

YGOR CASTRO FERREIRA

Simulação de Fonte Chaveada Flyback

Ygor Castro Ferreira

Simulação de Fonte Chaveada Flyback

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Samuel Euzedice de Lucena.

F383s	Ferreira, Ygor Castro Simulação de fonte chaveada flyback / Ygor Castro Ferreira – Guaratinguetá, 2022. 42 f : il. Bibliografia: f. 41-42 Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2022. Orientador: Prof. Dr. Samuel Euzedice de Lucena 1. Circuitos eletrônicos. 2. Simulação (Computadores). 3. Modelos matemáticos. I. Título. CDU 621.38.031
-------	---

YGOR CASTRO FERREIRA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM NOME DO CURSO”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM NOME DO CURSO



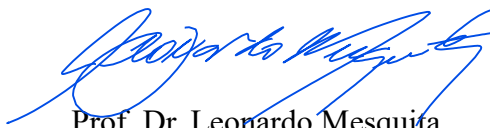
Prof. Dr. Daniel Julien Barros da Silva
Sampaio

Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Samuel Euzedice de Lucena
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Dr. Leonardo Mesquita
UNESP-FEG



Prof. Dr. Daniel Julien Barros da Silva Sampaio
UNESP-FEG

Março de 2022

AGRADECIMENTOS

Um agradecimento especial aos meus pais, Maria Valéria e Osvaldo Elias, que nos momentos mais difíceis, me apoiaram, incentivaram e acreditaram em mim.

À Naiade, que me ofereceu conselhos valiosos, *insights* e incentivos no desenvolvimento deste projeto.

Ao Prof. Dr. Samuel, que me proporcionou a oportunidade de desenvolver um projeto desafiador, me auxiliou como um verdadeiro orientador e, acima de tudo, é uma ótima pessoa.

À Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, local onde pude desenvolver habilidades, adquirir conhecimentos, me testar frente a situações desafiadores e ver o quanto posso ser determinado e persistente.

A todos os funcionários, professores, amigos e pessoas que, de alguma forma, contribuíram para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

RESUMO

Seja em um carregador de celular, em uma fonte para *notebook*, em eletrodomésticos ou até em aeronaves, as fontes chaveadas estão presentes e são extremamente importantes por serem portáteis e eficientes. Contudo, mesmo os circuitos aparentando ser simples, o fato de trabalharem em altas frequências, possuírem vários estágios e necessitarem de um eficiente controle em malha fechada tornam o dimensionamento e montagem das fontes chaveadas um exercício nada trivial. Devido a isso, este trabalho teve como objetivo validar o uso dos *softwares* de simulação como ferramenta auxiliar no desenvolvimento de fontes chaveadas através do projeto e simulação de uma fonte *flyback*. O projeto foi executado através de equacionamento matemático e análise de circuitos e a simulação teve a finalidade de fazer as medições de forma a ajustar o projeto e mostrar os resultados. A fonte apresentou bons resultados, estando de acordo com as especificações escolhidas e se mantendo estável frente a uma variação de carga. A ausência de *softwares* gratuitos que sejam capazes de fazer a simulação de circuitos mais complexos e o fato de ter que adaptar o projeto aos componentes existentes na biblioteca dos mesmos são fatores limitantes, mas a praticidade, facilidade no manuseio, a economia pela ausência de componentes danificados e o funcionamento ideal tornam os *softwares* de simulação ferramentas poderosas para o aprendizado, validação de ideias e instrumento de apoio ao projetista.

PALAVRAS-CHAVE: Fontes chaveadas. *Flyback*. Circuitos eletrônicos. *Softwares*. Projeto.

ABSTRACT

Switched-mode power supplies are extremely important for being portable and efficient, and are present in cell phone chargers, notebook sources, home appliances and also in airplanes. However, even though the circuits look simple, the fact of working in high frequencies, having multiple stages and needing an efficient closed-loop control make the design and assembly of this type of power supply a hard work. Therefore, the objective of this project was to validate the use of simulation softwares as an auxiliary tool for the SMPS designing through the project and simulation of a flyback power supply. The project was developed by mathematical equation and circuit analysis, and the simulation had the purpose of taking measurements for designing adjusts and showing the results. The power supply showed good results, being suitable to the chosen specifications and maintaining stability with load variations. The absence of free softwares capable of simulating complex circuits and the fact of having to adapt the design to the components of the programs library are limiting factors. However the practicality, the ease of use, the economy by the absence of damaged components and the ideal operation make the simulation softwares powerful tools for learning, validating ideas and supporting the designer.

KEYWORDS: Switched-mode power supply. Flyback. SMPS. Softwares. Design.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Conversor do tipo “Buck”	13
Figura 2 – Conversor do tipo “Boost”	14
Figura 3 – Conversor do tipo “Flyback”	14
Figura 4 – Conversor do tipo “Cúk”	15
Figura 5 – Fonte Chaveada “Flyback”	16
Figura 6 – Princípios de funcionamento da fonte “Flyback” com transistor “aberto”	16
Figura 7 – Funcionamento da fonte “Flyback” com transistor “fechado”	16
Figura 8 – Circuito Snubber	17
Figura 9 – Estágio de saída da fonte chaveada	18
Figura 10 – CI da família UCx84x	19
Figura 11 – Fonte Auxiliar	20
Figura 12 – Diagrama didático para Fonte Chaveada Flyback	21
Figura 13 – Estágio de entrada da fonte	23
Figura 14 – Gráfico da tensão de entrada retificada	24
Figura 15 – Circuito Snubber	24
Figura 16 – Parâmetros do transformador no software PSIM	27
Figura 17 – Saída do circuito	28
Figura 18 – Parametrização do componente IGBT	28
Figura 19 – Circuito de realimentação	29
Figura 20 – Circuito regulador shunt com TL-431	30
Figura 21 – Circuito Integrado UC3844	31
Figura 22 – Circuito interno do UC3844	32
Figura 23 – Fonte Chaveada Flyback	34
Figura 24 – Gráfico da corrente de saída	35
Figura 25 – Gráfico de Tensão de saída	35
Figura 26 – Gráfico da Tensão de Saída alterando a tensão de entrada	36
Figura 27 – Gráfico da tensão de alimentação do CI PWM	37
Figura 28 – Gráfico da tensão no pino RT/CT	38
Figura 29 – Gráfico da tensão de referência	38
Figura 30 – Gráfico da tensão no pino IS	39
Figura 31 – Gráfico da Tensão de Dreno	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações da Fonte.....	22
Tabela 2 – Núcleos de Ferrite tipo E.....	25

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CI	Circuito Integrado
PWM	Pulse Width Modulation
RMS	Root Mean Square

LISTA DE SÍMBOLOS

$V_{in\ máx}$	tensão de entrada máxima
$V_{in\ mín}$	tensão de entrada mínima
V_1	tensão de saída
I_1	corrente de saída
P_0	potência de saída
P_{in}	potência de entrada
ΔV_0	ondulação de tensão na saída
f	frequência de oscilação
D	máximo <i>duty cycle</i>
A_e	área efetiva do núcleo
A_w	área do enrolamento
J	densidade de corrente
ΔB	variação de fluxo eletromagnético
k_p	fator de utilização do primário
k_w	fator de utilização da área do enrolamento
δ	entreferro
μ_0	permeabilidade do ar
ΔW	energia acumulada no indutor
I_p	corrente no primário
N_p	enrolamento do primário
V_f	queda de tensão no diodo
C	capacitor de filtro da saída do circuito
R_1	resistor 1 do divisor de tensão no circuito de realimentação
R_2	resistor 2 do divisor de tensão no circuito de realimentação
R_{rt}	resistor de tempo para oscilador
C_{ct}	capacitor de tempo para oscilador

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	TOPOLOGIAS	13
2.1.1	Fonte topologia “ <i>Buck</i> ”	13
2.1.2	Fonte do tipo “ <i>Boost</i> ”	14
2.1.3	Fonte do tipo “ <i>Flyback</i> ”	14
2.1.4	Fonte do Tipo Cúk	15
2.2	FONTES FLYBACK	15
2.3	<i>SNUBBER</i>	17
2.4	TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA PARA A SAÍDA.....	17
2.5	ESTÁGIO DE SAÍDA	18
2.6	CIRCUITO DE REALIMENTAÇÃO.....	18
2.7	CI CONTROLADOR PWM	18
2.8	FONTE AUXILIAR.....	19
3	MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1	METODOLOGIA	21
3.1.1	Especificações	22
3.1.2	Retificação e Fonte Auxiliar	23
3.1.3	Snubber	24
3.1.4	Transformador	25
3.1.5	Saída do circuito.....	27
3.1.6	Circuito de Realimentação	29
3.1.7	Controlador PWM	31
4	RESULTADOS SIMULADOS E DISCUSSÃO	34
4.1	SAÍDA DA FONTE	34
4.2	UC3844	36
4.3	MOSFET	39
5	CONCLUSÃO	40
	REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, as fontes chaveadas são amplamente utilizadas no dia a dia das pessoas, tanto no fornecimento de carga para a bateria dos celulares e *notebooks*, como nos televisores e em eletrodomésticos em geral (DE MELLO, 1988). Devido ao seu tamanho e eficiência, as fontes chaveadas se popularizaram muito e, hoje em dia, é a principal forma de fornecimento de tensão contínua (BARBI, 2014).

Antes do surgimento das fontes chaveadas, que começaram a ser desenvolvidas na década de 60 (BARBI, 2014), a conversão da tensão alternada em tensão contínua para a alimentação de sistemas eletrônicos era realizada por fontes lineares, que são simples de serem confeccionadas. De forma simplificada, a estrutura de uma fonte linear é composta por um transformador, que é utilizado para reduzir a tensão de entrada da rede (geralmente 127V ou 220V), uma ponte retificadora, para converter a tensão alternada em tensão contínua, ligada ao secundário do transformador, um capacitor para redução do efeito *Ripple* e um diodo *Zener* para a regulação da tensão de saída.

