

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

**ALEXANDRE RAMOS SOUTO
EVANDRO CASEIRO OLIVEIRA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM CONVERSOR CC ISOLADO PARA ENSINO DE
ELETRÔNICA DE POTÊNCIA**

CAMPO MOURÃO

2022

**ALEXANDRE RAMOS SOUTO
EVANDRO CASEIRO OLIVEIRA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM CONVERSOR CC ISOLADO PARA ENSINO DE
ELETRÔNICA DE POTÊNCIA**

Development of an isolated converter cc for theaching power electronics

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Eletrônica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador Prof. Dr. Gilson Junior Schiavon

CAMPO MOURÃO

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**ALEXANDRE RAMOS SOUTO
EVANDRO CASEIRO OLIVEIRA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM CONVERSOR CC ISOLADO PARA ENSINO DE
ELETRÔNICA DE POTÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Eletrônica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 06/junho/2022

Leonardo Faria Costa
Doutor em Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Jucélia Kuchla Vieira
Doutora em Arquitetura e Urbanismo
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Gilson Junior Schiavon
Doutor em Engenharia Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CAMPO MOURÃO
2022**

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de nossas vidas. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradecemos ao nosso orientador Prof. Dr. Gilson Junior Schiavon, pela sabedoria com que nos guiou nesta trajetória.

Gostaríamos de deixar registrado também o nosso reconhecimento às nossas famílias, pois acreditamos que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

RESUMO

A eletrônica de potência obteve avanços expressivos, em todas as suas tecnologias com o surgimento de componentes de comutação de altas velocidades, o que viabilizou o advento de conversores cada vez mais eficientes que utilizam altas frequências, e proporcionam redução de peso e volume dos dispositivos. Neste trabalho, desenvolve-se o projeto de um conversor CC chaveado em alta frequência tipo isolado na topologia *push-pull*, para ser utilizado como ferramenta pedagógica em aulas práticas na disciplina de eletrônica de potência. Com intuito de agregar disciplinas que tenham como objeto de estudo conversores chaveados. Então, o presente trabalho aborda de maneira extensiva todo o desenvolvimento e dimensionamento do circuito conversor até sua construção. Além disso, desenvolve-se um roteiro para ser utilizado em aulas de laboratório, com experimentos recomendados com o circuito conversor. O projeto do conversor ficou dentro de todas as especificações do projeto inicial, a placa foi construída com características que fizessem dessa promissora ferramenta didática um dispositivo seguro e resiliente para experimentos em laboratório.

Palavras-chave: push-pull; conversores cc chaveados; eletrônica de potência; alta frequência.

ABSTRACT

Power electronics has made significant advances in all its technologies with the emergence of high-speed switching components, which enabled the advent of increasingly efficient converters that use high frequencies, and provide weight and volume reduction of devices. In this work, the design of an isolated high frequency switched DC converter in the push-pull topology is developed, to be used as a pedagogical tool in practical classes in the discipline of power electronics. In order to add disciplines whose object of study is switched converters. So, the present work extensively covers the entire development and design of the converter circuit until its construction. In addition, a script is developed to be used in laboratory classes, with recommended experiments with the converter circuit. The converter project was within the specifications of the initial project, and the board was built with features that made this promising teaching tool a safe and resilient device for laboratory experiments.

Keywords: push-pull; convertes switched-mode; power electronics; high frequency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Conversor CC-CC e onda da tensão de saída	13
Figura 2 - Curva de excursão do fluxo magnético	15
Figura 3 - Conversor <i>Push-Pull</i>	15
Figura 4 - Formas de onda conversor <i>Push-Pull</i> . (a) Tensão em V_{ce1} (b) Tensão V_{ce2} (c) Tensão Indutor $L1$	17
Figura 5 - Circuito Snnuber	21
Figura 6 - Esquemático do Conversor <i>Push-Pull</i>	26
Figura 7 - Modelo 3D do Conversor.....	27
Figura 8 - Protótipo Conversor	29
Figura 9 - Conversor Versão Final	30
Figura 10 - V_{ds1} e V_{ds2}	30
Figura 11 - Tensão em V_L	31
Figura 12 - Tensão de saída	32
Figura 13 - Sinal PWM de controle.....	33
Figura 14 - Tensão de saída	34
Figura 15 - Sinal PWM de controle.....	34
Figura 16 - Tensão de saída	35
Figura 17 - Sinal PWM de controle.....	35
Figura 18 - Sinal PWM de controle.....	36
Figura 19 - Transiente de entrada de carga	38
Figura 20 - Transiente de saída de carga	38
Figura 21 - Transiente	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de K_j e x para alguns tipos de núcleo	18
Tabela 2 - Características do Conversor	22
Tabela 3 – Resultados de operação em malha aberta	32
Tabela 4 - Resultados de operação em malha fechada.	37
Tabela 5 - Operação em Malha Fechada com variação de carga	37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Objetivo Geral	10
1.2	Objetivos Específicos	11
1.3	Justificativa.....	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	Conversores CC-CC chaveados.....	13
2.2	Conversores CC-CC isolados.....	14
2.3	Conversor <i>Push-Pull</i>	14
2.4	Transformador	18
2.5	Indutor	19
2.6	Snubber	20
3	METODOLOGIA	22
3.1	Projeto do conversor <i>Push-Pull</i>	22
3.2	Razão cíclica	22
3.3	Indutor	23
3.4	Capacitor de filtro.....	24
3.5	Transformador	24
3.6	Snubber	25
3.7	Circuitos Auxiliares.....	25
3.8	Proposta de Aula Prática	27
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	29
4.1	Operação em malha aberta.....	31
4.2	Operação em malha fechada	35
5	CONCLUSÃO	40
	REFERÊNCIAS.....	41
	APÊNDICE A - Aula prática – Conversores CC-CC conversor isolado <i>push-pull</i> 42	
	REFERÊNCIAS.....	60
	ANEXO A - Dados de núcleo de ferrite	61

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de eletrônica de potência sempre foram muito importantes para a sustentabilidade energética, pois, conforme Mohan (2011), a tecnologia é o que permite atender às necessidades energéticas da sociedade, mas sem comprometer a capacidade atual de geração. O uso de energias renováveis para gerações de eletricidade e a busca constante por maior eficiência energética são os pilares da sustentabilidade. Assim, a eletrônica de potência tem uma importante missão na busca por otimizar sistemas de transferência de potência.

As companhias de energia elétrica no Brasil fornecem uma tensão senoidal eficaz de 127 V a uma frequência de 60 Hz, podendo variar para 220 V em algumas regiões, no entanto, as linhas de transmissão possuem tensões muito altas para nossos dispositivos eletrônicos (MALVINO, 1997).

De um modo geral, conforme Mohan (2011), os sistemas de conversão de energia são empregados em quase todos os meios de geração e transmissão. Para Maia (2016), as fontes renováveis de energia e ambientalmente corretas, como eólica e solar, necessitam de condicionamento das grandezas envolvidas no processo de conversão. Além disso, grande parte dos equipamentos conectados aos sistemas elétricos, desde pequenos dispositivos eletrônicos e até grandes cargas de uso industrial, podem operar com maior eficiência por meio das técnicas estudadas em eletrônica de potência.

Depende-se cada vez mais de baterias em dispositivos eletrônicos, tais como celulares, *notebooks*, *tablets*, relógios inteligentes e mais recentemente carros, haja vista que para cada dispositivo desses, há um conversor CA-CC que converte tensões da rede CA (Corrente Alternada) para níveis CC (Corrente Contínua) compatíveis com esses aparelhos (MAIA, 2016).

Essa conversão CA-CC é feita por intermédio de circuitos compostos exclusivamente por diodos, podendo ser estes arranjos o retificador de meia onda, retificador de onda completa e o retificador em ponte (MALVINO, 1997).

E para chegar a tensões menores para as mais diversas aplicações, pode-se utilizar reguladores lineares ou um conversor chaveado, em cujos circuitos busca-se manter constante o valor médio da tensão de saída. Na prática, os reguladores lineares obtêm rendimento médio de 50%, enquanto os reguladores chaveados ou conversores CC-CC (*choppers*) podem ter rendimentos que variam entre 70% e 98%,

dependendo das potências, frequências de chaveamento e tecnologias empregadas no projeto (BARBI; MARTINS, 2008).

De acordo com Barbi e Martins (2008), esses números podem mostrar a importância desses conversores para o desenvolvimento sustentável, além de evidenciar a importância dos estudos acerca desses dispositivos, que são cada vez mais utilizados em dispositivos eletrônicos.

