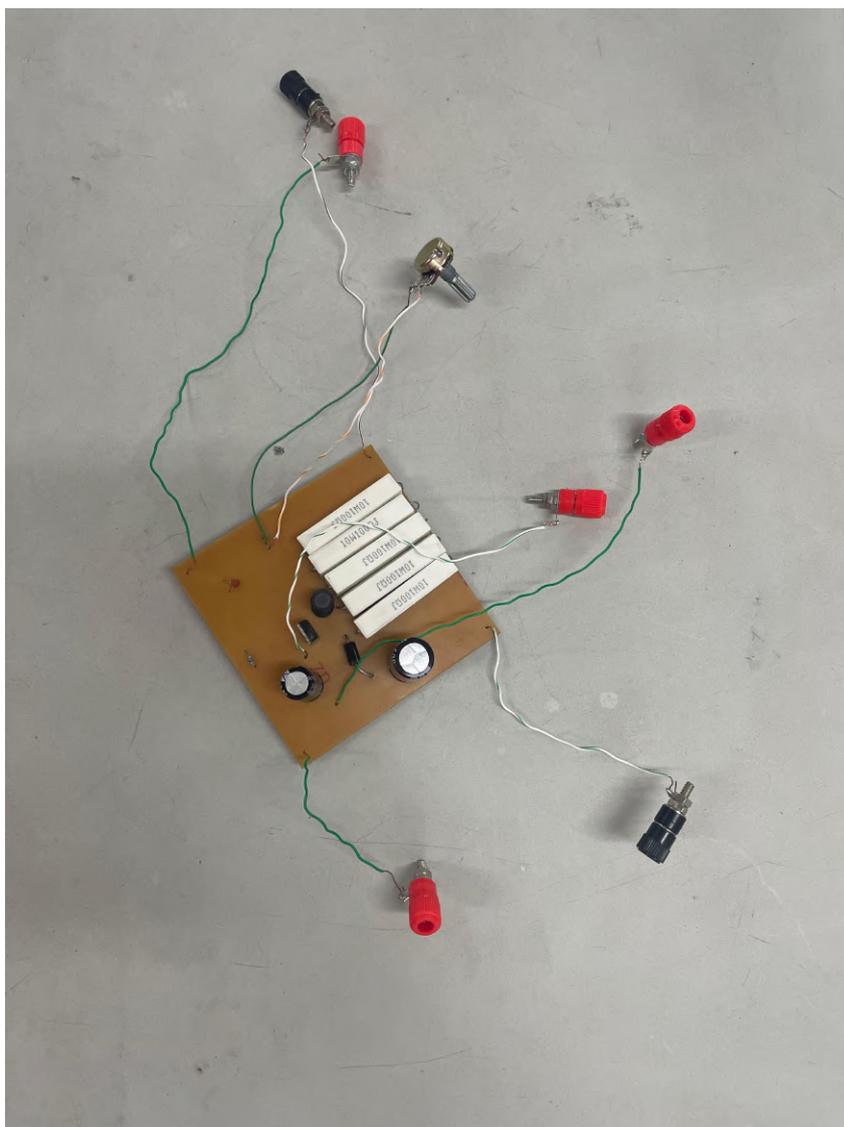


Fonte: Autoral (2024).

4.2 Resultados Experimentais

A Figura 25 destaca o circuito do módulo regulador de tensão chaveada na PCB produzida. A baixa disponibilidade do estoque do *EasyEDA*, devido à falta de alguns componentes, resultou na confecção por meio do software *KiCad*. No entanto, ficou para o próximo passo a confecção no *EasyEDA*, quando ele possuir estoque.

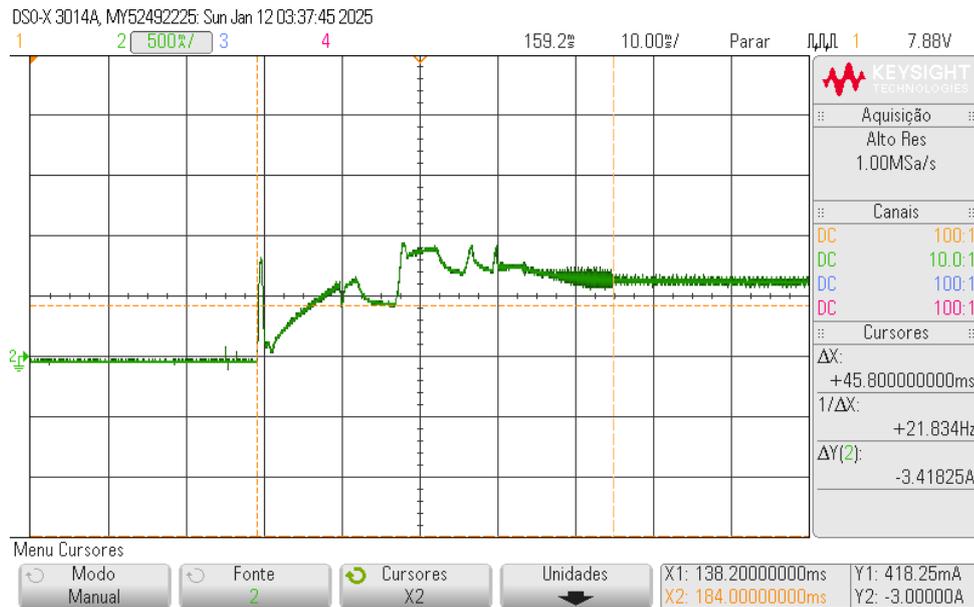
Figura 25 – Protótipo do módulo regulador de tensão



Fonte: Autoral (2024).

Para o módulo regulador LM2596, os valores a serem analisados foram obtidos por meio dos bornes conectados na entrada para a tensão de entrada, na saída para sua tensão e entre o CI e o indutor para obter sua corrente. Esses bornes ficarão disponíveis para que discentes e docentes realizem medições e análises no módulo didático fornecido.