Apesar de os conversores lineares serem fáceis de dimensionar e possuírem baixo custo, sua eficiência e o fato de utilizarem transformadores maiores e mais pesados podem inviabilizar seu uso em determinadas situações (VIEIRA, 2009). Devido à necessidade do uso de fontes menores e mais eficientes para auxiliar nas inovações tecnológicas almejadas na corrida espacial, em plena Guerra Fria, as fontes chaveadas começaram a ser desenvolvidas (Barbi, 2014).

As fontes que utilizam elementos “chaveadores” possuem vantagens e desvantagens bem específicas. O seu melhor rendimento é explicado por Vieira (2009, p.6),

Um regulador linear possui rendimento de 70% quando alimenta um LED branco InGaN ($V_D = 3,5V$) com a corrente de 1A a partir de uma fonte de tensão de entrada de 5V. A mesma fonte apresenta rendimento de 30% quando a tensão de entrada aumenta para 12V.

Segundo o mesmo autor, utilizando uma fonte chaveada para alimentar o mesmo LED, obtêm-se um rendimento de 95% para 5V e 98% para 12V (VIEIRA, 2009). Além da eficiência e do tamanho físico, existem outras características que podem ser comparadas. As fontes chaveadas trabalham com frequências muito altas e isso pode acarretar em ondulação na tensão de saída, enquanto a ondulação na tensão de saída das fontes lineares é muito baixa (MEHL, p. 5).

Apesar de ter certa vantagem sobre as fontes lineares, as fontes chaveadas possuem um circuito complexo e delicado, o que torna o seu dimensionamento um exercício nada trivial. Segundo DE MELLO (1988, p.28) “O fato básico que rege o funcionamento das Fontes Chaveadas está na capacidade de armazenamento de energia em capacitores (em forma de tensão) e em indutores (em forma de corrente) ”. Os capacitores auxiliam na redução da ondulação da saída e os indutores na transferência de energia de uma fonte primária para a saída da fonte chaveada.

Além do que já foi citado, é importante destacar que as fontes chaveadas possuem um estágio de retificação da tensão de entrada, a transferência de tensão contínua da entrada para a saída, um circuito de *feedback* utilizado para comparar e o erro da tensão de saída e auxiliar na regulação para a tensão desejada, um CI controlador PWM, que faz a modulação por largura de pulso que irá controlar a comutação do MOSFET e circuitos de proteção. Tudo isso operando em altas frequências.

Devido à complexidade citada, um projeto não muito cuidadoso pode acarretar na queima do MOSFET ou de outros componentes, à falta de regulação das fontes ou mesmo um funcionamento inadequado. Uma possível solução para esses problemas é o uso de *softwares* de simulação, de forma a validar se o projeto foi bem calculado, se atende às especificações desejadas e se há algum mal funcionamento.

Portanto, este trabalho se propõe a projetar e simular uma Fonte Chaveada Flyback, com o objetivo de validar o uso de *softwares* de simulação no auxílio de projetos de fontes chaveadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O Termo Fonte Chaveada diz respeito a toda uma família de fontes que se baseia no princípio do chaveamento do transistor. Todavia, ao comparar duas fontes diferentes da mesma família, é possível perceber inúmeras diferenças. Levando em conta este fato, é interessante entender cada topologia existente e quais são suas características, para, assim, escolher a fonte que melhor atende as especificações demandadas.

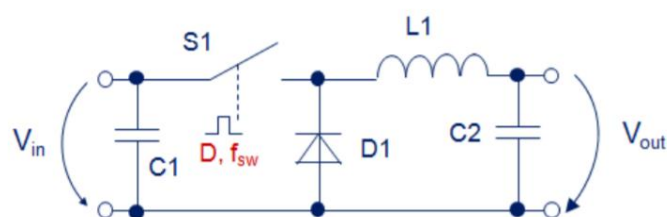
Além das topologias, existem diferentes técnicas e componentes que podem ser utilizados para dimensionar o circuito. Portanto, este capítulo abordará os diferentes tipos de fontes chaveadas, o motivo de ter sido selecionada a fonte *flyback* e os conceitos básicos referentes a cada estágio.

2.1 TOPOLOGIAS

As principais topologias de Fontes Chaveadas são denominadas *Buck*, *Boost*, *Flyback* e *Cúk*. A maneira como é realizada a transferência de energia de uma fonte primária para a saída do circuito é o que diferencia cada tipo (DE MELLO, 1988). De acordo com Vieira (2009, p.31), cada topologia também pode agregar características de mais de um conversor chaveado, uma vez que existem três tipos de conversores base: *Buck*, *Boost* e *Buck-Boost*.

2.1.1 Fonte topologia “*Buck*”

O conversor do tipo “*Buck*” é amplamente utilizado na indústria e é a topologia mais popular na distribuição de potência em sistemas complexos, placas-mãe de servidores, placas de comunicação de banda larga, etc (EJURY, 2013). Segundo Soika (2017, p.18), as principais características da topologia “*Buck*” são: a diminuição da tensão de saída em relação à entrada, a saída do circuito não ser isolada em relação à entrada e a tensão de saída ser não invertida. A Figura 1 mostra esse conversor.



Fonte: Ejury (2013, p.4).

Segundo DE MELLO (1988, p.30), em comparação com as fontes “flyback” e “boost”, nesse tipo de conversor há uma menor ondulação na saída, devido à corrente que passa pelo indutor estar constantemente sendo fornecida à saída.

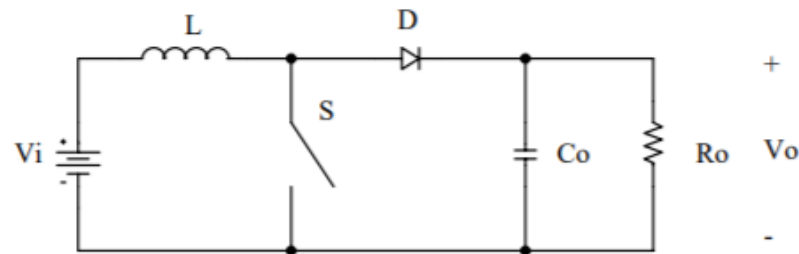
2.1.2 Fonte do tipo “Boost”

Ao contrário do conversor do tipo “Buck”, no “Boost” há um aumento da tensão de saída em relação a entrada (DE MELLO, 1988). Este é um conversor que não permite isolamento entre a entrada e a saída (Pomilio, 2020) e, de acordo com Pozzati (2015, p. 24),

Esse conversor apresenta um elevado índice de ruído na saída, por emitir muitos pulsos de corrente para o capacitor sempre que a chave é desligada, e baixo índice de ruído na entrada, pois o indutor impede altas derivadas de corrente na referida entrada.

A Figura 2 mostra o circuito relativo ao conversor “Boost”. Nela é possível observar o indutor localizado na entrada. Também é interessante notar que a mudança da topologia “Buck” para esta é apenas na posição dos componentes, o que já confere características bem diferentes.

Figura 2 – Conversor do tipo “Boost”

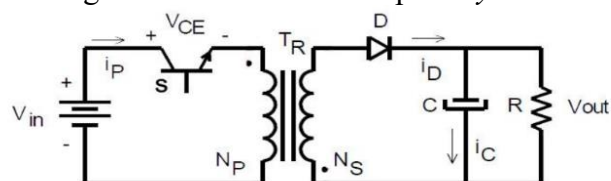


Fonte: Petry (2001, p.7).

2.1.3 Fonte do tipo “Flyback”

Na topologia “Flyback” há o isolamento entre a fonte de entrada e a tensão de saída (EVANGELISTA, 2015), podendo ser projetada para apresentar uma tensão de saída maior ou menor em relação à tensão de entrada (SILVA, 2019). A Figura 3 mostra essa topologia.

Figura 3 – Conversor do tipo “Flyback”



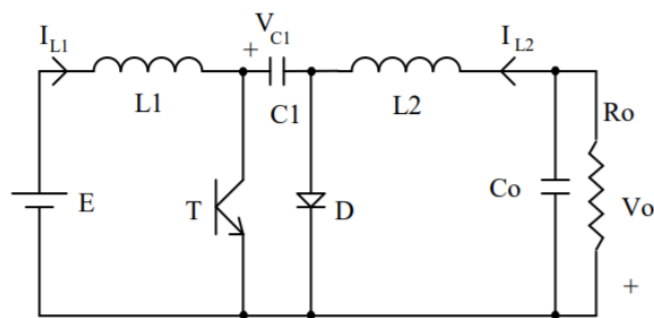
Fonte: Bona; Garcia; Füllgraf (2010, p.3).

Devido ao fato de poder trabalhar com tensões de saída tanto maiores quanto menores que a tensão de entrada, essa topologia também pode ser chamada de conversor *Buck-Boost* Isolado.

2.1.4 Fonte do Tipo Cúk

Nessa topologia, a transferência da energia da fonte primária é realizada através de um capacitor, a tensão de saída apresenta polaridade invertida em relação à entrada e, de acordo com o projeto, é possível eliminar a ondulação da corrente de uma das bobinas (Pomilio, 2020). A Figura 4 mostra o conversor “Cúk”.

Figura 4 – Conversor do tipo “Cúk”



Fonte: Pomilio (2020).

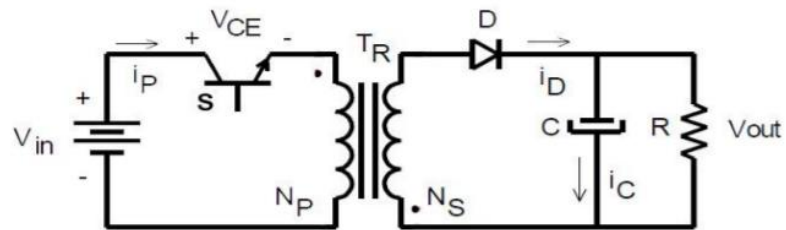
De acordo com Figueira e Fernandes (2014, p.1), “a vantagem é que esse conversor fornece uma tensão de saída regulada com eficiência maior, considerando o uso de componentes idênticos, caso seja usado um duplo *buck-boost*”.