As disciplinas que envolvem eletrônica de potência também envolvem os conversores CC-CC em seus conteúdos, embora apresentem um grande enfoque para os conversores não isolados, como *buck*, *buck-boost* e *boost*, deixando em segundo plano conversores muito utilizados pela indústria em projetos e produtos comerciais (destinados a consumidores finais). Portanto, tais conversores fazem parte do cotidiano, conquanto acabem sendo deixados para disciplinas de aprofundamento ou programas de pós-graduação. Estes conversores são denominados como conversores isolados, como exemplo dessa topologia, o conversor *push-pull*.

Assim sendo, a proposta do trabalho consiste no projeto de um conversor estático e isolado da topologia supracitada, com a finalidade de ser utilizado como ferramenta didática para a comunidade acadêmica, para agregar no ensino de eletrônica de potência, incitando, ainda, o aprofundamento desta disciplina importante, por meio de experimentação problematizada para desenvolver autonomia no processo de aprendizado dos profissionais do futuro.

Por fim, essa experimentação problematizadora é bem contextualizada por Paulo Freire (2005, p. 67), que afirma, “a pedagogia problematizadora, o professor deve suscitar nos estudantes o espírito crítico, a curiosidade, a não aceitação do conhecimento simplesmente transferido”.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo desse trabalho é o dimensionamento e desenvolvimento de um protótipo didático de um conversor isolado da topologia *push-pull*. Com a finalidade de servir como ferramenta pedagógica em disciplinas que envolvem eletrônica de potência e conversores chaveados.

1.2 Objetivos Específicos

- Estudar sobre o conversor isolado *push-pull*;
- Dimensionar os circuitos de potência para o projeto;
- Projetar um circuito para feedback isolado;
- Confeccionar três exemplares do conversor para que possam ser utilizados na UTFPR campus Campo Mourão;
- Desenvolver um roteiro de aula prática com experimentos para estudo do conversor CC desenvolvido, em laboratório.

1.3 Justificativa

Os conversores CC-CC são aplicações de eletrônica as quais são encontradas com grande facilidade, principalmente por conta da sua grande eficiência energética e portabilidade, além do alto nível de segurança ao consumidor final, características indispensáveis para o mercado atual (BARBI; MARTINS, 2008).

Portanto, por se tratar de um assunto muito difundido no meio acadêmico das engenharias elétrica e eletrônica. Apesar disto, os conversores mais estudados dentro das disciplinas de graduação são os de tipo não isolados. E assim, os conversores isolados ficam para atividades de aprofundamento, esses que são muito importantes e muito mais difundidos em forma de produtos do cotidiano, bem como na topologia objeto de estudo deste trabalho o conversor isolado estático *push-pull*.

Para Mello (1996), a maior vantagem desses conversores sobre os tradicionais *buck*, *buck-boost* e *boost* é não haver conexão elétrica entre entrada e saída. Uma maneira de isolar entrada e saída pode ser utilizando um transformador, embora um transformador operando em frequências baixas (50 Hz ou 60 Hz) requeira um núcleo magnético muito grande, pesado e conseqüentemente caro.

A solução empregada pelos conversores isolados é utilizar um transformador em um esquema de chaveamento com frequências muito superiores à frequência da rede de distribuição, permitindo transformadores muito menores, mais leves e mais baratos (HART, 2012).

Além disso, para Gozzi (1999), cursos de engenharia são cursos que contam com uma carga teórica muito extensa, e cada vez mais se carece de criatividade por

parte dos docentes para conseguir a atenção dos alunos, principalmente em disciplinas que há falta de material para aplicação prática.

Atividades práticas, que colocam alunos em contato com circuitos e fenômenos elétricos outrora estudados, acabam por incentivar não só o aprendizado, mas também a permanência do acadêmico na instituição, uma vez que o aluno que ingressa ao curso de engenharia deseja o mais breve possível travar contato com disciplinas de formação profissional (GOZZI, 1999).

Deste modo, permanecer vários períodos cursando somente disciplinas básicas gerais tem sido um fator de desmotivação, e aliado a outros fatores, acaba resultando na desistência de muitos alunos logo nos primeiros semestres de graduação (GOZZI, 1999).

Segundo Gozzi (1999), isso se dá por conta especificamente das disciplinas da área de potência, que geralmente apresentam muitos tópicos para serem abordados e pouco tempo para aplicação, justamente pela demanda de tempo que se necessita para montar circuitos e experimentos em laboratório.

Sendo assim, circuitos didáticos previamente desenvolvidos são de grande auxílio durante as aulas, para Gozzi (1999), eles que podem agregar muito ao conteúdo, economizar o precioso tempo disponível e ainda proporcionar um contato prático com equipamentos, ferramentas e circuitos para os discentes.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para Mello (1996), a eletrônica de potência teve sua maior taxa de crescimento nos últimos 20 anos e o surgimento dos dispositivos de chaveamentos de alta frequência foram os expoentes desse crescimento. Eles possibilitaram o desenvolvimento de conversores CC-CC cada vez menores e mais leves, características muito desejáveis nos dias de hoje.

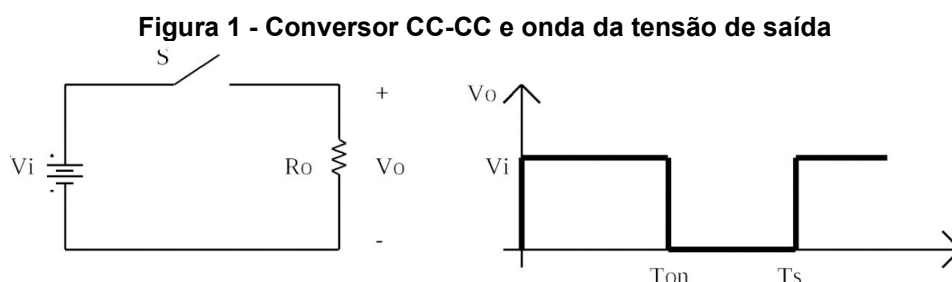
Esse capítulo tem como objetivo fundamentar estes dispositivos que serão tratados nesse trabalho, mais especificamente o conversor CC-CC isolado na configuração *push-pull*.

2.1 Conversores CC-CC chaveados

Segundo Barbi e Martins (2008), um conversor CC-CC consiste em um sistema cuja entrada será uma fonte de alimentação em corrente contínua V_i , e uma saída em corrente também contínua V_o , com uma tensão média.

O modelo teórico de um conversor chaveado pode ser descrito com um circuito simples, o qual pode ser observado na Figura 1. Esse dispositivo funciona de maneira lúdica, dispondo de uma chave eletrônica localizada entre a fonte de entrada e a carga (HART, 2012).

Essa chave é controlada por um trem de pulsos que regula a tensão média que vai para a carga, uma vez que a tensão é aplicada em sua totalidade sobre a carga quando o nível de tensão do trem de pulsos é definido como alta (o elemento chave entra em condução completa) e o nível de tensão da carga vai a zero quando temos um sinal de controle também igual a zero (o elemento chave entra em corte) (HART, 2012).



Fonte: Adaptado de Hart (2012, p. 4).

A tensão média de saída assim é dada pela área da curva mostrada na Figura 1:

$$V_o = \frac{1}{T} \int_0^T v_o(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{DT} v_i dt = V_i \cdot D \quad \text{Eq.(1)}$$

Assim, o controle da tensão de saída é realizado por meio do ajuste do ciclo de trabalho D , que nada mais é que a fração de período de chaveamento em que a chave fica fechada, onde f é a frequência de chaveamento (HART 2012).

$$D = \frac{t_{ligado}}{t_{ligado} + t_{desligado}} = \frac{t_{ligado}}{T} = t_{ligado} \cdot f \quad \text{Eq.(2)}$$

No entanto, a tensão de saída mostrada na Figura 1 não é adequada para a maioria das aplicações, portando, o ideal é conseguir na saída um sinal CC puro, com o menor nível de *ripple* (ruído) possível. Logo, a solução para esse problema é adicionar um filtro passa-baixa ao conversor para melhorar a qualidade do sinal de saída (HART, 2012).

2.2 Conversores CC-CC isolados

Em determinadas aplicações, faz-se necessário que a saída de um conversor seja eletricamente isolada da entrada, de modo que, para Pomilio (2018), recomenda-se o uso de um transformador para promover o isolamento galvânico entre entrada e saída.

Em alguns casos, o uso desta isolação implica na alteração do circuito para permitir um adequado funcionamento do transformador, ou seja, para evitar a saturação do núcleo magnético, uma vez que para o funcionamento adequado do conversor, o fluxo magnético não pode ser interrompido em nenhuma hipótese (POMILIO, 2018).