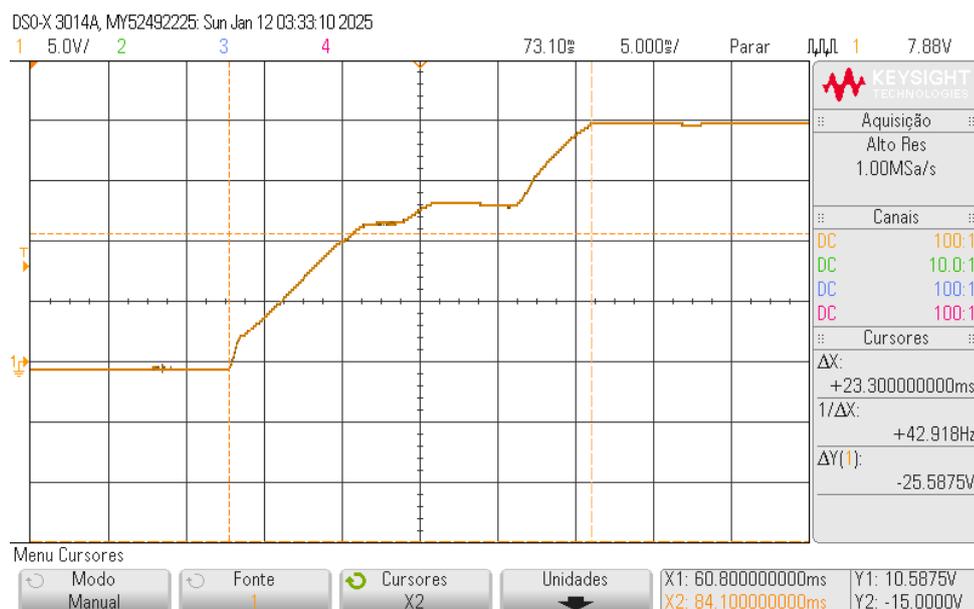
Figura 26 – Transitório da corrente no indutor do protótipo



Fonte: Autoral (2024).

Na Figura 26 é ilustrado o transitório da corrente do indutor até o seu assentamento. Observa-se um tempo de estabelecimento de 45,8 ms, maior do que o observado na Figura 19 da simulação. No entanto, há uma menor elevação de corrente inicial, o que pode ser atribuído ao tempo de estabelecimento obtido.

Figura 27 – Transitório da tensão de saída do protótipo

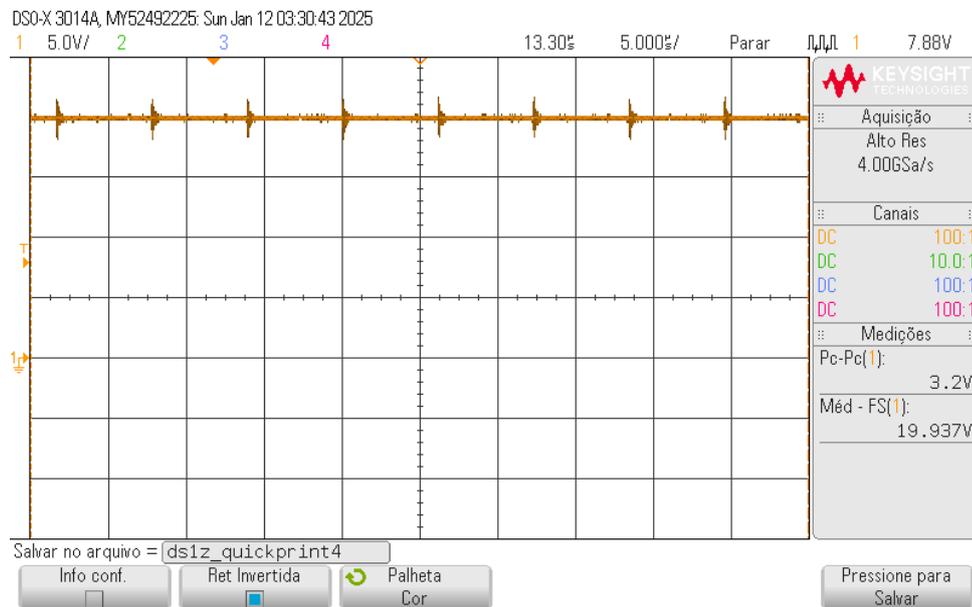


Fonte: Autoral (2024).

Na Figura 27 está ilustrado o transitório da tensão de saída até o seu assentamento. Observa-se um tempo de estabelecimento de 23,3 ms, que pode ser considerado razoável, devido

às condições específicas do circuito e externas, como instabilidade da fonte, temperatura causada pelo uso e ruído de equipamentos. O valor encontra-se maior do que o observado na Figura 20 da simulação. No entanto, devido a condições empíricas, causa diferença entre ambos.

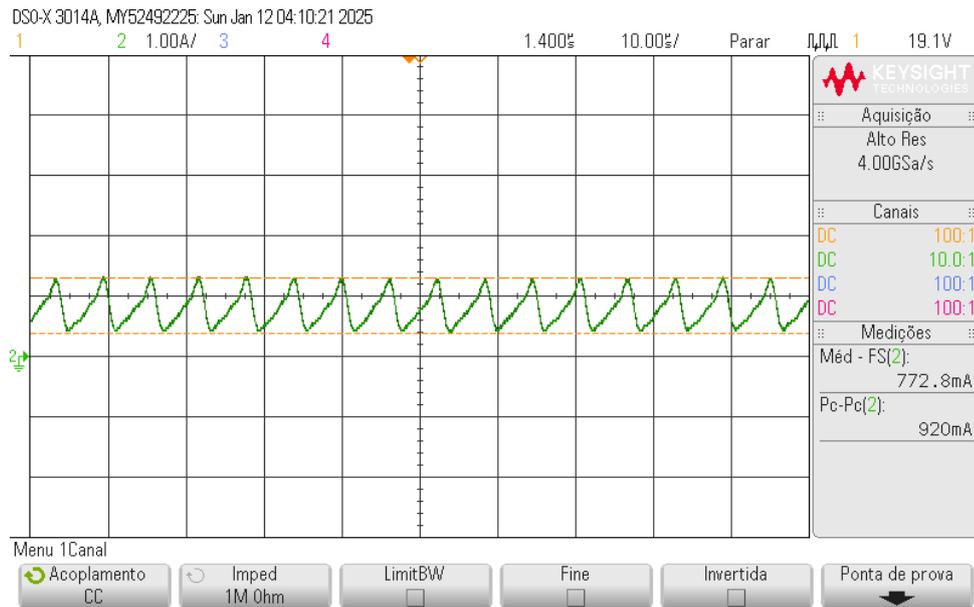
Figura 28 – *Ripple* da tensão de saída do protótipo



Fonte: Autoral (2024).