2.2 FONTES FLYBACK

As fontes chaveadas de topologia “*Flyback*”, foco de estudo neste trabalho, são conhecidas por possuir a saída isolada da fonte de entrada. Esse isolamento acontece pelo fato de se empregar um transformador para realizar a transferência de energia para a saída. Segundo Barbi (2014, p.64), o transformador possui três utilidades: isolamento entre a fonte e a carga, acumulação de energia quando o transistor “fecha” e adaptação da tensão no secundário.

Para entrar no mérito de seu funcionamento, será analisada a topologia simplificada indicada pela Figura 5.

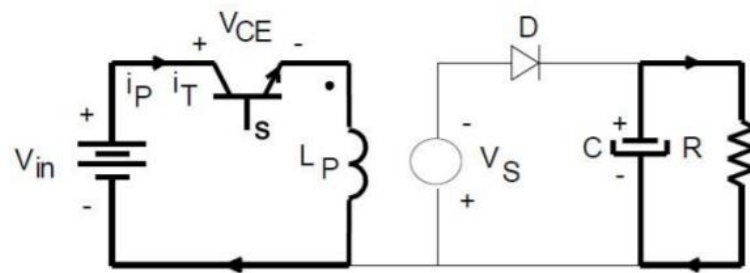
Figura 5 – Fonte Chaveada “Flyback”



Fonte: Barbi (2014, p.64).

Quando o transistor “S” está conduzindo, a corrente “ i_P ” fornecida pela fonte “ V_{in} ” circula pelo primário do transformador, e o diodo “D” impede a passagem de corrente pelo circuito de saída, como mostra a Figura 6.

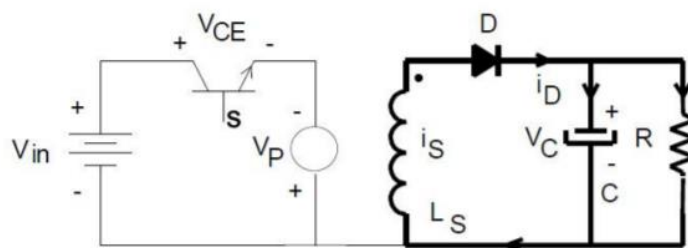
Figura 6 – Princípios de funcionamento da fonte “Flyback” com transistor “aberto”



Fonte: Bona; Garcia; Fullgraff (2010, p.3).

Quando o transistor não está conduzindo, a energia que foi armazenada no primário do transformador devido à circulação de corrente será transmitida ao secundário com a polaridade invertida, fazendo com que o diodo “D” seja polarizado diretamente e que o capacitor “C” seja carregado, como mostra a Figura 7.

Figura 7 – Funcionamento da fonte “Flyback” com transistor “fechado”



Fonte: Bona; Garcia; Fullgraff (2010, p.4).

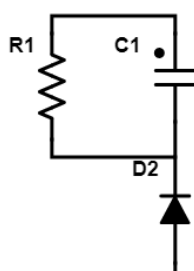
É importante ressaltar que, devido à alta frequência de chaveamento do transistor, o processo de transferência de energia para o secundário e de carga e descarga do capacitor para a alimentação da carga é extremamente rápido.

A fonte chaveada que será projetada e simulada neste trabalho recebe uma tensão alternada da rede, faz a conversão para tensão contínua e, a partir desta etapa, o funcionamento é análogo ao que foi explicado nessa seção. Contudo, há o acréscimo de um circuito de *feedback* e de um CI controlador PWM, que irão trabalhar na correção do erro e regulação da tensão de saída, controlando a largura do pulso que irá chavear o transistor.

2.3 *SNUBBER*

Um segundo circuito auxiliar muito importante é o circuito *Snubber*, utilizado para diminuir as perdas no transistor. De acordo com DE MELLO (1988, p.124), “os *Snubbers* são circuitos dissipativos, que retiram parte dessa energia perdida no transistor e transferem-na para um resistor”. Em uma fonte chaveada, este circuito pode ser montado com um capacitor em paralelo com um resistor e um diodo em série, como mostra a Figura 8.

Figura 8 – Circuito *Snubber*



Fonte: Elaborado pelo autor.

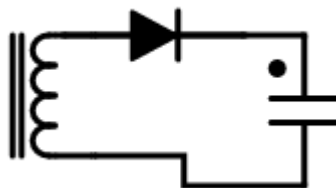
2.4 TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA PARA A SAÍDA

O circuito Snubber é conectado em paralelo ao primário do transformador que faz a transferência de energia para a saída da fonte. Como já mencionado anteriormente, o transformador é o que garante o isolamento entre a fonte primária e a saída, a transferência de energia é realizada de forma eletromagnética. O transformador recebe a tensão retificada “carregando” e “descarregando” de acordo com o chaveamento do transistor.

2.5 ESTÁGIO DE SAÍDA

A saída da fonte chaveada flyback pode ser composta por um diodo e um capacitor, como mostra a Figura 9.

Figura 9 – Estágio de saída da fonte chaveada



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Em uma topologia *flyback*, o secundário do transformador atua também como um filtro para as baixas frequências, e o capacitor para altas frequências, os quais possuem a função de reduzir a ondulação da tensão de saída. Para Vieira (2009, p.31), “com exceção do *Flyback*, na qual o enrolamento do secundário compõe o próprio filtro de saída, as demais fontes chaveadas isoladas apresentam o seu indutor e capacitor de filtragem localizado após o transformador”.

2.6 CIRCUITO DE REALIMENTAÇÃO

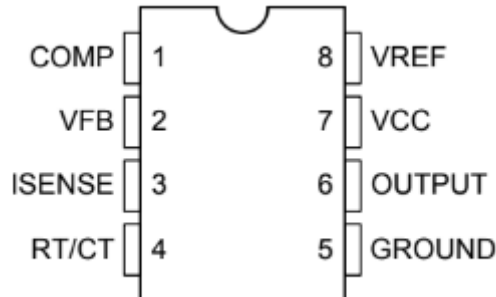
As fontes chaveadas operam em malha fechada, isto é, a saída realimenta o circuito de forma a corrigir erros e regular a própria saída para a tensão e corrente desejadas no projeto. De acordo com De Mello (1988, p. 253), a regulação da tensão de saída é realizada comparando a tensão de saída com uma tensão de referência e, a partir dessa comparação, um circuito de controle faz a modulação do pulso que controla o chaveamento do transistor.

2.7 CI CONTROLADOR PWM

A modulação da largura do pulso que controla o chaveamento do transistor em uma fonte chaveada pode ser realizada de duas maneiras: utilizando um circuito com componentes discretos projetado para fazer a modulação (fonte auto-oscilante) ou utilizando um circuito integrado.

Existem inúmeros circuitos integrados que podem ser utilizados em uma fonte chaveada, como a família UCx84x mostrada na Figura 10.

Figura 10 – CI da família UCx84x



Fonte: Texas Instruments (2016).

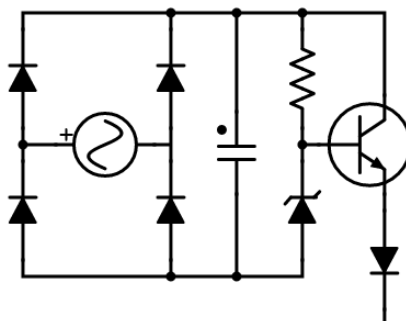
Esse CI possui uma entrada compensadora, que possui um amplificador de erro utilizado na comparação da tensão de realimentação e uma tensão de referência, uma entrada que recebe a tensão de realimentação e uma entrada denominada “sensor de corrente”, utilizada pelo PWM para encerrar a condução do transistor. A entrada RT/CT determina a frequência de oscilação do CI e o *duty cycle* da saída, VREF entrega uma corrente de carga para o capacitor C_t através do resistor RT (utilizados na entrada RT/CT), VCC é a tensão que alimenta o circuito integrado, OUTPUT entrega a tensão PWM que será ligada ao “gate” do MOSFET (que realiza o chaveamento). Por fim, GROUND é o pino que será aterrado.

2.8 FONTE AUXILIAR

Cada circuito integrado utilizado para PWM possui uma tensão de alimentação que pode variar. No caso do CI da família UCx84x, no UCx844 deve ser entre 14,5V e 17,5V e, no UCx845, entre 7V e 8,2V.

Em uma topologia *flyback*, essa tensão geralmente é fornecida através de um terciário do transformador. Contudo, para que o terciário possa fornecê-la, o circuito integrado já deve estar funcionando de forma a controlar o chaveamento do MOSFET. Para viabilizar o funcionamento do CI antes do início do funcionamento da chave, uma das técnicas é o uso de uma fonte auxiliar, como mostra a Figura 11.

Figura 11 – Fonte Auxiliar



Fonte: Adaptado de Barbi (2014).

O seu funcionamento consiste em utilizar um resistor R de valor alto ligado à tensão contínua já retificada, com a função de dissipar potência e, em série, um diodo zener que irá regular a tensão que se deseja fornecer ao circuito integrado. Paralelo a ambos, é utilizado um transistor em série com um diodo.

De acordo com BARBI (2014, p.200),

Depois que a fonte inicia o funcionamento, o enrolamento Ns fornece energia para alimentar o comando, polarizando D1 reversamente e bloqueando o transistor T1. Desse modo, só há consumo de potência em T1 nos primeiros ciclos de funcionamento

3 MATERIAIS E MÉTODOS

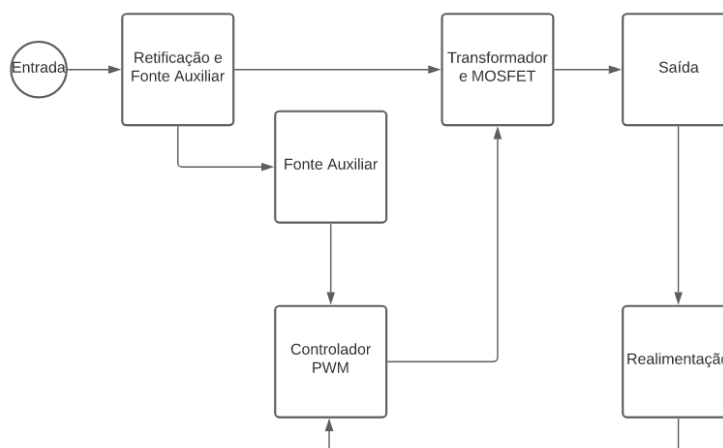
Montar e testar um circuito em laboratório demanda acesso a diferentes tipos de componentes, cabos para conexão e instrumentos de medição, como multímetros, geradores de função e fontes de tensão. Porém, atualmente é possível encontrar todas essas ferramentas em *softwares* de simulação, onde o circuito pode ser rapidamente montado e simulado.