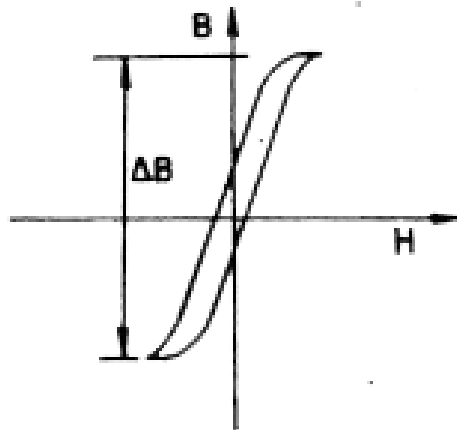
2.3 Conversor *Push-Pull*

O conversor *push-pull* é derivado do conversor não isolado *buck*, com a utilização de um transformador com dois enrolamentos no primário e dois

enrolamentos no secundário para promover o isolamento galvânico entre entrada e saída (MELLO, 1988).

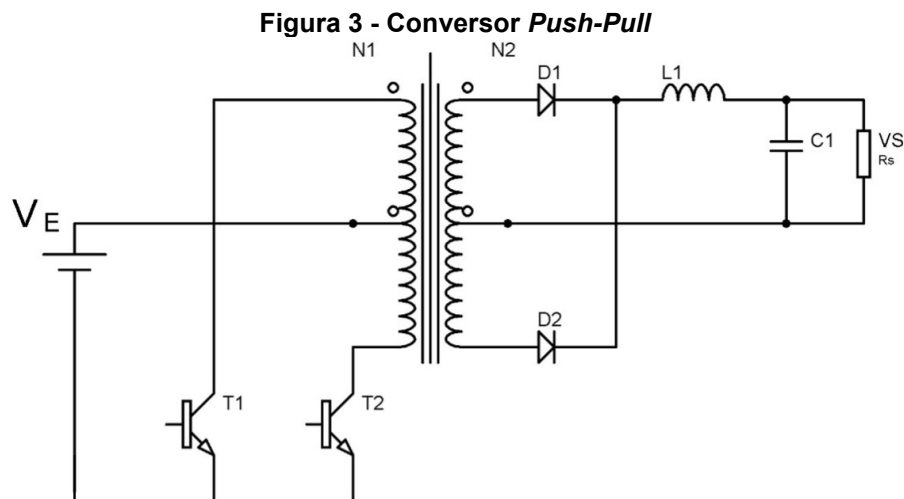
É possível notar na Figura 2 a curva de excursão $B - H$ da densidade de fluxo magnético acontecendo entre o 1º e 3º quadrante, que segundo Mello (1988), esse comportamento é característico do transformador com dois enrolamentos em fase no primário.

Figura 2 - Curva de excursão do fluxo magnético



Fonte: Adaptado de Mello (1996, p. 155).

A topologia *push-pull* pode ser visualizada na Figura 3:



Fonte: Adaptado de Mello (1996, p. 153).

O conversor *push-pull* que em uma tradução literal para o português significa empurrar e puxar, faz alusão ao seu funcionamento, com chaves acionando o transformador alternadamente (MELLO, 1996).

Quando $T1$ satura $T2$, deve necessariamente estar em corte, e consequentemente $V_{ce1} = 2V_E$, como pode ser visto na Figura 4(a), graças aos enrolamentos do primário serem em fase e possuírem o mesmo número de espiras. Então, nessa situação, a tensão V_E vai para o primeiro enrolamento do primário, a tensão de entrada então é induzida ao secundário, respeitando a relação de espiras $N1/N2$. Essa tensão é retificada pelo diodo $D1$ que segue para o indutor $L1$ (MELLO, 1996).

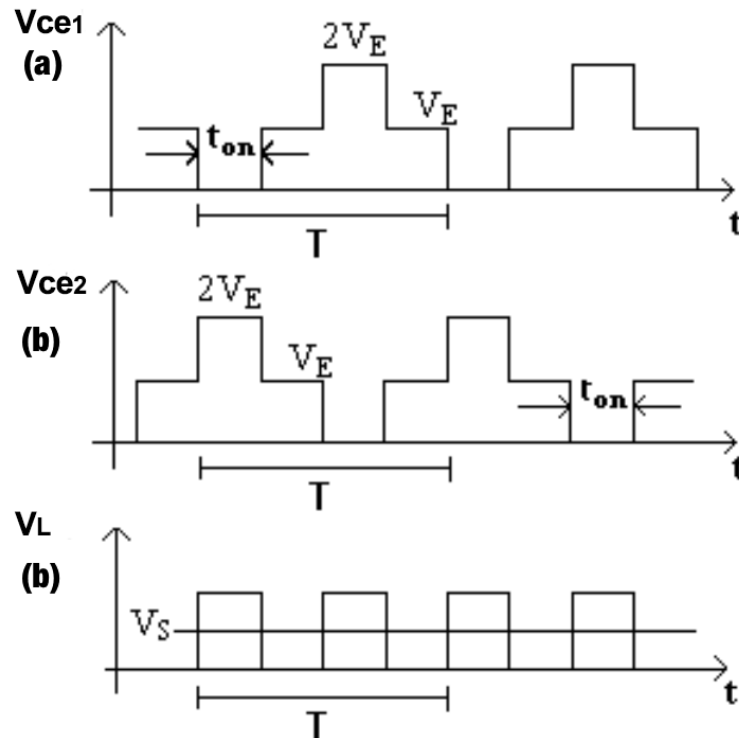
Após esse primeiro período, o ciclo de acionamento de $T1$ entra em corte juntamente com $T2$ e assim ficam por um determinado instante, conhecido como tempo morto (POMILIO, 2018).

No período de tempo morto, ambos os transistores ficam com $V_{ce} = V_e$, dado que a corrente armazenada no indutor $L1$ circula pelos diodos $D1$ e $D2$, deixando os enrolamentos do secundário em curto, que por sua vez fazem zerar a tensão do primário. Vale lembrar que o tempo morto é um período necessário, considerando que $T1$ e $T2$ jamais podem ser acionados ao mesmo tempo a fim de não causar um curto circuito na fonte de entrada. Portanto, o *duty cycle* (período de chaveamento) D deve ser inferior a 50% para cada transistor (POMILIO, 2018).

Após o tempo morto, é a vez de $T2$ saturar, e ao contrário do primeiro ciclo, agora $V_{ce2} = 2V_E$, como ilustrado na Figura 4(B), fazendo agora $D2$ conduzir a corrente até o indutor (MELLO, 1996).

Uma característica importante que pode ser visualizada na Figura 4(c) é a frequência de pulsos que chegam no indutor, que é exatamente o dobro da frequência dos pulsos de chaveamento dos transistores (POMILIO, 2018).

Figura 4 - Formas de onda conversor *Push-Pull*. (a) Tensão em Vce1 (b) Tensão Vce2 (c) Tensão Indutor L1



Fonte: Adaptado de Mello (1996. p. 153).

A tensão pulsante do indutor é então imediatamente filtrada por um filtro passa-baixa LC que estabiliza a tensão na carga, fazendo uso do próprio indutor já usado no conversor, sendo necessária apenas a adição de um capacitor (MELLO, 1988).

Por meio da Equação 3, calcula-se a tensão pulsante do indutor, onde ΔI_S e ΔV_S são respectivamente variação de corrente de saída e variação da tensão de saída (MELLO, 1988).

$$C \geq \frac{L(\Delta I_S)^2}{2 \cdot \Delta V_S \cdot V_S} \quad \text{Eq.(3)}$$

A tensão de saída V_S é equivalente à tensão no indutor $L1$, portanto, é possível calcular por meio da tensão no indutor com a Equação 4, onde D é o *duty cycle* (fração de tempo em que o *PWM* permanece alto em um período T em que $T = \frac{1}{f}$)

$$V_S = \frac{2D(V_E - V_{ce_sat})}{\eta} - V_D \quad \text{Eq.(4)}$$

Segundo Mello (1988), a função de transferência V_S/V_E do conversor estudado não depende da corrente de saída, o que significa uma boa regulação contra variações de corrente. Desta forma, o conversor *push-pull* é preferencialmente

utilizado no modo contínuo de corrente e o limiar entre os modos contínuo e descontínuo de corrente é calculado pela Equação 5:

$$I_{S_min} = \frac{D_{min}(1 - 2D_{min})V_{E_max}}{2 \cdot \eta \cdot L \cdot f} \quad \text{Eq.(5)}$$

2.4 Transformador

Todo núcleo de um transformador é composto por uma área efetiva (A_e), por onde flui o campo magnético, e por uma área de janela (A_j) de superfície para enrolar as espiras. Portanto, $A_p = A_e \cdot A_j$ cujo produto das áreas também pode ser calculado por meio da Equação 6 (MELLO, 1988).

$$A_p = \left(\frac{3,98 \cdot P_s \cdot 10^4}{K_j \cdot B \cdot f} \right)^{\frac{1}{1-x}} \quad \text{Eq.(6)}$$

Neste caso, B é a densidade de campo magnético (característica específica de cada material), K_j o coeficiente de densidade dos fios do enrolamento e P_s é a potência de saída. Os valores de K_j e de x para alguns tipos de núcleos podem ser encontrados na Tabela 1:

Tabela 1 - Valores de K_j e x para alguns tipos de núcleo

Núcleo	K_j	$20^\circ C \leq \Delta t \leq 60^\circ C$	x
POTE		$74,78 \cdot \Delta T^{0,54}$	+0,17
EE		$63,35 \cdot \Delta T^{0,54}$	+0,12
X		$56,72 \cdot \Delta T^{0,54}$	+0,14
RM		$71,7 \cdot \Delta T^{0,54}$	+0,13
EC		$71,7 \cdot \Delta T^{0,54}$	+0,13
PQ		$71,7 \cdot \Delta T^{0,54}$	+0,13

Fonte: Adaptado de Mello (1996, p. 58).