O *ripple* medido para o módulo chaveado é de 3,2 V pico a pico e o *ripple* percentual, calculado como a razão entre o valor pico a pico e a tensão de saída, é de aproximadamente 16,8%. Este valor observado no protótipo é elevado, podendo ser resolvido de diversas maneiras, como o uso de capacitores de maior qualidade, a adição de filtros para suavizar o *ripple* ou até a verificação da estabilidade da fonte de alimentação para garantir que não haja picos de ruído. O *ripple* observado no protótipo é significativamente maior do que o simulado no *LTspice*, que foi de 0,22%. Entretanto, é usual em aplicações didáticas visualizar o seu comportamento

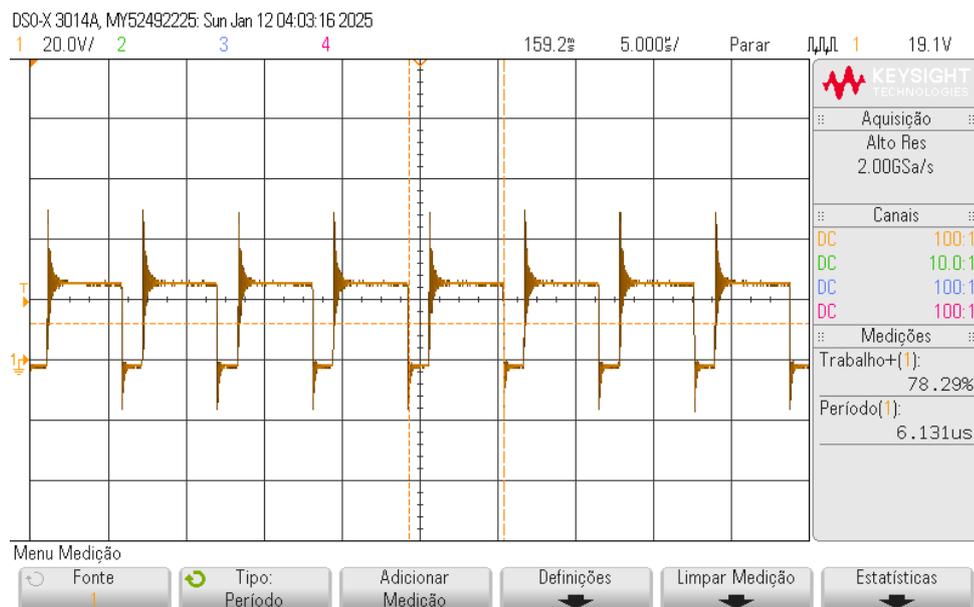
Figura 29 – *Ripple* da corrente do indutor no protótipo



Fonte: Autoral (2024).

Além disso, é possível observar na Figura 29 uma corrente de *ripple* pico a pico de 920 mA no indutor, com uma corrente média de aproximadamente 0,8 A. Esse valor é claramente visível e de fácil análise, sendo especialmente útil para aplicações didáticas.

Figura 30 – PWM do protótipo

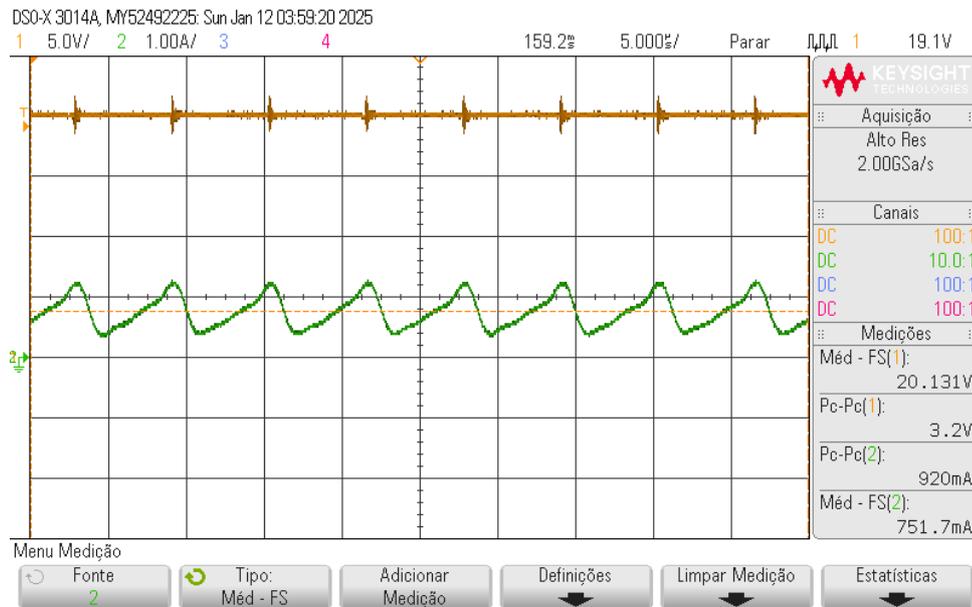


Fonte: Autoral (2024).

O controle do PWM no protótipo é realizado por meio da tensão no diodo, conforme ilustrado na Figura 30. O ciclo de trabalho apresentado pelo osciloscópio resulta em um valor de 78,29%, indicando que o transistor permanece ligado por 78,29% do período. Comparando com

o valor simulado de 71,51%, conforme mostrado na Figura 23, a diferença entre o sinal PWM observado no osciloscópio e o simulado pode ser atribuída a fatores como ruído e interferência no circuito real, características específicas do osciloscópio (como filtragem), variações nos parâmetros dos componentes reais (como tolerâncias) e a taxa de amostragem do osciloscópio.

Figura 31 – Corrente do indutor X tensão de saída



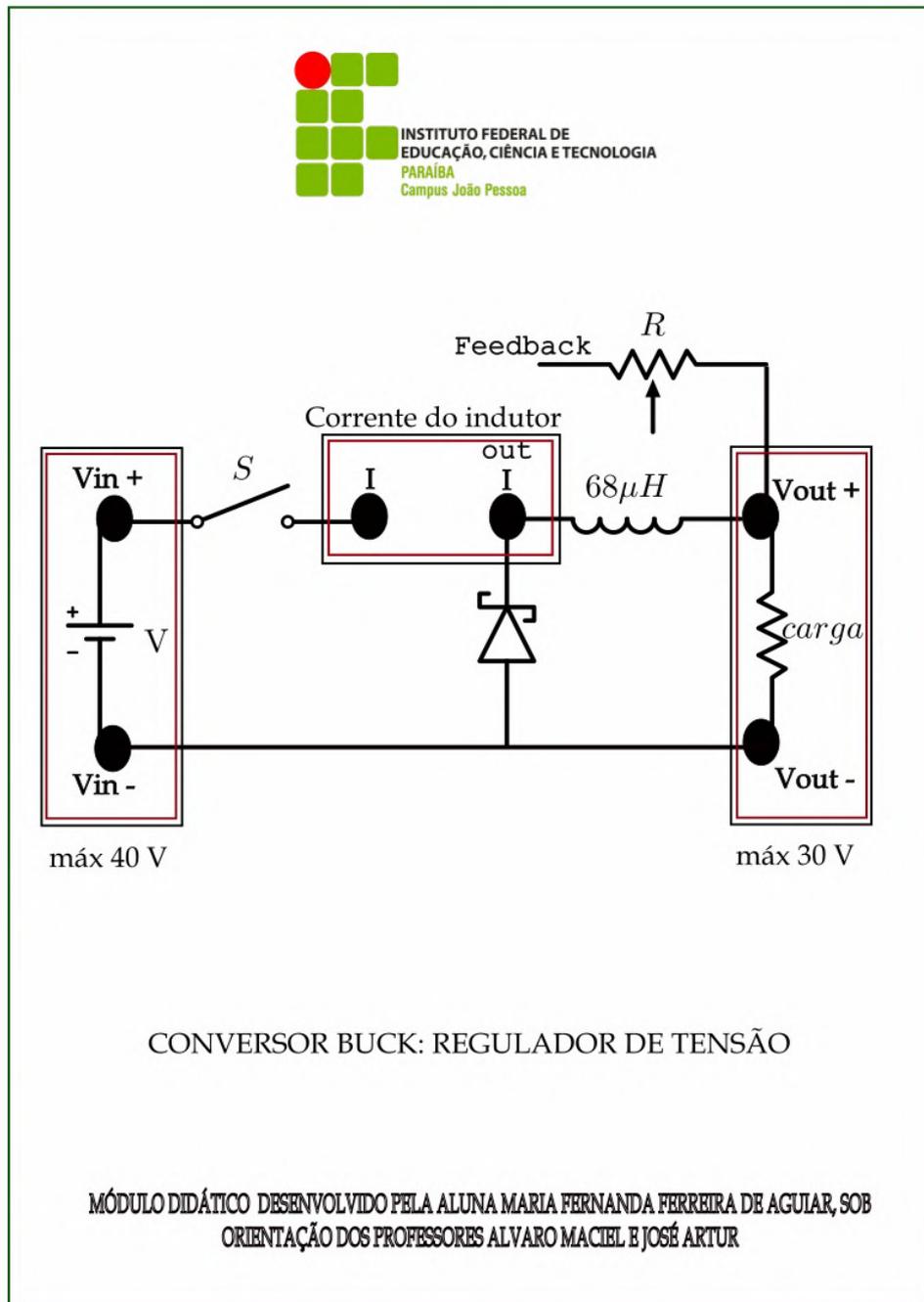
Fonte: Autoral (2024).