A simulação de um circuito eletrônico pode oferecer grande ajuda em situações como a validação de algum estágio específico ou mesmo de todo o projeto antes de sua montagem física. Os simuladores oferecem praticidade, flexibilidade, maior eficiência e menores riscos em um projeto de circuito eletrônico.

3.1 METODOLOGIA

Neste projeto, a fonte foi dimensionada a partir de uma especificação escolhida e, através de cálculos e do apoio do *software* PSIM, os componentes foram calculados e ajustados. Para auxiliar no estudo e compreensão deste tipo de circuito na etapa do projeto, a fonte foi seccionada em diferentes estágios, com seus respectivos circuitos, como mostra a Figura 12.

Figura 12 – Diagrama didático para Fonte Chaveada *Flyback*



Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.1.1 Especificações

Para dimensionar a fonte *flyback*, foi selecionada uma tensão e corrente de saída de 12V e 1,5A, respectivamente. A tensão de entrada, potência de entrada, potência de saída e outras especificações são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Especificações da Fonte

$V_{in\ máx}$	373,35 V	ΔV_0	1%
$V_{in\ mín}$	248,90 V	f	52 kHz
V_1	12 V	D	0,48
I_1	1,5 A	η	0,75
P_o	18 W		
P_{in}	24 W		

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A fonte foi dimensionada para ser alimentada por uma tensão RMS de 220V (aproximadamente 311V de pico), com uma variação de mais ou menos 20%. A tensão de entrada máxima é dada pela Equação (1). Essa equação converte a tensão de valor RMS da rede em valor de pico e aplica um limite superior de variação de 20%.

$$V_{in\ máx} = 1,2.220.\sqrt{2} \quad (1)$$

$$V_{in\ máx} = 373,35\ V \quad (2)$$

A tensão de entrada mínima segue o mesmo raciocínio, porém aplicando um limite inferior de variação também de 20%, como mostra a Equação (3).

$$V_{in\ mín} = 0,8.220.\sqrt{2} \quad (3)$$

$$V_{in\ mín} = 248,90\ V \quad (4)$$

A potência de saída é calculada multiplicando-se a tensão de saída pela corrente de saída, como mostra a Equação (5).

$$P_o = 12.1,5 \quad (5)$$

$$P_o = 18\ W \quad (6)$$

Assumindo um rendimento η de 75% para a fonte, pode-se calcular a potência de entrada pela Equação (7).

$$P_{in} = \frac{P_0}{\eta} \quad (7)$$

$$P_{in} = \frac{18}{0,75} \quad (8)$$

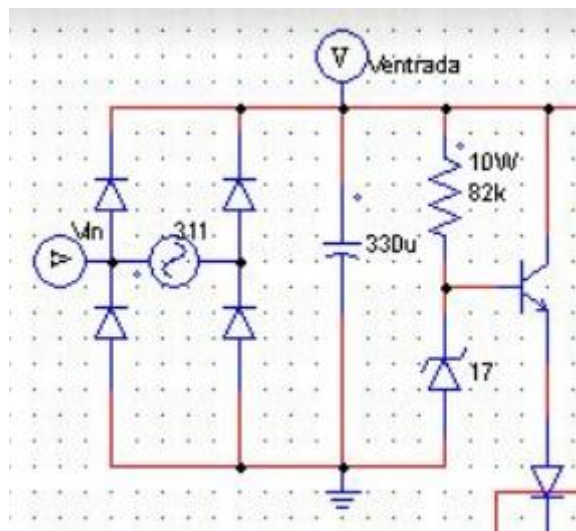
$$P_{in} = 24 \text{ W} \quad (9)$$

Foi assumido uma ondulação da tensão de saída, ΔV_0 , de 1%. Os valores de frequência de chaveamento e de *Duty Cycle* máximo foram obtidos pelo *datasheet* do controlador PWM selecionado.

3.1.2 Retificação e Fonte Auxiliar

A tensão de pico utilizada para a simulação foi um valor de 311V. Foi utilizado uma ponte de diodos para a retificação da tensão e um capacitor para a filtragem do *ripple*, como mostra a Figura 13.

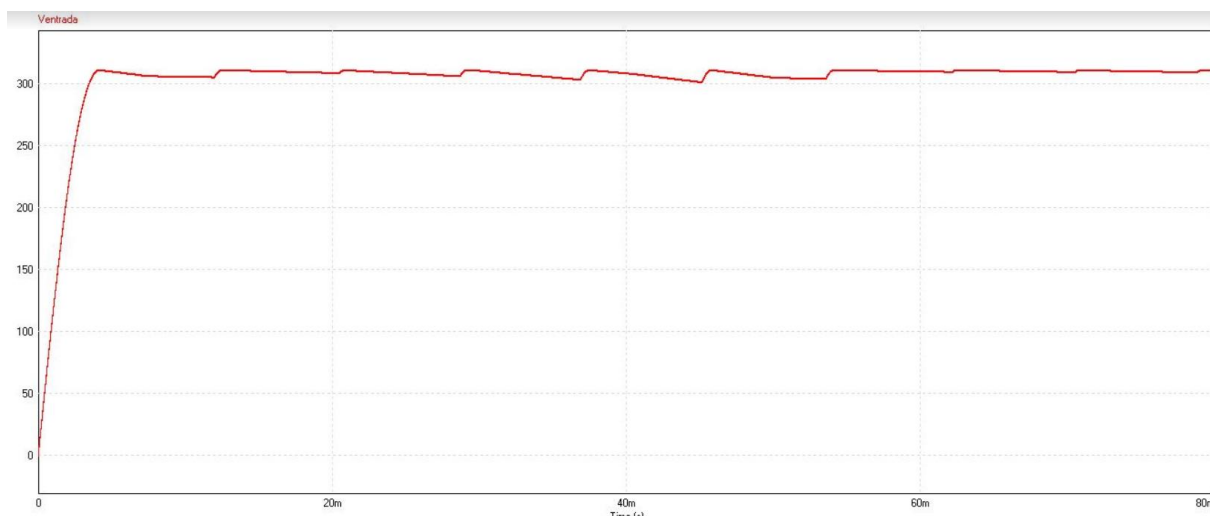
Figura 13 – Estágio de entrada da fonte



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Foi estimado um capacitor de 330uF, para a remoção do *ripple*. Sua forma de onda é dada pela Figura 14.

Figura 14 – Gráfico da tensão de entrada retificada



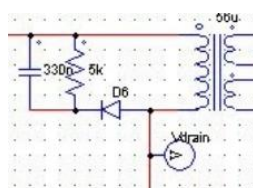
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na Figura 13, também é possível verificar a fonte auxiliar, que é representada pelo transistor, um resistor de $82k\Omega$, um transistor, um diodo, um capacitor de $47\mu F$ (ligado em paralelo ao terciário do transformador) e um zener de 17V.

O zener foi dimensionado para regular a tensão de acordo com a alimentação do circuito integrado controlador de PWM. Os demais componentes foram estimados e tiveram seus valores ajustados via simulação.

3.1.3 Snubber

O dimensionamento do *snubber* foi realizado a partir de ajuste via *software*. Visto que o principal objetivo do trabalho é validar a simulação como ferramenta, foi utilizado um diodo ideal. Na prática, seria interessante o uso de um diodo ultra-rápido. Os valores do capacitor e do resistor foram escolhidos a partir de método empírico. O valor de $5k\Omega$ e $330nF$ tiveram bons resultados em relação ao rendimento e funcionamento geral da fonte. A Figura 15 mostra o circuito em questão.

Figura 15 – Circuito *Snubber*

Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.1.4 Transformador

Para o dimensionamento do transformador, foi utilizado um roteiro de cálculos apresentado no livro “Projetos de Fontes Chaveadas” de Ivo Barbi. Para a escolha do transformador e cálculo do número de voltas, primeiramente é utilizada na Equação (10).

$$A_e \cdot A_w = \frac{1,1 \cdot P_{out} \cdot 10^4}{k_p \cdot k_w \cdot J \cdot f \cdot \Delta B} \quad (10)$$

$$A_e \cdot A_w = \frac{1,1 \cdot 18 \cdot 10^4}{0,5 \cdot 0,4 \cdot 200 \cdot 52 \cdot 10^3 \cdot 0,16} \quad (11)$$

$$A_e \cdot A_w = 0,5950 \text{ cm}^4 \quad (12)$$

Os valores de k_p e k_w são estimados em 0,5 e 0,4, respectivamente. O valor de J e ΔB são, tipicamente, 200A/cm² e 0,160T. Com o valor calculado de $A_e \cdot A_w$, é possível selecionar, através da Tabela 2, o núcleo do entreferro.

Tabela 2 – Núcleos de Ferrite tipo E

Núcleo	A_e (cm ²)	A_w (cm ²)	l_e (cm)	l_l (cm)	v_e (cm ³)	$A_e A_w$ (cm ⁴)
E-20	0,312	0,26	4,28	3,8	1,34	0,08
E-30/7	0,60	0,80	6,7	5,6	4,00	0,48
E-30/14	1,20	0,85	6,7	6,7	8,00	1,02
E-42/15	1,81	1,57	9,7	8,7	17,10	2,84
E-42/20	2,40	1,57	9,7	10,5	23,30	3,77
E-55	3,54	2,50	1,2	11,6	42,50	8,85

Fonte: Ivo Barbi (2014, p.301).