O valor do A_p encontrado é o mínimo valor para que o núcleo do projeto seja atendido, portanto, as especificações do núcleo do transformador devem ser calculadas para determinar o dispositivo ideal para o projeto, bem como o número mínimo de espiras que garanta que o núcleo não entrará em saturação durante o funcionamento do conversor (MELLO, 1988).

O número de enrolamentos para cada uma das bobinas do primário e do secundário do transformador no conversor *push-pull* é calculado usando as Equações 7 e 8 (MELLO, 1988).

$$N_p \geq \frac{V_{E_{min}} \cdot D_{max}}{A_e \cdot B \cdot f} \quad \text{Eq.(7)}$$

$$N_s = \frac{N_p}{\eta} \quad \text{Eq.(8)}$$

Para o cálculo da A_{cu} (área de seção do cobre em cm), primeiro é necessário encontrar a densidade de corrente J com a Equação 9 e a $I_{O_{RMS}}$ (valor eficaz da corrente de saída) com a Equação 10 (MELLO, 1988).

E finalmente, com a Equação 11, determinar a área de seção do cobre.

$$J = (A_p \cdot K_j)^{\frac{-1}{1-x}} \quad \text{Eq.(9)}$$

$$I_{O_{RMS}} = \frac{I_o}{\eta} \sqrt{D_{max}} \quad \text{Eq.(10)}$$

$$A_{cu} = \frac{I_{O_{RMS}}}{J} \quad \text{Eq.(11)}$$

2.5 Indutor

Manipulando algebricamente a Equação 6 para isolar o elemento indutor L , com a finalidade de chegar na Equação 12 que é utilizada para encontrar o indutor para o conversor *push-pull*:

$$L \geq \frac{D_{min}(1 - 2D_{min})V_{E_{max}}}{2 \cdot \eta \cdot I_{S_{min}} \cdot f} \quad \text{Eq.(12)}$$

Para que seja possível determinar o tamanho do núcleo do indutor, utilizado as mesmas equações para o cálculo do núcleo do transformador, exceto para o número de espiras, bem como a área de seção do cobre.

Primeiramente, para determinar o número de enrolamentos do indutor, é preciso calcular por meio da Equação 13, a energia armazenada em seu núcleo de acordo com as especificidades do projeto (MELLO, 1988).

$$E = \frac{1}{2} L \cdot (I_{O_{max}} + I_{O_{min}})^2 \quad \text{Eq.(13)}$$

Para Mello (1988), o fator de indutância deve ser estimado por meio da Equação 14, e para isso, deve-se usar A_e (área efetiva do núcleo), que pode ser encontrada na Tabela 1 de dados de núcleos de ferrite, disposta no Anexo.

$$Al = \frac{A_e \cdot B^2}{2E} \quad \text{Eq.(14)}$$

O número de espiras é determinado por meio da Equação 15 (MELLO, 1988).

$$N = \sqrt{\frac{L}{Al}} \quad \text{Eq.(15)}$$

Para o cálculo da área de seção do cobre, devemos usar a Equação 16 (MELLO, 1988).

$$A_{cu} = \frac{I_s}{J} \quad \text{Eq.(16)}$$

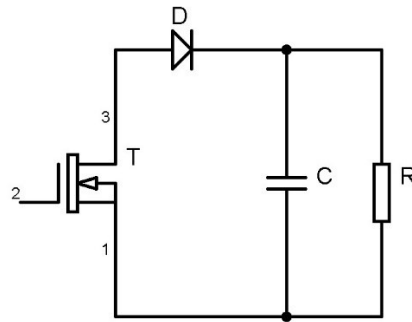
2.6 Snubber

Segundo Hart (2012), grande parte das perdas de energia em um transistor ocorre durante a sua comutação, assim o circuito *snubber* ajuda a reduzir a perda de potência em um transistor durante o chaveamento, além de funcionar como um circuito de proteção para o dispositivo em chaveamentos de altas tensões e correntes.

O circuito é utilizado para amortecer as oscilações de alta frequência geradas durante a comutação dos dispositivos de potência, graças às suas indutâncias e capacitâncias parasitas (HART, 2021).

Deste modo, para evitar picos elevados de tensão nos semicondutores, são utilizados os circuitos *snubber* para proteger os dispositivos de chaveamento e prolongar seus respectivos ciclos de vida em um circuito. A Figura 5 mostra a implementação de um circuito *snubber* em um transistor de efeito de campo (SCHIAVON, 2007).

Figura 5 - Circuito Snnuber



Fonte: Adaptado Schiavon (2007, p. 56).

Conforme Schiavon (2007), para o cálculo dos componentes do circuito *snubber*, é necessário primeiro dimensionar um resistor que possa dissipar uma potência equivalente a $1,0W$, assim sendo, é possível obter R por meio da Equação 17.

$$R = \frac{(V_{E_{máx.}})^2}{1} \quad \text{Eq.(17)}$$

Para o capacitor, dimensionar para uma queda de 90% de sua tensão, usando a Equação 18 (SCHIAVON, 2007).

$$C = \frac{-t}{R \cdot \ln\left(\frac{V_E}{V_S}\right)} \quad \text{Eq.(18)}$$

3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve todos os métodos utilizados durante o projeto do conversor isolado, bem como descreve os materiais para a implementação.

3.1 Projeto do conversor *Push-Pull*

Para o projeto do conversor estático *push-pull* em modo de condução contínua de corrente, as características pré-estabelecidas de funcionamento foram definidas e encontram-se descritas na Tabela 2:

Tabela 2 - Características do Conversor

Frequência de chaveamento	f	20kHz
Tensão mínima de entrada	$V_{E\min}$	20V
Tensão máxima de entrada	$V_{E\max}$	30V
Tensão de saída	V_S	12V \pm 10%
Corrente mínima de saída	$I_{S\min}$	0,5A
Corrente máxima de saída	$I_{S\max}$	5A
Tensão de saturação do MOSFETS	V_{ce_sat}	1V
Queda de tensão no diodo	V_D	0,7V

Fonte: Autoria própria (2021).

3.2 Razão cíclica

Para o projeto do indutor e demais componentes, é necessário encontrar em primeiro lugar a razão cíclica mínima e máxima de operação do conversor.

O valor máximo é adotado como $D_{\max} = 0,45$, valor seguro para não haver risco de uma comutação simultânea, ou seja, um período de tempo em que as duas chaves conduzam simultaneamente.

Para determinar o valor mínimo, primeiramente é preciso determinar a relação de espiras entre o primário e o secundário do transformador:

$$\eta = \frac{2(0,45) \cdot (20 - 1)}{12 + 0,7} = 1,3464$$

E a razão cíclica mínima para o circuito:

$$D_{\min} = \frac{(12 + 0,7) \cdot (1,3464)}{2 \cdot (30 - 1)} = 0,294$$

3.3 Indutor

Para projetar o indutor, é necessário calcular sua indutância. Esse valor será calculado usando a Equação 12:

$$L \geq \frac{0,2948 \cdot (1 - 2(0,2948)) \cdot 30}{2 \cdot (1,3468) \cdot (0,5) \cdot (20 \cdot 10^3)} \geq 134,74 \mu H$$

$$E = \frac{1}{2} (134,74 \cdot 10^{-6}) (5 + 0,5)^2 = 2,03 mJ$$

$$A_p = \left(\frac{3,98 \cdot (60) \cdot 10^4}{(469) \cdot (0,3) \cdot (20000)} \right)^{\frac{1}{1-0,17}} = 0,8205 cm^4$$

Utilizando a Tabela 1 deste trabalho e a Tabela 1 (Anexo B), o núcleo determinado foi do tipo pote 36x22 para que as características do projeto sejam atendidas. Portanto, o novo produto das áreas para esse núcleo será $A_p = 1,01 cm^4$.

$$Al = \frac{(1,37 \cdot 10^4)^2 (0,3)^2}{2 \cdot (2,03 \cdot 10^{-3})} = 416,06 \cdot 10^{-9} \frac{H}{esp^2}$$

$$N = \sqrt{\frac{134,74 \cdot 6}{416,06 \cdot 10^{-9}}} = 17,99 \text{ espiras}$$

$$J = 74,78 \cdot 30^{0,54} (1,01)^{-0,17} = 468 \frac{A}{cm^2}$$

$$A_{cu} = \frac{5}{468} = 0,0106 cm^2$$

3.4 Capacitor de filtro

Após calcular o valor da indutância do conversor, foi necessário calcular o valor da capacitância mínima para atender aos parâmetros do projeto, ou seja, o *ripple* máximo da tensão de saída.