Na Figura 31 é apresentada a correspondência entre a frequência do *ripple* da corrente do indutor e a frequência do *ripple* da tensão de saída em um conversor de potência. O *ripple* refere-se à variação periódica na corrente ou tensão, que resulta de flutuações na operação do conversor, muitas vezes associadas ao processo de chaveamento. Observa-se que a frequência de chaveamento do *ripple* da corrente do indutor está sincronizada com a frequência do *ripple* da tensão de saída. Esse fenômeno ocorre devido ao comportamento interdependente da corrente no indutor e da tensão na carga. Quando há interferência devido ao PWM, como no caso do *ripple* da corrente afetando a tensão de saída, o valor máximo de corrente no indutor é atingido.

4.2.1 Módulo didático

Para a criação do módulo didático, foi utilizado o software *Inkscape*, uma ferramenta de editoração eletrônica voltada para a criação de imagens e documentos vetoriais. O *Inkscape* utiliza o método vetorial, onde as imagens são formadas por caminhos de pontos com coordenadas definidas, de forma transparente ao usuário. Imagens vetoriais são comumente aplicadas em desenhos técnicos e artísticos, sendo mais leves e preservando sua qualidade mesmo após transformações, ao contrário das imagens rasterizadas.

Figura 32 – Design para o módulo didático



Fonte: Autoral (2024).

Na Figura 32 é ilustrado o design desenvolvido para o módulo didático utilizando o software *Inkscape*. O diagrama ilustra o formato básico do conversor *buck*, destacando os pontos de medição da tensão de entrada, corrente do indutor e tensão de saída. Além disso, a figura inclui informações sobre o instituto responsável pelo projeto, o nome do projeto, o autor e os docentes orientadores. Devido à limitação orçamentária, ainda não foi possível realizar a confecção do suporte de acrílico conforme o design apresentado.

5 Considerações Finais

O projeto teve como objetivo o desenvolvimento de um módulo didático voltado para o curso de Engenharia Elétrica. O módulo permite a realização de aulas práticas com os experimentos mencionados anteriormente, os quais melhoram a qualidade das aulas, facilitando a retenção de conhecimento pelos discentes. A partir do próximo semestre, o módulo implementado contribuirá para o aprendizado dos discentes do Instituto Federal da Paraíba. Este projeto de diplomação estimulou o estudo e a compreensão do funcionamento interno do CI analisado, detalhando o comportamento desse componente. Por fim, este trabalho demonstrou as principais etapas de desenvolvimento relacionadas a projetos de engenharia eletrônica, abrangendo a escolha dos componentes, definição dos requisitos, projeto e simulações com o auxílio de softwares, além da implementação do projeto, sempre alinhada a boas práticas reconhecidas.

Ao longo deste trabalho, foi elaborado o projeto do módulo regulador chaveado com topologia *buck* ou rebaixadora, com o objetivo de apresentar as particularidades do módulo, como a tensão de saída, a corrente do indutor (ambas com *ripple*) e o ciclo de trabalho do PWM. A fonte chaveada rebaixadora é um regulador que utiliza transistores chaveados em alta frequência, apresentando uma tensão de saída menor que a da entrada, além de correntes mais elevadas e alta eficiência. Este trabalho apresenta uma representação mais clara da topologia de estudo, conversor CC buck, com diferentes configurações de componentes e ensaios práticos. O layout das placas projetadas foi realizado nos softwares *KiCad* e *EasyEDA*, facilitando o desenvolvimento de trabalhos futuros pelos discentes. Além disso, a simulação foi realizada com o software *LTspice*, com sua biblioteca incluída no Apêndice, para facilitar seu uso e aprimoramento.

Durante a confecção do módulo, alguns desafios foram identificados: a disponibilidade de ambiente adequado para a confecção e testes de validação da placa; a limitação de recursos financeiros; a necessidade de resistores de potência na carga para aumentar a corrente do indutor, o que, por sua vez, resultou em altas temperaturas que impactam em algumas características do regulador; dificuldades na obtenção de bibliotecas para o CI LM2596 para simulação, sendo achado para *LTspice*; e a escassez de componentes em estoque na plataforma *EasyEDA*, o que dificultou a aquisição por meio dessa plataforma.

Uma forma de aprimorar o ensino prático na instituição seria a inclusão de outros CIs para o estudo de diferentes tipos de conversores chaveados, incluindo o conversor linear, permitindo a análise e comparação de suas características. Além disso, a expansão das aplicações do módulo desenvolvido possibilitaria a implementação de diversos experimentos. A integração de outros componentes poderia melhorar os resultados obtidos no projeto, como filtros para mitigar o *ripple*, sensores e circuitos de controle, poderia melhorar a resposta e o funcionamento do regulador proporcionando aos discentes desafios práticos de Engenharia Elétrica. Além desses aprimoramentos, torna-se pendente para trabalhos futuros poderiam se concentrar na utilização da plataforma *EasyEDA* para o envio e aquisição online da PCB, além da confecção do suporte

de acrílico.