De acordo com a Tabela 2, o núcleo selecionado é o E-30/14. Para o cálculo do entreferro, é utilizada a Equação (13).

$$\delta = \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot \Delta W}{B^2 \cdot A_e} \quad (13)$$

Para o cálculo de ΔW , é utilizada a Equação (14).

$$\Delta W = \frac{P_0}{\eta \cdot f} \quad (14)$$

$$\Delta W = \frac{18}{(0,75.52.10^3)} \quad (15)$$

$$\Delta W = 4,61.10^{-4} J \quad (16)$$

Com ΔW calculado, temos todos os parâmetros da Equação (17) para calcular o entreferro. Sendo μ_0 a constante de permeabilidade do ar, de valor $4\pi.10^{-7}$, $B=0,16T$ e o valor de A_e , retirado da Tabela 2:

$$\delta = \frac{2.4\pi.10^{-7}.4,61.10^{-4}}{0,16^2.1,2.10^{-4}} \quad (17)$$

$$\delta = 0,3776mm \quad (18)$$

Para o cálculo do enrolamento primário, primeiro é necessário calcular a corrente de primário que é dada pela Equação (19).

$$I_p = \frac{7,14.P_0}{V_{in\ min}} \quad (19)$$

$$I_p = \frac{7,14.18}{248,90} \quad (20)$$

$$I_p = 516\ mA \quad (21)$$

Com o valor da corrente de primário calculada, calcula-se o enrolamento do primário através da Equação (22), na qual B é dado em Gauss e δ em cm:

$$N_p = \frac{B.\delta}{0,4.\pi.I_p} \quad (22)$$

$$N_p = \frac{1600.0,03776}{0,4.\pi.0,516} \quad (23)$$

$$N_p = 93,17 \quad (24)$$

O enrolamento do secundário é dado pela Equação (25)

$$N_s = N_p \cdot \frac{V_o + Vf}{V_{in\ min}} \cdot \frac{1 - D_{m\acute{a}x}}{D_{m\acute{a}x}} \quad (25)$$

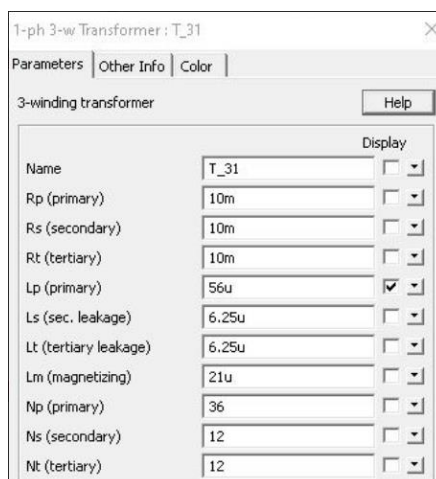
$$N_s = 93,17 \cdot \frac{12 + 1}{248,90} \cdot \frac{1 - 0,48}{0,48} \quad (26)$$

$$N_s = 5,27 \quad (27)$$

Esses cálculos são utilizados para o dimensionamento real do transformador para fontes chaveadas. Contudo, pelo fato do transformador do *software* envolver as indutâncias de primário, secundário, terciário e magnetizante, não foi possível a aplicabilidade dos valores encontrados.

Para encontrar os valores de enrolamento, foram assumidos valores para as indutâncias, com base em um exemplo de fonte chaveada fornecido pela PSIM e os valores dos enrolamentos foram ajustados através das simulações. Os valores finais são mostrados na Figura 16.

Figura 16 – Parâmetros do transformador no *software* PSIM

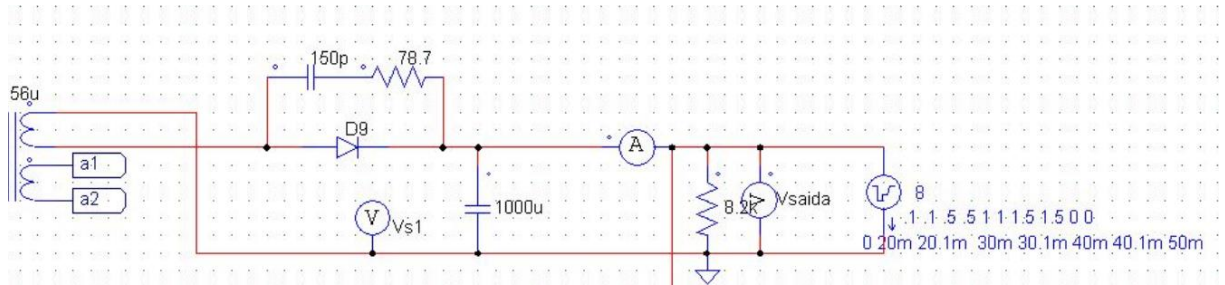


Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.1.5 Saída do circuito

A Figura 17 mostra a saída do circuito, composta por um capacitor de filtro, uma carga (representada pelo resistor de 8,2kΩ) e um filtro adicional representado pelo capacitor de 150pF e o resistor de 78.7Ω.

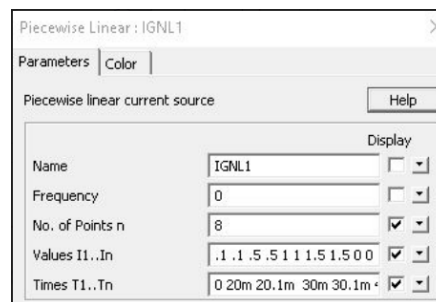
Figura 17 – Saída do circuito



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O componente que fica em paralelo com o voltímetro “Vsaida” em instantes discretos “pede” correntes específicas parametrizadas no próprio *software*, como mostra a Figura 18.

Figura 18 – Parametrização do componente IGNL1



Fonte: Elaborado pelo Autor.

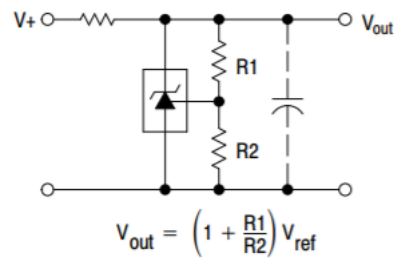
Para o cálculo do filtro de saída, foi utilizada a Equação (28), mostrada no livro *Projetos de Fontes Chaveadas*, de Ivo Barbi (2014, p.70).

$$C = \frac{I_1 \cdot D_{máx}}{f \cdot \Delta V_0} \quad (28)$$

$$C = \frac{1,5,0,48}{58 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} \quad (29)$$

$$C = 12,4 \mu F \quad (30)$$

Contudo, fazendo a simulação do circuito completo, um capacitor com valor próximo ao dimensionado não foi capaz de filtrar eficientemente as ondulações da tensão de saída. Através das simulações, o valor foi ajustado para 1000μF e, visto que a simulação foi feita com um

Figura 20 – Circuito regulador *shunt* com TL-431

Fonte: On Semi (2006)

Utilizando a equação da figura e substituindo os valores, temos:

$$2,5 \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) = 12 \quad (31)$$

$$\frac{R_1}{R_2} = 3,8 \quad (32)$$

Os valores escolhidos para esta simulação foram de 9,53kΩ e 2,49kΩ, valores que não são comerciais e podem facilmente ser trocados por valores comerciais, porém atende ao caso de validar a simulação.

O resistor de 88,7kΩ e o capacitor de 0,01μF foram utilizados para compensação e seus valores foram ajustados via simulação. A tensão do catodo é regulada em 8V por um diodo zener e foi utilizado um resistor de polarização de 390Ω ajustado via simulação.

O resistor de 1kΩ é utilizado para reduzir a corrente que vai para anodo do foto-acoplador. Segundo o *datasheet* da Sharp (2003), essa corrente no máximo 50 mA. Com a tensão de saída de 12V e o resistor de 1kΩ, a corrente resultante é de 12mA, o que atende as especificações do componente.

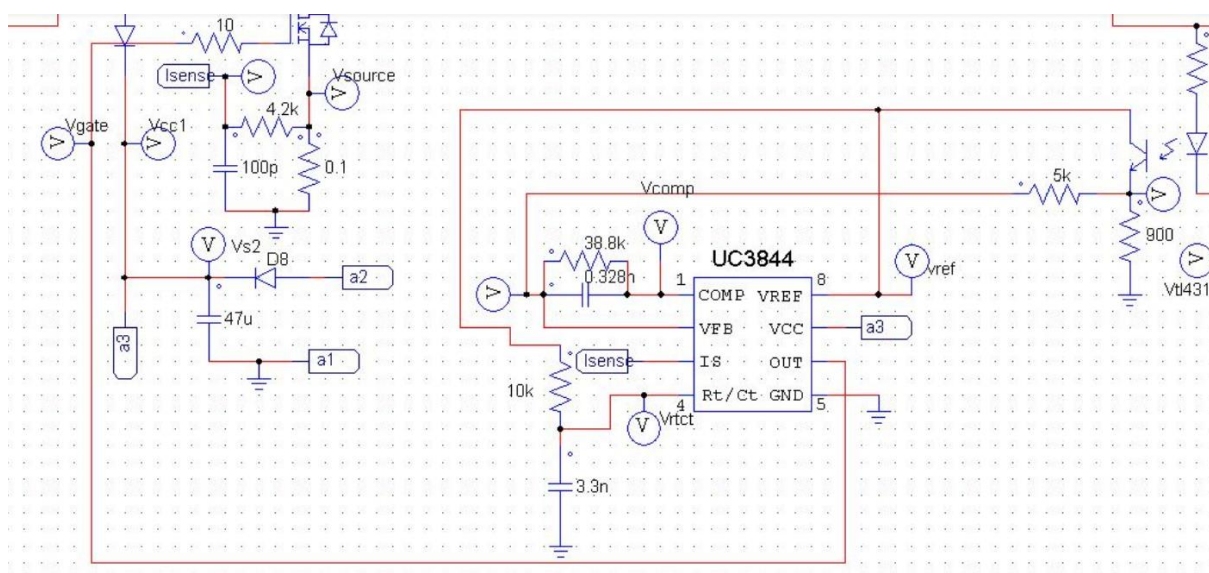
O coletor do foto-acoplador é conectado à tensão de referência do CI PWM, que possui valor de 5V. No emissor do transistor, há dois resistores que funcionam como divisor de tensão, um de 900Ω e um de 5kΩ. O primeiro é conectado ao aterramento do circuito e o segundo é conectado ao compensador e à entrada de *feedback* do CI PWM, e se alterar sua resistência, altera também o ganho de tensão que vai para essas entradas.