Tal valor é calculado por meio da Equação 3, já apresentada na fundamentação teórica.

$$C \geq \frac{(134,74 \cdot 10^{-6})(5)^2}{2(0,1)(12)} \geq 1403,54 \mu F$$

3.5 Transformador

Para Pomílio (2018), os materiais mais utilizados são ferrites, que possuem valores relativamente reduzidos de $B_{m\acute{a}x}$ (entre 0,3T e 0,5T), apresentando, porém, baixas perdas em alta frequência.

Para o dimensionamento do transformador, primeiramente foi definido o tipo de núcleo como sendo EE.

Recorrendo novamente à Tabela 1, para buscar os dados do núcleo de ferrite, o coeficiente de densidade de corrente para temperaturas que variam entre $20^{\circ}C \leq \Delta t \leq 60^{\circ}C$ foi encontrado um valor para $K_j = 397$.

Assim sendo, podemos calcular o produto das áreas para chegar ao tamanho adequado de núcleo para o transformador.

$$A_p = \left(\frac{(3,98) \cdot (60) \cdot (10^4)}{(397) \cdot (0,3) \cdot (20 \cdot 10^3)} \right)^{\frac{1}{1-0,12}} = 1,00 cm^4$$

Com auxílio da Tabela 1 (Anexo B) para núcleos de ferrite, foi encontrado o núcleo 30/15/14, que possui um produto de área equivalente a $A_p = 1,43 cm^4$ e $A_e = 1,20 \cdot 10^{-4} cm^2$.

Deste modo, o número de enrolamentos referentes ao primário e secundário respectivamente são:

$$N > \frac{(20) \cdot (0,45)}{(1,20 \cdot 10^{-4}) \cdot (0,3) \cdot (20 \cdot 10^3)} = 12,5 \cong 12 \text{ espiras}$$

$$N = \frac{12,5}{1,3464} = 9,28 \cong 9 \text{ espiras}$$

$$J = 397 \cdot (1,43)^{-0,12} = 380 \frac{A}{cm^2}$$

$$I_{RMS} = \frac{5}{1,34} \sqrt{0,45} = 2,5 A$$

$$A_{cu} = \frac{2,5}{380} = 0,00657 cm^2$$

3.6 Snubber

Para o aumento da vida útil dos MOSFETS, e para melhorar seu desempenho durante as comutações, o circuito *snubber* foi dimensionado de acordo com as características do projeto:

$$R = \frac{(30)^2}{1} = 900 \Omega$$

Porém, foi utilizado um resistor de 1500Ω $1W$, um valor ainda próximo do valor encontrado.

Para o capacitor, devemos dimensionar para uma queda de 90% de sua tensão, com uma frequência de chaveamento de $20kHz$.

$$C = \frac{5 \cdot 10^{-6}}{1500 \cdot \ln(0,90)} = 316,37 nF$$

Todavia, foi utilizado o capacitor de $1000nF$ para ficar superdimensionado, bem como o diodo 1N4007, o qual suporta $1000V$ de tensão reversa.

3.7 Circuitos Auxiliares

O projeto foi todo dimensionado e pensado desde sua concepção para ser disponibilizado em sala de aula para fins didáticos. Dessa forma, foram implementados ao circuito alguns componentes destinados a proteção do circuito prevendo eventuais erros durante os experimentos.

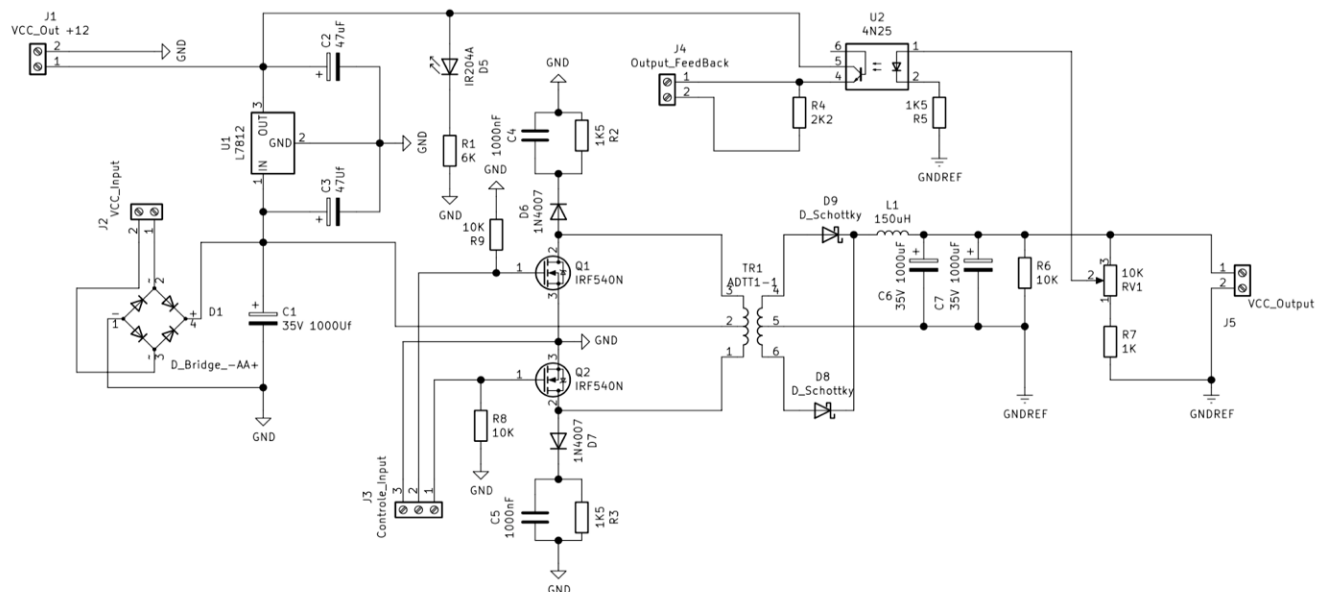
Nesse sentido, foi adicionada uma ponte retificadora na entrada de alimentação do conversor, com a finalidade de proteção contra inversões de polaridade e um capacitor de $1000 \mu F$ em paralelo com a entrada com a função de eliminar ruídos na tensão de entrada.

Um regulador de tensão *LM7812* também foi adicionado ao projeto para fornecer energia para o módulo de controle do conversor. A ele foi adicionado um *LED* para indicar que o circuito está sendo alimentado.

O circuito de realimentação foi implementado baseado em um divisor de tensão em paralelo com o resistor de *preload*. Este divisor é composto por um resistor de $1k\Omega$ e um trimpot multivoltas de $10k\Omega$, sendo o ponto central deste divisor o que representa a tensão proporcional de saída do conversor.

A representação da tensão de saída é quem controla o fluxo de corrente no fotoacoplador *4N25*, que por sua vez, promove um sinal de realimentação isolado. A Figura 6 contém o circuito completo do conversor *push-pull* com todos os seus componentes e valores.