Este trabalho tem finalidade de contribuir para um melhor entendimento de conversores CC-CC chaveadas e a aplicação desses componentes em PCBs. A partir dos resultados apresentados, espera-se que os discentes compreendam as etapas de desenvolvimento de um conversor, e que este trabalho possa servir como referência para futuros projetos de natureza semelhante. Ademais, reforça-se a importância da integração entre ensino teórico e prático, essencial para a formação de engenheiros eletricitas capacitados.

Referências

- COLOMBO C. R.; SANTANA, M. J. A. Trabalhos de conclusão de curso: Um meio de fomentar um processo de ensino de engenharia baseado em pesquisa. *COBENGE - Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, Passo Fundo*, v. 34, p. 1–2, 2006. Disponível em: <https://www.abenge.org.br/cobenge/legado/arquivos/13/artigos/10_143_523.pdf>. 11
- HART, D. W. *Eletrônica de potência: análise e projetos de circuitos*. 1. ed. Porto Alegre: ANGH Editora Ltda., 2012. Título original: Power Electronics. Bibliografia incluída. ISBN 978-85-8055-045-0. 13, 14, 18
- MAZZI, L. S. *Estudo, projeto e validação de módulos reguladores de tensão*. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2024. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/274547/001197960.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. 11
- MOHAN N.; UNDELAND, T. M. R. W. P. *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. 2. ed. Nova Iorque, EUA: John Wiley & Sons, 1995. ISBN 0-471-58408-8. 15
- NIGADE, A. et al. Design of dc-dc buck converter for application in solar water pump. *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management (IJSREM)*, 2022. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Sonali-Pawar-8/publication/366191535_DESIGN_OF_DC-DC_BUCK_CONVERTER_FOR_APPLICATION_IN_SOLAR_WATER_PUMP/links/6396dd4ae42faa7e75b780e5/DESIGN-OF-DC-DC-BUCK-CONVERTER-FOR-APPLICATION-IN-SOLAR-WATER-PUMP.pdf>. 20
- POMILIO, J.A. *Fontes Chaveadas – Cap.1.: Topologias básicas de conversores cc-cc não-isolados*. 2018. Acesso em: 20 dez. 2024. Disponível em: <https://site.fee.unicamp.br/sites/default/files/uploads/antenor/apres_cc-cc_1.pdf>. 16
- RASHID, M. H. *Eletrônica de potência*. 4. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014. Título original: Power Electronics, Circuits, Devices, and Applications. Bibliografia incluída. ISBN 978-85-430-1452-4. 13, 14, 15, 16, 17, 18
- Texas Instruments. *LM2596: Simple switcher® 4.5v to 40v, 3a low component count step-down regulator*. 2023. Acesso em: 3 dez. 2024. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf?ts=1736372063826&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.mouser.com%252F>. 11, 20, 21, 22, 24, 25, 26
- WEINERT, C. C. *Aplicação do conversor cc-cc topologia cuk para o carregamento de baterias de sistemas fotovoltaicos*. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal do Paraná, PONTA GROSSA, PR, 2017. Disponível em: <https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/16942/1/PG_COAUT_2017_1_01.pdf>. 15

Apêndices

APÊNDICE A – Bibliotecas necessárias no LTspice

A.1 Lm2596xx.txt

```

* Source File: lm2596adjblk.asc,lm2596fixblk.asc
* Developer: ETech (eetech00@yahoo.com)
* Created: Mar 16 2015
* Revision: Jul 29 2019
*
* This LM2596 spice behavioural model was tested
* with LTSpice. Temperature is not modelled.
*
* Texas Instruments
* LM2596 SIMPLE SWITCHER Power Converter 150 KHz 3A Step-Down
  Voltage Regulator
*
* LM2596-3.3 3.3V Fixed Regulator
.subckt LM2596_03 _ON/OFF FB IN OUT VGND
A2 ramp erramp 0 0 0 0 pwm 0 SCHMITT Vt=0 Vh=5m Td={TD} TRISE={
  TRISE} Vhigh={HIGH} VLow={LOW}
VIOUTN VGND outn 0
XX3 IN startup reg outn sense regblk params: TRISE={TRISE} VTSU
  ={VTSU} VTRISE={VTRISE} HIGH={HIGH} LOW={LOW} Td={TD}
XX4 clk dutymax ramp startup oscdclimiterblk params: TRISE={
  TRISE} VTSU={VTSU} VTRISE={VTRISE} HIGH={HIGH} LOW={LOW} Td
  ={TD}
XX5 pwm dutymax 0 ilimit 0 clk 0 0 0 0 NC_03 q latchblk params:
  TRISE={TRISE} VTSU={VTSU} VTRISE={VTRISE} HIGH={HIGH} LOW={
  LOW} Td={TD}
XX7 q sw OUT switcherblk
XX8 fbin outn erramp errampblk params: TRISE={TRISE} VTSU={VTSU
  } VTRISE={VTRISE} HIGH={HIGH} LOW={LOW} Td={TD}
V1 leb 0 PULSE(-2.5 2.5 {VTSU} {VTRISE} 1n 1k) Rser=0.001
XX1 _ON/OFF outn IN NC_04 startup startupblk4 params: TRISE={

```

```

    TRISE} VTSU={VTSU} VTRISE={VTRISE} HIGH={HIGH} LOW={LOW} Td
    ={TD}
XX2 sense sw ilimit leb currentlimiterblk2 params: TRISE={TRISE
    } VTSU={VTSU} VTRISE={VTRISE} ILIMIT={ILIMIT} HIGH={HIGH}
    LOW={LOW} Td={TD}
R1 fbin VGND 2.5k
R2 FB fbin 4.2k
.param TD=8n
.param TRISE=1n
.param SDLOW=0.60
.param SDHIGH=1.30
.param HIGH=2.5
.param LOW=100m
.param VTINI=0
.param VTON=1
.param VTSU=0u
.param VTRISE=1u
.param SR=0.01
.param ILIMIT=4.5
.ends LM2596_03

* LM2596-5.0 5.0V Fixed Regulator
.subckt LM2596_05 _ON/OFF FB IN OUT VGND
A2 ramp erramp 0 0 0 0 pwm 0 SCHMITT Vt=0 Vh=5m Td={TD} TRISE={
    TRISE} Vhigh={HIGH} VLow={LOW}
VIOUTN VGND outn 0
XX3 IN startup reg outn sense regblk params: TRISE={TRISE} VTSU
    ={VTSU} VTRISE={VTRISE} HIGH={HIGH} LOW={LOW} Td={TD}
XX4 clk dutymax ramp startup oscdclimiterblk params: TRISE={
    TRISE} VTSU={VTSU} VTRISE={VTRISE} HIGH={HIGH} LOW={LOW} Td
    ={TD}
XX5 pwm dutymax 0 ilimit 0 clk 0 0 0 0 NC_03 q latchblk params:
    TRISE={TRISE} VTSU={VTSU} VTRISE={VTRISE} HIGH={HIGH} LOW={
    LOW} Td={TD}
XX7 q sw OUT switcherblk
XX8 fbin outn erramp errampblk params: TRISE={TRISE} VTSU={VTSU}
    } VTRISE={VTRISE} HIGH={HIGH} LOW={LOW} Td={TD}
V1 leb 0 PULSE(-2.5 2.5 {VTSU} {VTRISE} 1n 1k) Rser=0.001
XX1 _ON/OFF outn IN NC_04 startup startupblk4 params: TRISE={