3.1.7 Controlador PWM

O CI controlador PWM escolhido foi o UC3844, um circuito integrado de 8 pinos e que é amplamente utilizado em fontes chaveadas e que possui a vantagem de não necessitar de tantos circuitos externos.

Este CI necessita ser alimentado com uma tensão entre 14,5V e 17,5V no pino VCC para um bom funcionamento, e suporta um valor máximo de 30V. VREF é um pino que gera uma tensão de 5V, utilizada tanto no foto-acoplador quanto no pino oscilador, Rt/Ct. A saída OUT deve ser ligada no MOSFET e envia a forma de onda modulada. A Figura 21 mostra o componente no circuito.

Figura 21 – Circuito Integrado UC3844

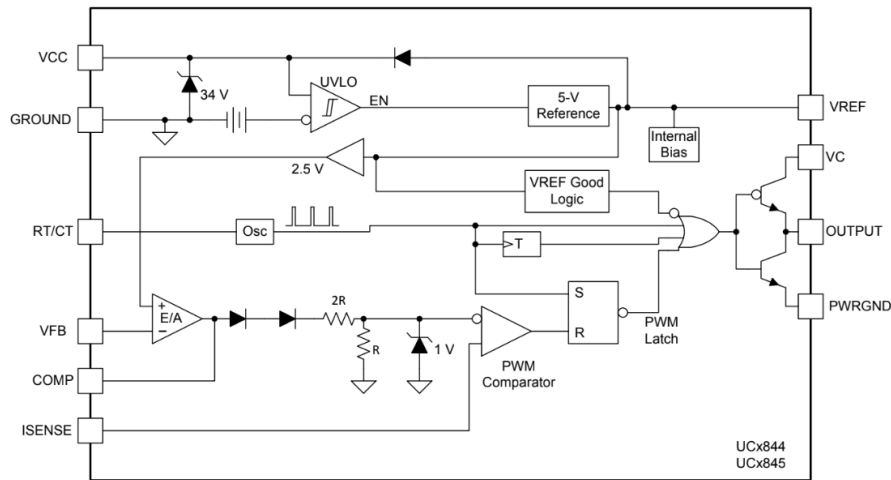


Fonte: Elaborado pelo Autor.

O pino 1, COMP, é um pino ligado à saída de um amplificador de erro interno ao circuito integrado. Este pino geralmente é conectado a um circuito de compensação. O cálculo deste circuito normalmente é realizado através de modelagem matemática e análise de algum método gráfico de resposta em frequência. Neste projeto, devido ao enfoque de validação da simulação como ferramenta ao projetista, os valores foram estimados e ajustados na simulação.

O pino 2 é alimentado com a tensão de realimentação que vem do foto-acoplador. Este pino é uma das entradas do amplificador de erro do circuito integrado e é comparado a uma tensão de referência interna de 2,5V, como mostra a Figura 22.

Figura 22 – Circuito interno do UC3844



Fonte: On Semi (2006)

O pino IS é o pino sensor de corrente. Este pino é conectado a um resistor detector de corrente, localizado no “dreno” do MOSFET. Neste circuito integrado, o oscilador inicia a condução no pino de saída que é conectado à chave e quando a corrente no primário do transformador alcança um determinado nível, o pino sensor de corrente encerra a condução.

O valor da tensão no pino IS não deve ultrapassar o valor de 1V e, se for aplicado uma tensão em formato de rampa, o componente funciona no modo de controle por tensão. O valor utilizado para o resistor sensor de corrente foi de 0,1Ω. Junto a esse resistor, foi adicionado um filtro RC para filtrar transientes do diodo do secundário e outros sinais indesejados. Um resistor de 4,2kΩ e um capacitor de 100pF foram suficientes para esta filtragem.

O pino 4, Rt/Ct, é utilizado para fixar a frequência de oscilação para o sinal PWM. Este pino é ligado a um resistor, que também é conectado ao pino REF, e a um capacitor aterrado. Para dimensionar estes componentes, foi utilizada a Equação (33).

$$f = \frac{1,72}{R_{rt} \cdot C_{ct}} \quad (33)$$

Utilizando o *datasheet* do UC3844, foi selecionada a frequência de 52kHz.

$$R_{rt} \cdot C_{ct} = \frac{1,72}{52 \cdot 10^3} \quad (34)$$

Assumindo um valor de $10k\Omega$ para o resistor, temos:

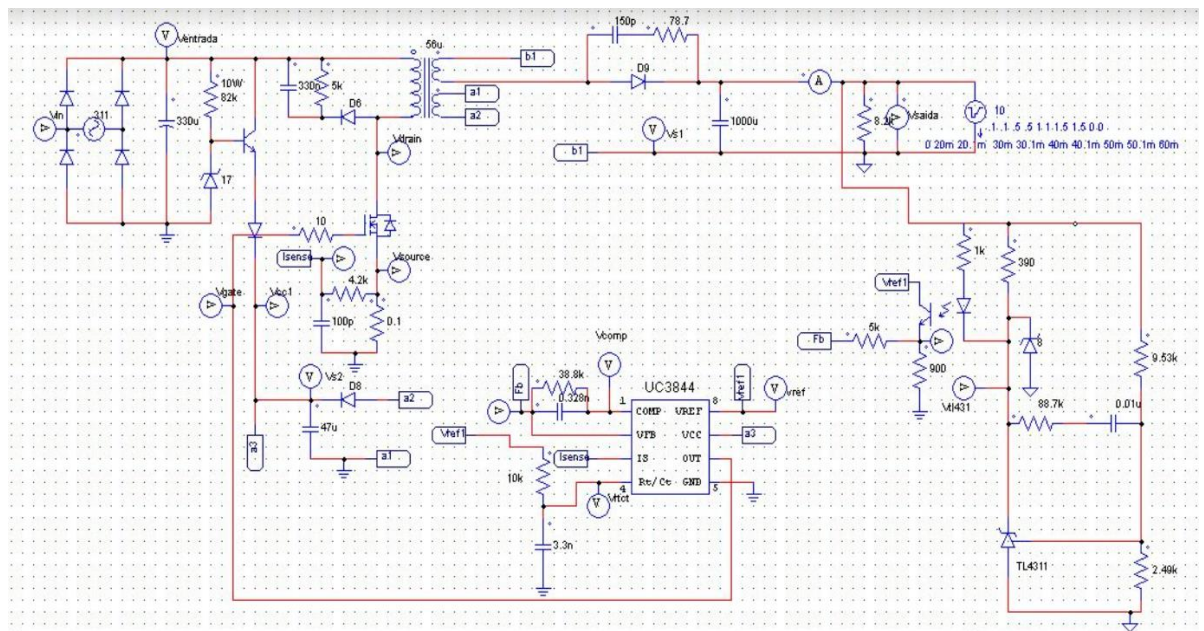
$$C_{ct} = \frac{1,72}{10.10^3 \cdot 52.10^3} \quad (35)$$

$$C_{ct} = 3,3nF \quad (36)$$

4 RESULTADOS SIMULADOS E DISCUSSÃO

A partir do dimensionamento e escolha dos componentes detalhados na seção anterior, o circuito completo pôde ser montado e simulado, como mostra a Figura 23.

Figura 23 – Fonte Chaveada *Flyback*

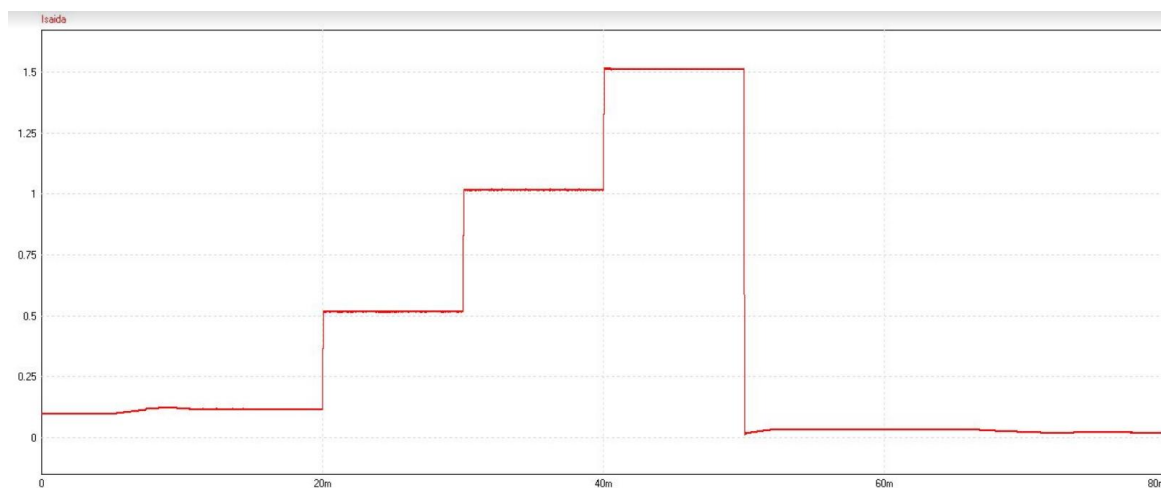


Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.1 SAÍDA DA FONTE

É interessante notar a presença de diversos componentes com um “V” em seu interior. Estes elementos são voltímetros que foram colocados em inúmeros pontos diferentes e relevantes para observar seu comportamento. Após o capacitor da saída do circuito, também é possível observar um amperímetro, indicado pela letra “A”. A Figura 24 mostra a forma de onda da corrente de saída.