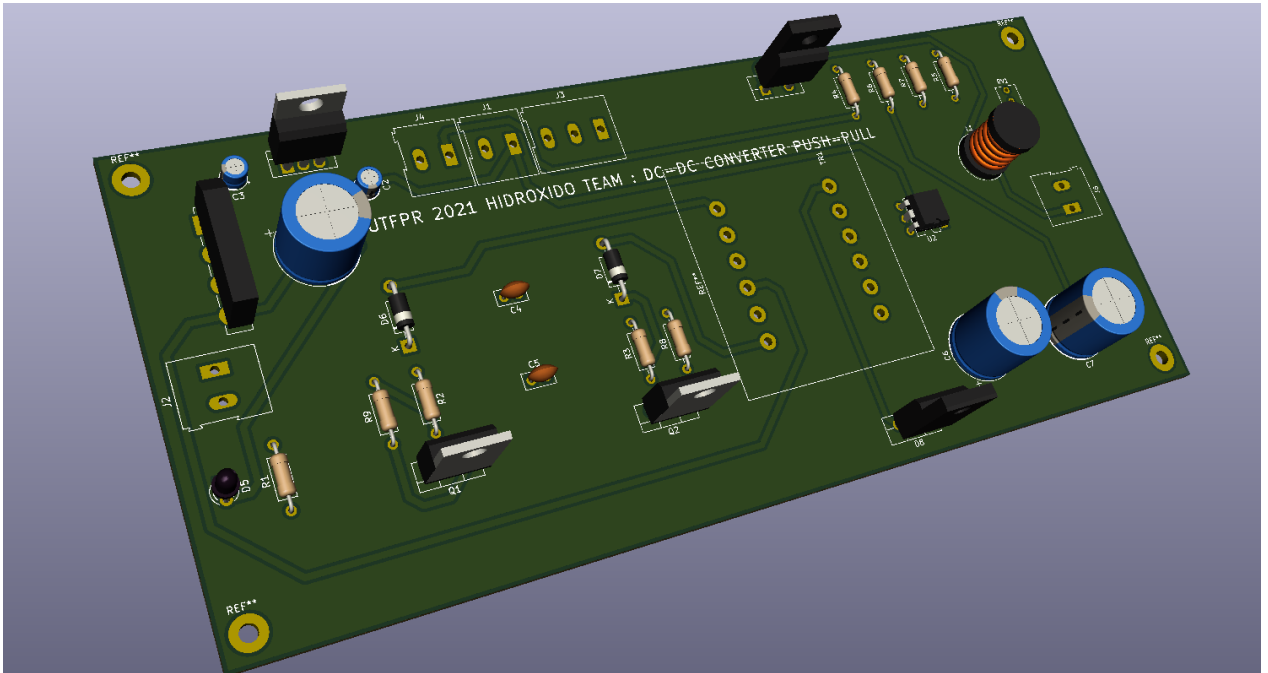
Figura 6 - Esquemático do Conversor *Push-Pull*



Fonte: Autoria própria (2021)

A Figura 7 mostra o modelo em três dimensões do projeto do conversor.

Figura 7 - Modelo 3D do Conversor



Fonte: Autoria própria (2021).

O desenho dos esquemáticos, layout da placa de circuito impresso e modelo em três dimensões, foi realizado utilizando o software *KiCAD*, que é um programa de código aberto destinado à confecção de placas de circuito impresso.

3.8 Proposta de Aula Prática

A proposta de aula prática – Apêndice 1 – permitirá, por meio dos experimentos propostos aos alunos, observar diferentes aspectos e particularidades do conversor estático *push-pull*, bem como, permitirá o entendimento do funcionamento deste circuito, visualização de suas respectivas formas de onda e características necessárias para o devido controle de seus elementos comutadores.

Os experimentos preparados para essa proposta de aula experimental têm por objetivo fomentar o estudo da eletrônica de potência por meio de experimentos com circuitos que envolvam os assuntos estudados nesta disciplina, para a observação prática de grandezas e fenômenos.

Portanto, as medições realizadas e coleta de formas de ondas nos circuitos visam motivar o estudante a buscar as respostas teóricas para questões relacionadas

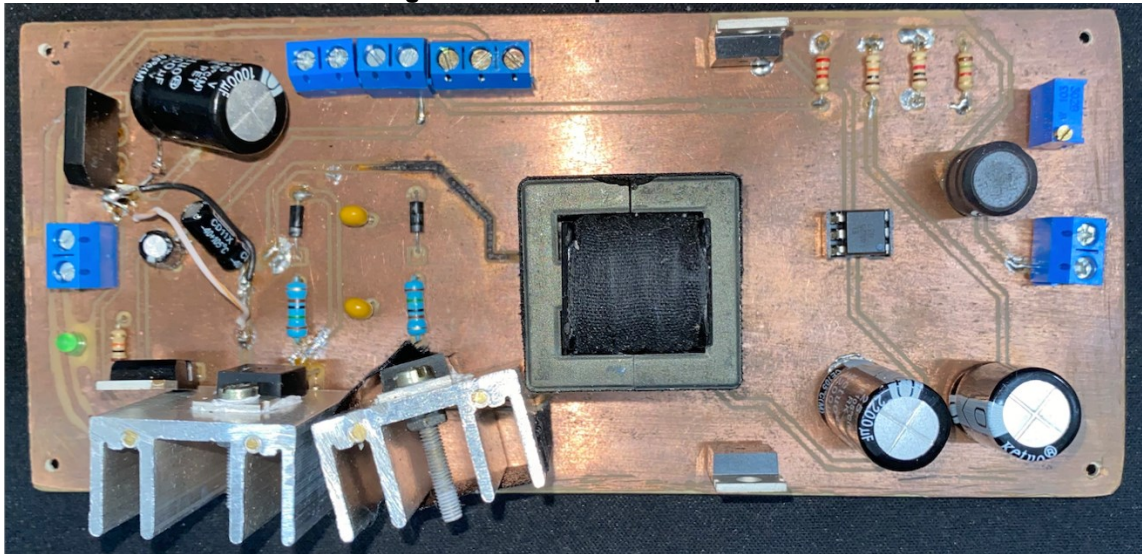
com a eletrônica de potência, além de proporcionar uma experiência prática com ferramentas e com rotinas de um ambiente de pesquisa e/ou desenvolvimento quando inserido no mercado de trabalho.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo, serão apresentados e descritos os resultados experimentais adquiridos a partir da confecção final do conversor *push-pull*.

Na Figura 8, é demonstrado o protótipo do conversor confeccionado para homologação do projeto. O circuito impresso foi corroído com percloroeto de ferro em uma placa de fenolite de duas faces, e posteriormente os circuitos foram soldados.

Figura 8 - Protótipo Conversor



Fonte: Autoria própria (2021)

A partir da validação do circuito, foram confeccionados mais três conversores para servirem como um conversor didático aplicável em sala de aula.

Na Figura 9, é possível ver o conversor pronto, montado com uma placa de circuito impresso fabricada industrialmente.

Figura 9 - Conversor Versão Final

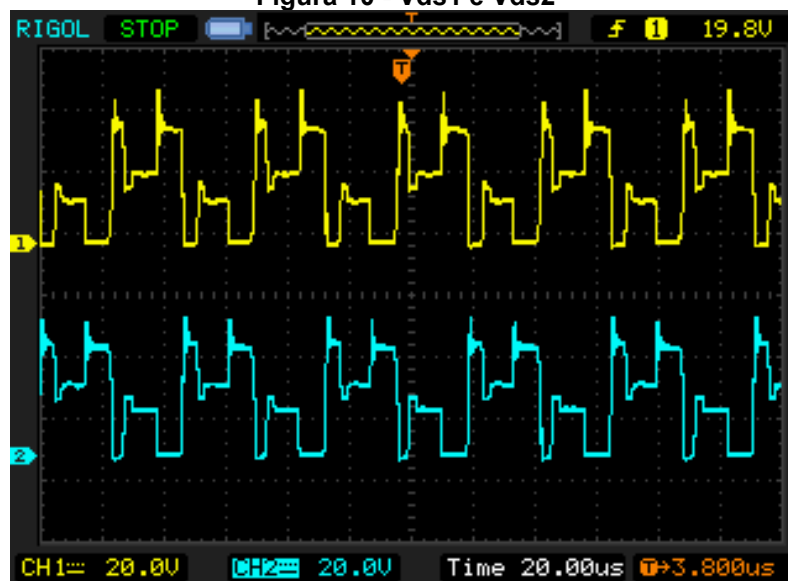


Fonte: Autoria própria (2021)

As formas de onda características do conversor *push-pull*, já apresentadas na fundamentação teórica deste trabalho, sendo elas V_{ds1} , V_{ds2} e V_L , podem ser observadas nas Figura 10 e Figura 11, respectivamente.

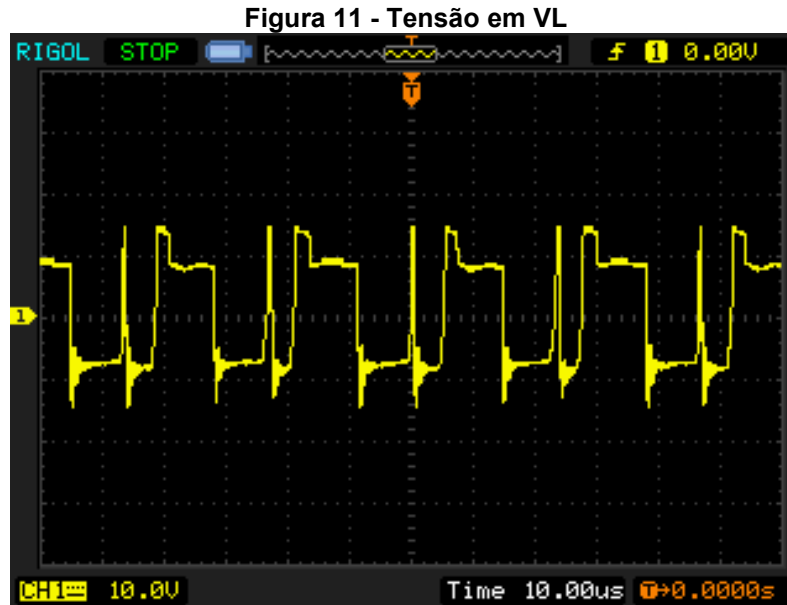
É importante frisar que as diferenças entre os sinais encontrados na literatura e os sinais encontrados na prática podem se dar por muitos fatores, mas uma das principais fontes dessa distorção se encontra em componentes não lineares que se afastam do ideal quando aplicados em circuitos reais.