```

```

    TRISE} VTSU={VTSU} VTRISE={VTRISE} HIGH={HIGH} LOW={LOW} Td
    ={TD}
XX2 sense sw ilimit leb currentlimiterblk2 params: TRISE={TRISE
    } VTSU={VTSU} VTRISE={VTRISE} ILIMIT={ILIMIT} HIGH={HIGH}
    LOW={LOW} Td={TD}
R1 fbin VGND 2.5k
R2 FB fbin 7.5k
.param TD=8n
.param TRISE=1n
.param SDLOW=0.60
.param SDHIGH=1.30
.param HIGH=2.5
.param LOW=100m
.param VTINI=0
.param VTON=1
.param VTSU=0u
.param VTRISE=1u
.param SR=0.01
.param ILIMIT=4.5
.ends LM2596_05

* LM2596-12 12V Fixed Regulator
.subckt LM2596_12 _ON/OFF FB IN OUT VGND
A2 ramp erramp 0 0 0 0 pwm 0 SCHMITT Vt=0 Vh=5m Td={TD} TRISE={
    TRISE} Vhigh={HIGH} VLow={LOW}
VIOUTN VGND outn 0
XX3 IN startup reg outn sense regblk params: TRISE={TRISE} VTSU
    ={VTSU} VTRISE={VTRISE} HIGH={HIGH} LOW={LOW} Td={TD}
XX4 clk dutymax ramp startup oscdclimiterblk params: TRISE={
    TRISE} VTSU={VTSU} VTRISE={VTRISE} HIGH={HIGH} LOW={LOW} Td
    ={TD}
XX5 pwm dutymax 0 ilimit 0 clk 0 0 0 0 NC_03 q latchblk params:
    TRISE={TRISE} VTSU={VTSU} VTRISE={VTRISE} HIGH={HIGH} LOW={
    LOW} Td={TD}
XX7 q sw OUT switcherblk
XX8 fbin outn erramp errampblk params: TRISE={TRISE} VTSU={VTSU}
    } VTRISE={VTRISE} HIGH={HIGH} LOW={LOW} Td={TD}
V1 leb 0 PULSE(-2.5 2.5 {VTSU} {VTRISE} 1n 1k) Rser=0.001
XX1 _ON/OFF outn IN NC_04 startup startupblk4 params: TRISE={

```

```

    TRISE} VTSU={VTSU} VTRISE={VTRISE} HIGH={HIGH} LOW={LOW} Td
    ={TD}
XX2 sense sw ilimit leb currentlimiterblk2 params: TRISE={TRISE
    } VTSU={VTSU} VTRISE={VTRISE} ILIMIT={ILIMIT} HIGH={HIGH}
    LOW={LOW} Td={TD}
R1 fbin VGND 2.5k
R2 FB fbin 21.8k
.param TD=8n
.param TRISE=1n
.param SDLOW=0.60
.param SDHIGH=1.30
.param HIGH=2.5
.param LOW=100m
.param VTINI=0
.param VTON=1
.param VTSU=0u
.param VTRISE=1u
.param SR=0.01
.param ILIMIT=4.5
.ends LM2596_12

* LM2596-ADJ Adjustable Regulator
.subckt LM2596_ADJ _ON/OFF FB IN OUT VGND
A2 ramp erramp 0 0 0 0 pwm 0 SCHMITT Vt=0 Vh=5m Td={TD} TRISE={
    TRISE} Vhigh={HIGH} VLow={LOW}
VIOUTN VGND outn 0
XX3 IN startup reg outn sense regblk params: TRISE={TRISE} VTSU
    ={VTSU} VTRISE={VTRISE} HIGH={HIGH} LOW={LOW} Td={TD}
XX4 clk dutymax ramp startup oscdclimiterblk params: TRISE={
    TRISE} VTSU={VTSU} VTRISE={VTRISE} HIGH={HIGH} LOW={LOW} Td
    ={TD}
XX5 pwm dutymax 0 ilimit 0 clk 0 0 0 0 NC_03 q latchblk params:
    TRISE={TRISE} VTSU={VTSU} VTRISE={VTRISE} HIGH={HIGH} LOW={
    LOW} Td={TD}
XX7 q sw OUT switcherblk
XX8 FB outn erramp errampblk params: TRISE={TRISE} VTSU={VTSU}
    VTRISE={VTRISE} HIGH={HIGH} LOW={LOW} Td={TD}
V1 leb 0 PULSE(-2.5 2.5 {VTSU} {VTRISE} 1n 1k) Rser=0.001
XX1 _ON/OFF outn IN NC_04 startup startupblk4 params: TRISE={

```

```

    TRISE} VTSU={VTSU} VTRISE={VTRISE} HIGH={HIGH} LOW={LOW} Td
    ={TD}
XX2 sense sw ilimit leb currentlimiterblk2 params: TRISE={TRISE
    } VTSU={VTSU} VTRISE={VTRISE} ILIMIT={ILIMIT} HIGH={HIGH}
    LOW={LOW} Td={TD}
.param TD=8n
.param TRISE=1n
.param SDLOW=0.60
.param SDHIGH=1.30
.param HIGH=2.5
.param LOW=100m
.param VTINI=0
.param VTON=1
.param VTSU=0u
.param VTRISE=1u
.param SR=0.01
.param ILIMIT=4.5
.ends LM2596_ADJ

.subckt regblk in ena reg vgnd sw
S1 reg_out reg start 0 SW
V1 in input 0
B1 N001 0 V=V(1)*IF(V(i_in)<360uA,{LOW},{HIGH}) ic=0
C2 10 0 100p
R1 N001 10 100
A1 0 N001 0 ena 0 0 start 0 AND Td={TD} Trise={TRISE} VHigh={
    HIGH} VLow={LOW}
R2 ena 0 1e8
V2 1 0 PULSE({VTINI} {VTON} {VTSU} {VTRISE} 1n 1k)
G1 0 i_in input vgnd 1
R3 i_in 0 10k
V3 reg_out 0 PULSE(-2.5 2.5 {VTSU} {VTRISE} 1n 1k)
B2 input vgnd I=V(1)*85uA
R4 reg 0 1e8
S2 input sw start 0 SW
.model SW SW(Roff=1G Ron=.001 Vt=1.25 Vh=-10m)
.param TD=2n
.param TRISE=1n