Figura 24 – Gráfico da corrente de saída

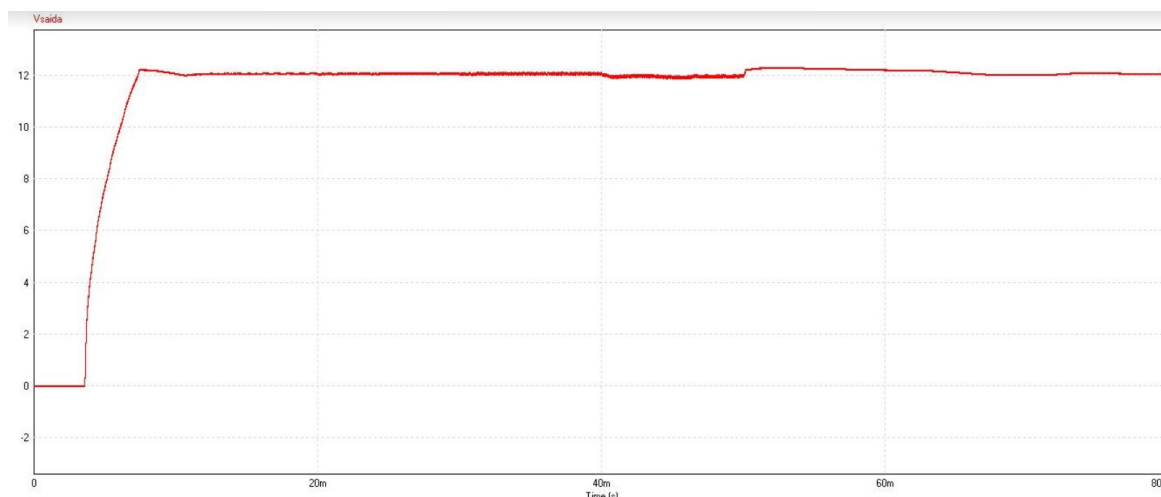


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Analisando essa forma de onda, é possível verificar a atuação do componente IGNL1, mostrado na seção anterior, quando foi falado sobre a saída do circuito. Fazendo um paralelo dessa forma de onda com a Figura 18, é possível verificar que a corrente de saída obedece a parametrização feita no componente, com um comportamento de degrau até alcançar 1,5A e, depois, a fonte é colocada em “vazio”.

Foi utilizado este componente que simula uma variação de carga, para que fosse possível observar se a fonte conseguiria regular ou não a tensão de saída. Essa tensão é mostrada na Figura 25.

Figura 25 – Gráfico de Tensão de saída



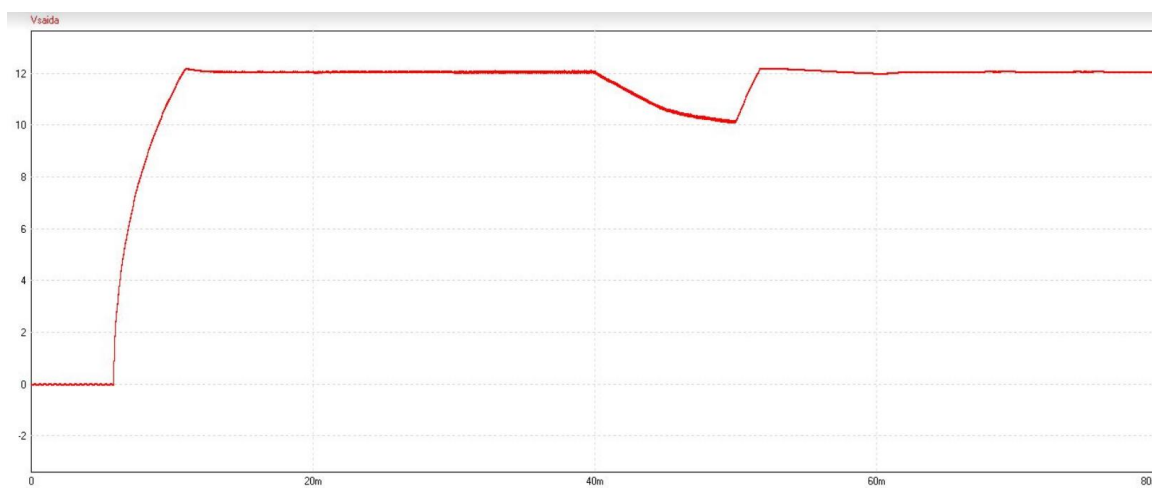
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Em aproximadamente 10ms, a fonte consegue se estabilizar na tensão especificada e se mantém constante em todo o período onde a carga demanda 100mA. Quando a carga muda para 500mA e 1A, a tensão de saída não sofre nenhuma alteração. Quando a carga utiliza a corrente de especificação da fonte, 1,5A, é possível verificar uma leve queda na tensão. Contudo, essa queda não é suficiente para que a tensão desça abaixo de 12V.

No instante de tempo de 50,1ms, quando a fonte é colocada em uma situação “sem carga”, a tensão de saída inicia uma tendência de subida mas volta a se estabilizar em 12V após cerca de 10ms.

Para fins de comparação, a Figura 26 mostra a forma de onda da tensão de saída da fonte chaveada caso, a tensão de entrada seja alterada para 153,56V de pico. Nesse gráfico é possível observar que, no instante em que a carga necessita de 1,5 A, a fonte não consegue fazer a regulagem e a tensão de saída cai para 10V.

Figura 26 – Gráfico da Tensão de Saída alterando a tensão de entrada

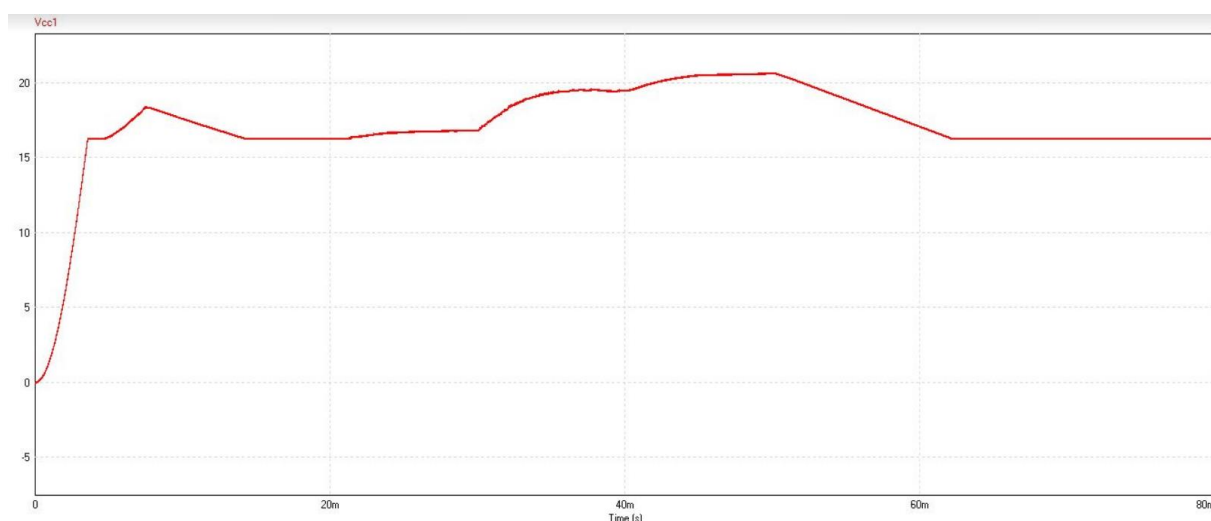


Fonte: Elaborado pelo Autor

4.2 UC3844

Um dos fatores importantes para o bom funcionamento da fonte é a alimentação do CI PWM, responsável pelo controle do circuito. A Figura 27 mostra o gráfico de medição dessa grandeza.

Figura 27 – Gráfico da tensão de alimentação do CI PWM



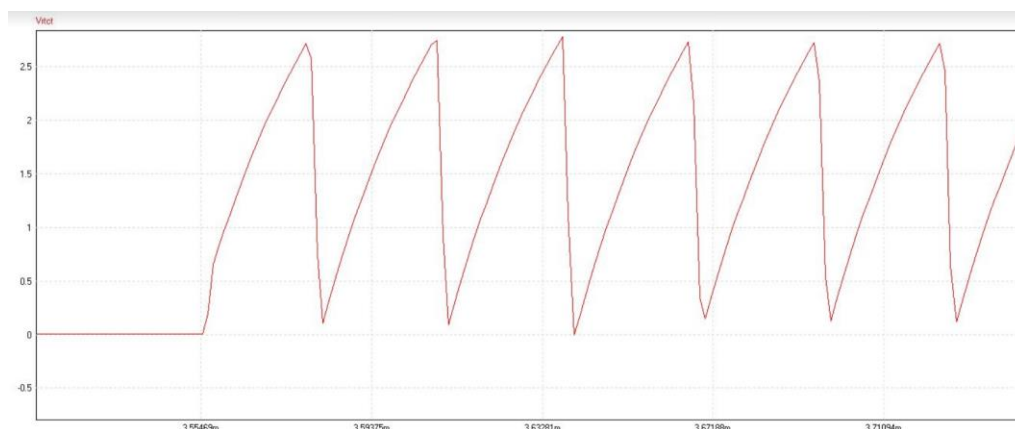
Fonte: Elaborado pelo Autor

Segundo o *datasheet* da On semi (2006), é necessária uma tensão entre 14,5V e 17,5V para o circuito integrado começar a funcionar. Contudo, através das simulações, foi possível observar que o CI não funcionava com tensões inferiores a 16V. Por este motivo, a fonte auxiliar foi dimensionada para fornecer 17V para este componente assim que a fonte fosse conectada à rede.

Quando a fonte auxiliar é cortada pela polarização reversa do diodo e o terciário do transformador passa a fornecer a tensão para o UC3844, a tensão de alimentação do CI sobe nos instantes em que a carga é de 1A e 1,5A. Isso é explicado pelo fato de a fonte estar fazendo a modulação pela largura de pulso de acordo com a saída da fonte. Este fato, porém, não prejudica a alimentação do CI, que suporta um valor máximo de 30V. Quando a fonte atua sem carga, a tensão volta a se estabilizar em aproximadamente 17V.