Figura 10 - V_{ds1} e V_{ds2}



Fonte: Autoria própria (2021)

A Figura 11, mostra exatamente como se comporta a tensão no indutor, ou seja, como seria a tensão sobre a carga sem um elemento de filtragem, sinais muito próximos dos vistos na Figura 1 e Figura 4 (c).



Fonte: Autoria própria (2021)

4.1 Operação em malha aberta

Após os testes iniciais para comprovar o funcionamento do conversor, foram realizados testes agora com cargas que demandam corrente mais elevadas, com o objetivo de verificar a eficiência do conversor além do seu comportamento sob maior demanda de corrente.

Os testes foram realizados com controle em malha aberta. Desse modo, foram adicionadas cargas fixas na saída do conversor para uma alimentação também fixa de 20 V, foi realizado manualmente o devido ajuste do ciclo de trabalho do sinal de controle com intuito de manter a tensão de saída constante em 12 V.

A Tabela 3 contém os resultados deste ensaio, em que a primeira coluna V_i representa a tensão de alimentação do conversor e V_s a tensão de saída. O ciclo de trabalho do PWM é representado por D . A potência de entrada e de saída são respectivamente P_i e P_s . A corrente de entrada e de saída para o ensaio foram representados na tabela por I_i e I_o . E por fim, mas não menos importante, a eficiência do conversor nesses testes está na última coluna como η .

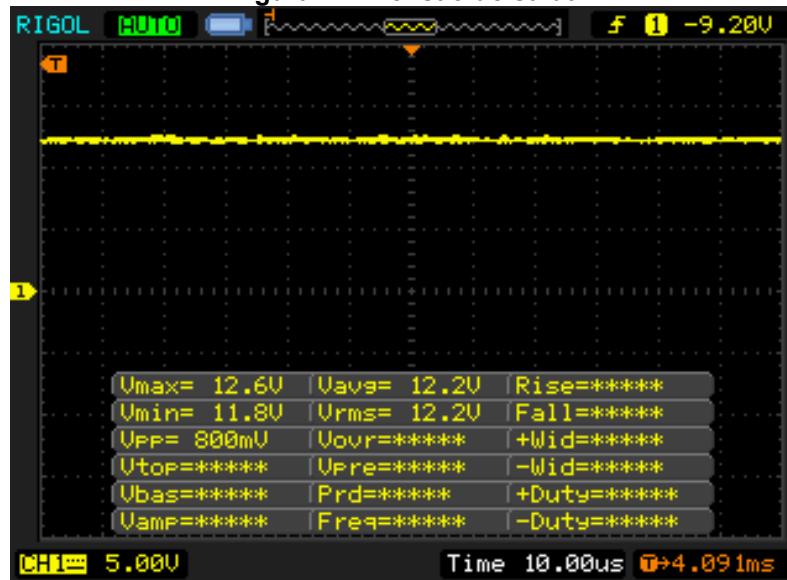
Tabela 3 – Resultados de operação em malha aberta

V_i	D	V_s	P_i	P_s	I_i	I_o	η
20V	27,2%	12V	4,36W	1,46W	218mA	122mA	0,33
20V	42,8%	12V	12,40W	7,56W	620mA	630mA	0,60
20V	49,1%	12V	42,60W	28,92W	2,13A	2,41A	0,68

Fonte: Autoria própria (2021)

A Figura 12 apresenta o sinal de saída regulada a 12,0 V para uma tensão de entrada de 20,0 V, com um consumo de corrente fixa de 230 mA, e PWM com *duty cycle* de 11,2 %. Na Figura 12, também é possível observar o ruído do sinal de saída, uma *ripple* correspondente a 800 mV, o qual está dentro das especificações de projeto previstas até 10% da tensão de saída.

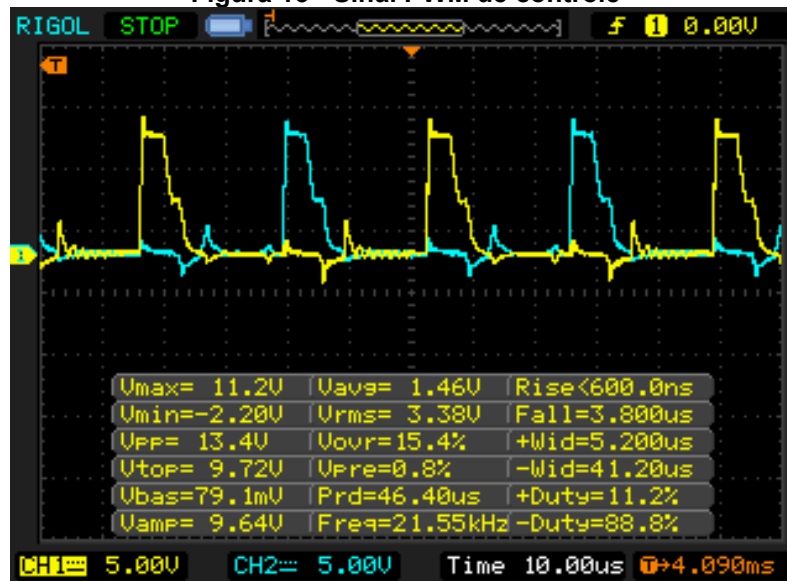
Figura 12 - Tensão de saída



Fonte: Autoria própria (2021).

As formas de onda em V_{GS1} e V_{GS2} são apresentadas na Figura 13, em que é possível visualizar os sinais que são responsáveis pelo controle do chaveamento dos transistores de efeito de campo.

Figura 13 - Sinal PWM de controle

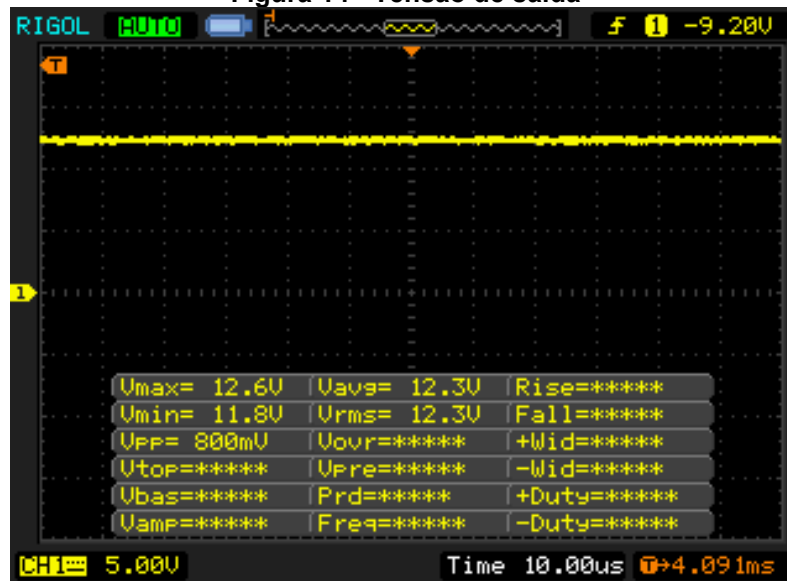


Fonte: Autoria própria (2021).

Seguindo com os testes de estresse do circuito, para melhor avaliar a qualidade dos sinais do conversor, e principalmente o comportamento e a qualidade da tensão de saída, quando é requisitado do circuito maior entrega de corrente na saída do conversor *push-pull*.

Para isso, o sinal de saída é regulado em 12,0 V com tensão de entrada fixa em 20,0 V, com consumo de corrente fixado em 470 mA. Na Figura 14, é possível observar o sinal de saída do conversor com um *ripple* 800 mV, valor dentro dos parâmetros de qualidade estabelecidos no início do projeto.