```

```

.param HIGH=2.5
.param LOW=1u

.param VTINI=0
.param VTON=1
.param VTSU=0
.param VTRISE=1n
.param SR=0.01
.ends regblk

.subckt oscdclimiterblk clk dcmx ramp ena
VCLK clock 0 PULSE({LOW} {HIGH} 0 1N 1N 10N {PERIOD})
VRAMP sawtooth 0 PULSE({VV} {VP} 0 {PERIOD-2N} 1N 1N {PERIOD})
VDUTY maxdc 0 PULSE({LOW} {HIGH} {PERIOD*DUTYMAX} 1N 1N {(
    PERIOD-PERIOD*DUTYMAX)-2N} {PERIOD})
B1 clk 0 V=V(1)*if(V(ENA)>{HIGH}*0.5, V(clock),{LOW})
B2 ramp 0 V=V(1)*if(V(ENA)>{HIGH}*0.5, V(sawtooth),{LOW})
B3 dcmx 0 V=V(1)*if(V(ENA)>{HIGH}*0.5, V(maxdc),{LOW})
R1 clk 0 1e8
R2 ramp 0 1e8
R3 dcmx 0 1e8
V1 1 0 PULSE({VTINI} {VTON} {VTSU} {VTRISE} 1n 1k)
R4 ena 0 1e8
.param PERIOD=6.667u
.param RAMP=2.5
.param DUTYMAX=0.999
.param DUTYMIN=0.001
.param VP = {(LOW*DUTYMAX-HIGH*DUTYMIN+HIGH-LOW)/(DUTYMAX-
    DUTYMIN)}
.param VV = {(LOW-DUTYMIN*VP)/(1-DUTYMIN)}

.param TD=2n
.param TRISE=1n

.param HIGH=2.5
.param LOW=1u

.param VTINI=0
.param VTON=1

```

```

.param VTSU=0
.param VTRISE=1n
.param SR=0.01
.ends oscdclimiterblk

.subckt latchblk r1 r2 r3 r4 r5 s1 s2 s3 s4 s5 _q q
A2 r1 r2 r3 r4 r5 0 rst 0 OR Td={TD+1n} Trise={TRISE} VHigh={
    HIGH} VLow={LOW}
A3 s1 s2 s3 s4 s5 0 set 0 OR Td={TD} Trise={TRISE} VHigh={HIGH}
    VLow={LOW}
B1 q 0 V=V(1)*IF(V(q_out)>{HIGH}*0.5,{HIGH},-1V)
C1 10 0 10p
R1 q 10 100
B2 _q 0 V=V(1)*IF(V(_q_out)>{HIGH}*0.5,{HIGH},-1V)
C2 20 0 10p
R2 _q 20 100
R3 _q_out 0 1e8
R4 q_out 0 1e8
R5 r2 0 1e8
R6 r3 0 1e8
R7 r4 0 1e8
R8 r5 0 1e8
R9 r1 0 1e8
R10 s2 0 1e8
R11 s3 0 1e8
R12 s4 0 1e8
R13 s5 0 1e8
R14 s1 0 1e8
V2 1 0 PULSE({VTINI} {VTON} {VTSU} {VTRISE} 1n 1k)
A1 set rst 0 0 0 _q_out q_out 0 SRFLOP Td={TD} Trise={TRISE}
    VHigh={HIGH} VLow={LOW} IC=0
.param TD=2n
.param TRISE=1n

.param HIGH=2.5
.param LOW=1u

.param VTINI=0
.param VTON=1

```

```
.param VTSU=0
.param VTRISE=1n
.param SR=0.01
.ends latchblk

.subckt switcherblk pwm_in pwr_in output
Q1 pwr_in vb output 0 NP
E1 vce output pwm_in 0 1
R2 vce vb {Rb}
R3 vb output {Rbe}
R5 pwm_in 0 1e8
C1 vb vce 100p
.param Rb=55
.param Rbe=Rb*10
.param TD=2n
.param TRISE=1n

.param HIGH=2.5
.param LOW=1u

.param SUT=20u
.param SR=0.01
.MODEL NP npn
+IS=6.79633e-13 BF=253.337 NF=0.96553 VAF=10.1301
+IKF=10 ISE=1e-16 NE=1.00002 BR=100
+NR=0.966363 VAR=696.751 IKR=9.97557 ISC=5.11802e-15
+NC=1 RB=0.1 IRB=0.1 RBM=0.1
+RE=0.0286179 RC=0.32276665 XTB=1.37787 XTI=1.00005
+EG=1.206 CJE=6.91588e-10 VJE=0.602415 MJE=0.342146
+TF=3.63488e-10 XTF=1000 VTF=2211.72 ITF=69.0691
+CJC=1.43005e-10 VJC=0.697127 MJC=0.482949 XCJC=1
+FC=0.794695 CJS=0 VJS=0.75 MJS=0.5
+TR=3.18732e-08 PTF=0 KF=0 AF=1
.ends switcherblk

.subckt errampblk in+ in- errout
C1 errout 10 654.3p
R1 10 fb_abs 24570
C2 errout fb_abs 157.3p
```

```

B1 fb_abs 0 V=V(1)*abs(V(fb_eout))
V1 1 0 PULSE({VTINI} {VTON} {VTSU} {VTRISE} 1n 1k)
E1 fb_eout 0 in+ in- 1
R4 fb_eout 0 1E8
C3 in- in+ 1p Rser=10m
XX1 ref fb_abs errout 0 oa params: VH={HIGH} VL={LOW} GAIN
    =30000 POLE=1000 VTSU={VTSU} VTRISE={VTRISE} TRISE={TRISE}
B2 ref 0 V=V(1)*1.235V
B3 in+ in- I=V(1)*5nA
.param TD=2n
.param TRISE=1n

.param HIGH=2.5
.param LOW=1u

.param VTINI=0
.param VTON=1
.param VTSU=0
.param VTRISE=1n
.param SR=0.01
.ends errampblk

.subckt startupblk4 _ON/OFF vgn d in _startup startup
A3 onoff_ref Ref_2r5 0 0 0 0 C 0 SCHMITT Vt=0 Vh=2m Vhigh={HIGH
    } VLow={LOW} Trise={TRISE} Td={TD}
VONOFF _ON/OFF onoff 0
V1 1 0 PULSE({VTINI} {VTON} {VTSU} {VTRISE} 1n 1k)
B2 onoff_ref 0 V=V(1)*abs(V(onoff_eout))
C2 20 0 100p
R4 onoff_ref 20 100
E1 onoff_eout 0 onoff vgn d 1
R5 onoff_eout 0 1E8
R6 in 0 1e5
B3 _startup 0 V=V(1)*V(_stup)
C3 30 0 10p
R7 _startup 30 100
B4 startup 0 V=V(1)*V(stup)
C4 40 0 10p
R8 startup 40 100