Outro ponto crucial para o bom funcionamento da fonte é a frequência de oscilação. O resultado da medição da tensão no pino RT/CT é mostrado na Figura 28.

Figura 28 – Gráfico da tensão no pino RT/CT



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com o auxílio dos cursores existentes no *software*, foi possível fazer a medição da frequência dessa forma de onda e confirmar o valor de 52kHz, que foi utilizado como base para o cálculo dos componentes.

A tensão de referência do UC3844 que é utilizada no foto-acoplador e no resistor de tempo do oscilador, como mostra a Figura 29, permanece sempre em 5V, o que garante bom funcionamento da realimentação e da frequência de oscilação do circuito integrado.

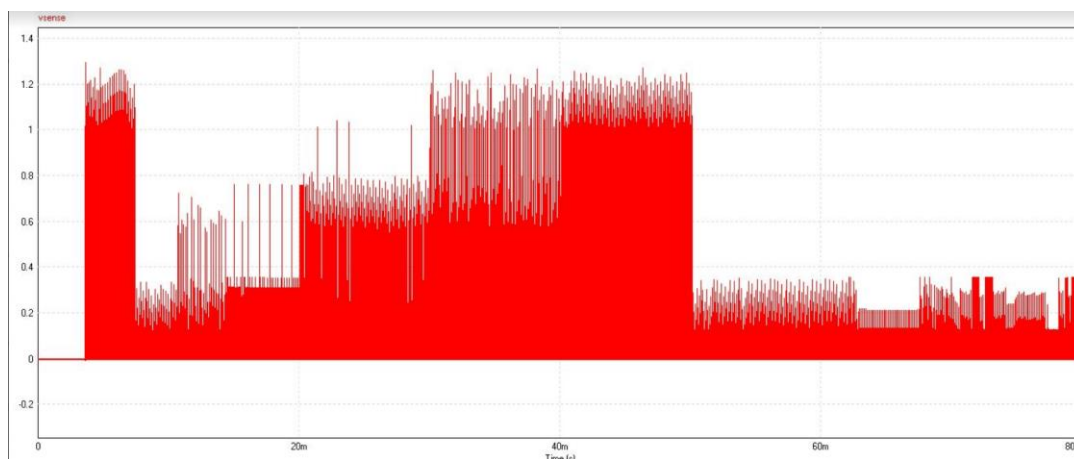
Figura 29 – Gráfico da tensão de referência



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Um outro fator primordial para o bom funcionamento do componente é o pino IS, sensor de corrente. Sua forma de onda é apresentada na Figura 30.

Figura 30 – Gráfico da tensão no pino IS



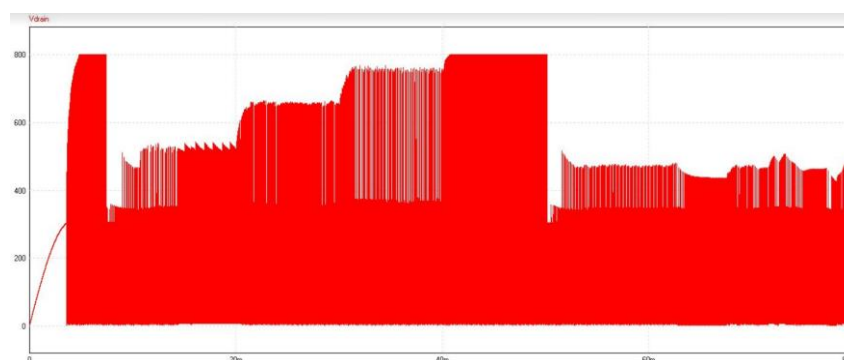
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para o bom funcionamento do pino sensor de corrente, o *datasheet* da On Semi (2006) informa que a tensão medida deve ser de 0,9V a 1,1V. Analisando a Figura 30, é possível perceber que, no início do funcionamento da fonte, quando a corrente de carga é 1A ou 1,5A, esta corrente chegou a aproximadamente 1,2A em alguns momentos. Contudo, isso não foi suficiente para prejudicar o funcionamento do componente, uma vez que ao avaliar o comportamento médio, na maior parte do tempo a tensão neste pino é inferior a 1,1V.

4.3 MOSFET

Um problema comum em fontes chaveadas é a queima do elemento chaveador. Portanto, também é importante avaliar a tensão no dreno do MOSFET. A forma de onda é dada pela Figura 31. Avaliar a tensão de dreno é importante para saber se o MOSFET foi bem dimensionado.

Figura 31 – Gráfico da Tensão de Dreno



Fonte: Elaborado pelo Autor.

5 CONCLUSÃO

O projeto e simulação de um circuito eletrônico em *software* aparentemente parece ser um processo simples, todavia se tornou o primeiro desafio no desenvolvimento do trabalho. Inicialmente foi escolhido o *software* Proteus para a montagem do circuito, mas o software não suportou a simulação da fonte chaveada com os recursos computacionais disponíveis. A segunda opção foi a versão de testes do *software* PSIM, que atendeu a necessidade do projeto.

Escolhido o *software*, foi necessário adaptar o objetivo do trabalho aos componentes e ferramentas disponíveis. O circuito integrado controlador PWM que havia sido utilizado no Proteus, o FSL126MR, não está disponível na biblioteca do *software* PSIM, portanto teve de ser trocado pelo UC3844, o que acarretou no estudo de um novo *datasheet* e mudança nos cálculos do projeto.

O segundo desafio imposto pelo PSIM foi o transformador. A parametrização do componente com os valores calculados não gerou bons resultados na simulação. O componente no *software* também leva em conta o diâmetro dos cabos utilizados nos enrolamentos, a indutância do primário, secundário, terciário e indutância de magnetização. Para a solução desse problema, foi necessário estimar valores para as indutâncias e ajustar o valor dos enrolamentos através da simulação.

Utilizar o *software* como ferramenta de apoio, validação de projeto e estudo se provou uma boa alternativa. A agilidade na montagem devido a vastidão de componentes em sua biblioteca e a praticidade na medição das grandezas são pontos positivos em se levar em conta. Cada *software* possui diferentes formas de uso, mas tanto o Proteus quanto o PSIM são programas bem intuitivos e simples, o que torna seu uso bem amigável a novos usuários.

Para um projetista experiente no desenvolvimento de fontes chaveadas, a simulação pode consumir tempo desnecessário para a finalização do projeto, mas pode ser útil para a validação de estágios específicos, como o circuito de realimentação, controle PWM e até a simulação da fonte em “malha aberta”. Para projetistas que não possuem grande conhecimento sobre esse tipo de fonte, o *software* pode auxiliar muito no aprendizado e evitar perda desnecessária de componentes.

REFERÊNCIAS

- BARBI, Ivo. **Projetos de fontes chaveadas**. 3. ed. Florianópolis: Edição do Autor, 2014. 304 p.
- BONA, Daniel Dezan de *et al.* **Projeto de fonte chaveada com conversor flyback**. 2010. Disponível em: https://www.professorpetry.com.br/Bases_Dados/Relatorios_Alunos/Fonte%20Flyback_Relatorio_Dezan.pdf. Acesso em: 14 jan. 2022.
- EJURY, Jens. **Buck converter design**. Durham: Infineon Technologies North America, 2013. 17 p.
- EVANGELISTA, Rafael Cruz. **Desenvolvimento de um conversor flyback para um equipamento na aplicação de fototerapia led no tratamento de cicatrização de feridas**. 2015. 80 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Eletrônica) - Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2015.
- MEHL, Ewaldo L. M. **Fontes chaveadas**. Disponível em: <http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/downloads/FontesChaveadas.pdf>. Acesso em: 08 jan. 2022.
- MELLO, Luiz Fernando Pereira de. **Projetos de fontes chaveadas**. 2. ed. São Paulo. Editora Érica, 1988. 196p.
- ON SEMI. **UC3844 Datasheet**. Disponível em: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/uc3844-d.pdf>. Acesso em 25 jan. 2022.
- POMILIO, José Antenor. **Pré-reguladores de fator de potência**. 2. ed. Campinas: Edição do Autor, 2014. 115 p. Disponível em: <http://www.drb-m.org/ep/Pre-reguladores%20de%20Fator%20de%20Potencia.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2022.
- POZZATTI, Evandro. **Projeto e análise de uma fonte chaveada em alta frequência para laboratório de ensino com saídas: $\pm 12\text{ V}$, $\pm 5\text{ V}$, $\pm 3,3\text{ V}$ e variável até 25 V** . 2015. 76 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Eletrônica), Departamento Acadêmico de Eletrônica – Daeln, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2015.
- SHARP. **PC817X Datasheet**. Disponível em: <https://www.farnell.com/datasheets/73758.pdf>. Acesso em 10 fev. 2022.
- SILVA, Daniel Monteiro da. **Design and implementation of a switching power supply for electrical panels using the flyback converter**. 2019. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.
- SOIKA, Yuri Wendhausen. **Desenvolvimento de uma fonte de alimentação com múltiplas saídas, para um barco movido a energia solar**. 2017. 102 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Curso Superior de Tecnologia em Eletrônica Industrial) - Departamento

Acadêmico de Eletrônica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnológica de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

TEXAS INSTRUMENTS. **UC3844 Datasheet**. Disponível em:

https://www.ti.com/lit/ds/symlink/uc3844.pdf?ts=1646694741625&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FUC3844%253Futm_source%253Dsupplyframe%2526utm_medium%253DSEP%2526utm_campaign%253Dnot_alldatasheet%2526DCM%253Dyes%2526clid%253DCjgKEAiA95aRBhDqqcKXv5PO3EoSJABRu1AwqAwjTUj1oJjFX2rlU3TpHipBWpEUHnQZYB9tQezmufD_BwE. Acesso em: 25 nov. 2022.

VIEIRA, Igor da Costa. **Projeto de um conversor flyback auto-oscilante de baixo custo para led's de potência**. 2009. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.