```

```

R9 stup 0 1e8
R10 _stup 0 1e8
B5 Ref_2r5 0 V=V(1)*3.4V
A2 onoff_ref Ref_1r3 0 0 0 0 B 0 SCHMITT Vt=0 Vh=2m Vhigh={HIGH
    } VLow={LOW} Trise={TRISE} Td={TD}
B1 Ref_1r3 0 V=V(1)*1.3V
B7 _ON/OFF vgnnd I=V(1)*iF(v(startup)<{HIGH}*0.5,15uA,5uA)
A1 onoff_ref Ref_0r6 0 0 0 0 A 0 SCHMITT Vt=0 Vh=2m Vhigh={HIGH
    } VLow={LOW} Trise={TRISE} Td={TD}
B6 Ref_0r6 0 V=V(1)*0.6V
A7 HIGH 0 _B S R _stup stup 0 DFLOP IC=0 Td={TD} Vhigh={HIGH}
    VLow={LOW} Trise={TRISE}
A6 C 0 0 0 0 0 R 0 BUF Td={TD} Vhigh={HIGH} VLow={LOW} Trise={
    TRISE}
A5 B 0 0 0 0 0 _B 0 0 BUF Td={TD} Vhigh={HIGH} VLow={LOW} Trise={
    TRISE}
V2 HIGH 0 PULSE({LOW} {HIGH} {VTSU} {VTRISE} 1n 1k)
A4 A 0 0 0 0 0 S 0 0 BUF Td={TD} Vhigh={HIGH} VLow={LOW} Trise={
    TRISE}
.param TD=2n
.param TRISE=1n

.param HIGH=2.5
.param LOW=1u

.param VTINI=0
.param VTON=1
.param VTSU=0
.param VTRISE=1n
.param SR=0.01
.ends startupblk4

.subckt currentlimiterblk2 in+ in- ilimit leb
A1 imax isense 0 0 0 icmp 0 0 SCHMITT Vt=0 Vh=2m Vhigh={HIGH}
    VLow={LOW} Trise={TRISE} Td={TD}
B1 isense 0 V=V(1)*IF(V(dly)>{HIGH}*0.5, abs(V(sense))/{Rsense
    },{LOW}) ic=0
B3 ilimit 0 V=V(1)*V(icmp) ic=0
C2 88 0 10p

```

```

R4 ilimit 88 100
V1 1 0 PULSE({VTINI} {VTON} {VTSU} {VTRISE} 1n 1k)
B2 imax 0 V=V(1)*{ILIMIT} ic=0
A2 LEB 0 0 0 0 0 N002 0 BUF Td={TDELAY} Trise={TRISE} VHigh={
    HIGH} VLow={LOW}
R1 dly 0 1e6
R2 N002 N001 {R}
C1 N001 0 {C}
A3 0 N001 0 LEB 0 0 dly 0 AND Td={TD} Trise={TRISE} VHigh={HIGH
    } VLow={LOW}
E1 sense 0 in+ in- 1
R3 sense 0 1e6
R5 in- in+ {Rsense}
.param TD=2n
.param TRISE=1n

.param HIGH=2.5
.param LOW=1u

.param VTINI=0
.param VTON=1
.param VTSU=0
.param VTRISE=1n
.param SR=0.01
.param Rsense=0.02
.param ILIMIT=4.5
.param TDELAY=1m
.param t=20n
.param C=1nF
.param R={ t/(0.693*C) }
.ends currentlimiterblk2

.subckt oa 1 2 3 4
RP1 11 4 {GAIN/100u}
RIN 2 1 8MEG
D15 4 11 DCLAMP
CP1 11 4 { 1/(6.28*(GAIN/100u)*POLE) }
D14 5A 13 DMOD
Q1 4 13 16 0 QPMOD

```

```

ISINK 13 4 PULSE(0 {ISINK} {VTSU} {VTRISE} 1n 1k)
ISRC 7 3 PULSE(0 {ISOURCE} {VTSU} {VTRISE} 1n 1k)
V4 3 16 PULSE(0 {VL} {VTSU} {VTRISE} 1n 1k) Rser={SR}
V1 7 4 PULSE(0 {VH} {VTSU} {VTRISE} 1n 1k) Rser={SR}
D12 3 7 DMOD
G1 4 11 1 2 100
E1 5 4 11 4 1
R9 5A 5 5
.MODEL QPMOD PNP()
.MODEL DCLAMP D (RS=10 BV={VH+0.06} IBV=10m)
.MODEL DMOD D (TT=1N CJO=10P)
.param ISINK=15m
.param ISOURCE=500u
.param VH=2.5
.param VL=100m
.param POLE=30
.param GAIN=31622
.param TD=2n
.param TRISE=1n

.param VTSU=20u
.param VTRISE=1u
.param SR=0.1
.ends oa

```

A.2 Diodo

Biblioteca do diodo com os modelos de diodos:

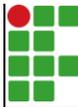
```

.model 1N5823 D is=0.0000691458 rs=0.00765586 n=1.11919 tt
=25p cjo=720p eg=.69 bv=20 ibv=10m Vpk=70 Type=Schottky
mfg=Micosemi
.model 1N5824 D is=0.000159893 rs=0.00669584 n=1.26549 tt=25p
cjo=620p eg=.69 bv=30 ibv=10m Vpk=70 Type=Schottky mfg=
Micosemi
.model 1N5825 D is=0.000310769 rs=0.00573583 n=1.41179 tt=25p
cjo=575p eg=.69 bv=40 ibv=10m Vpk=70 Type=Schottky mfg=
Micosemi

```

Biblioteca da especificação do diodo:

```
*SRC=B340A;DI_B340A;Diodes;Si; 40.0V 3.00A 5.00 ns Diodes  
Inc. Schottky  
.MODEL DI_B340A D ( IS=9.90n RS=14.0m BV=40.0 IBV=500u  
+ CJO=464p M=0.333 N=0.775 TT=7.20n )
```

	INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
	Campus João Pessoa - Código INEP: 25096850
	Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe, CEP 58015-435, Joao Pessoa (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0002-56 - Telefone: (83) 3612.1200

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

Trabalho de Conclusão de Curso

Assunto:	Trabalho de Conclusão de Curso
Assinado por:	Maria Fernanda
Tipo do Documento:	Anexo
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Maria Fernanda Ferreira de Aguiar, ALUNO (20191610008) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - JOÃO PESSOA**, em 27/01/2025 15:23:53.

Este documento foi armazenado no SUAP em 27/01/2025. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1371570

Código de Autenticação: 99563a78df