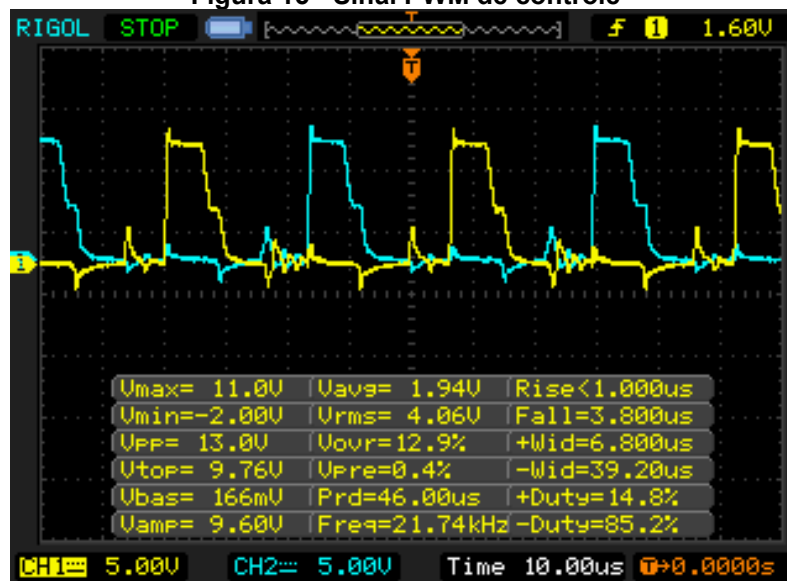
Figura 14 - Tensão de saída



Fonte: Autoria própria (2021).

Enquanto na Figura 15, é possível visualizar os sinais de controle, com uma largura de pulso de 14,8 %.

Figura 15 - Sinal PWM de controle

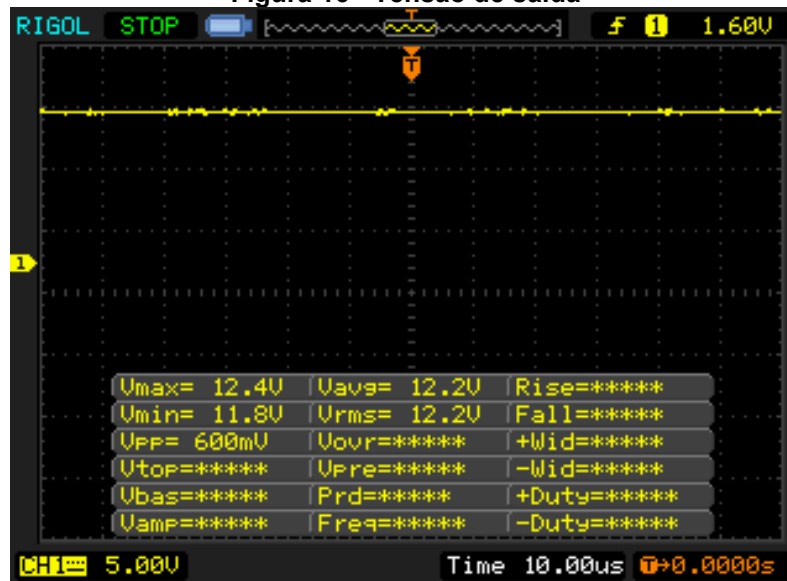


Fonte: Autoria própria (2021).

Para obtenção de informações com cargas mais altas ainda, foi aumentado ainda mais a corrente de saída. Na Figura 16, o sinal de saída é regulado a 12,0 V agora com uma tensão de entrada de 30,0 V, com uma corrente fixa de saída de 3,5 A.

Na figura 16 também é possível observar o sinal de saída do conversor com um *ripple* 600 mV .

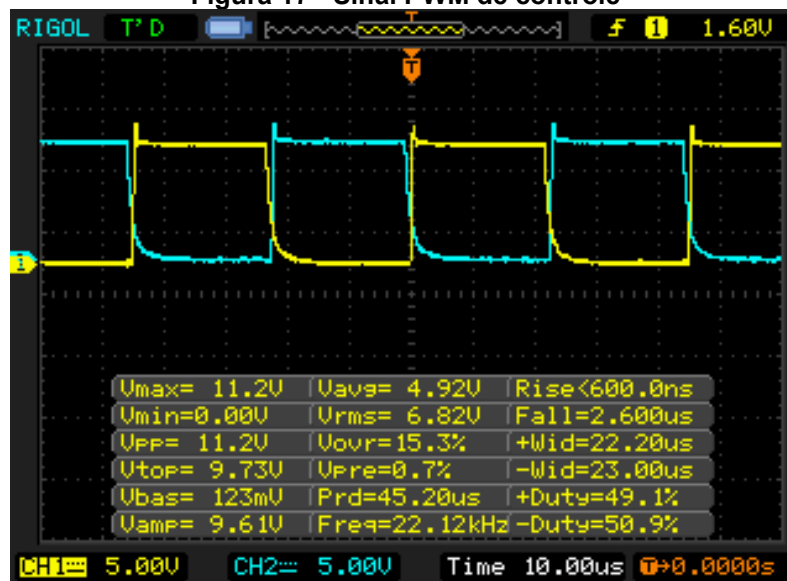
Figura 16 - Tensão de saída



Fonte: Autoria própria (2021).

N Figura 17, é possível visualizar os sinais de controle das chaves do conversor com a demanda supracitada, sendo o PWM com *duty cycle* de 49,1 %.

Figura 17 - Sinal PWM de controle



Fonte: Autoria própria (2021).

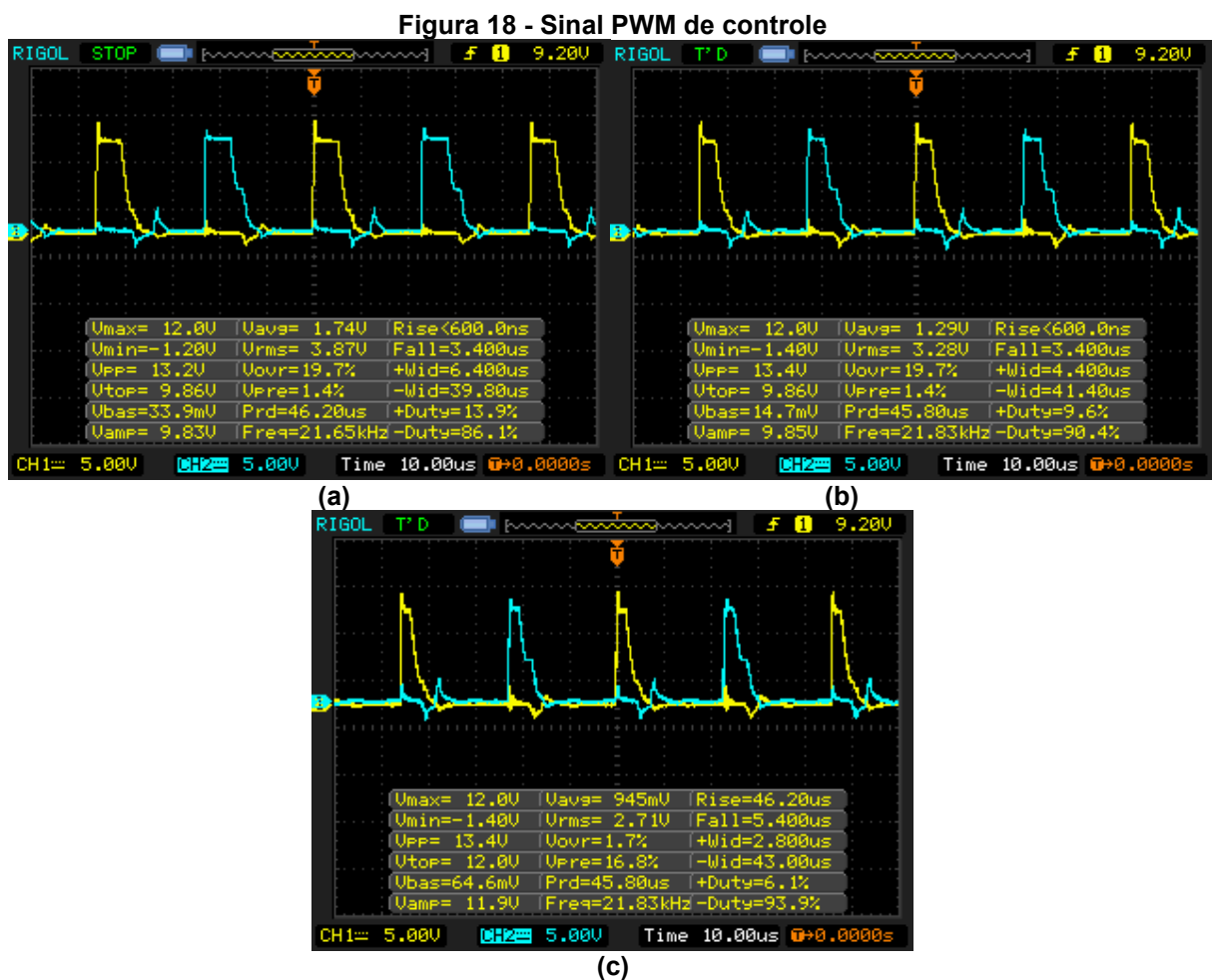
4.2 Operação em malha fechada

Para os ensaios em malha fechada, a tensão do conversor foi ajustada em 12,0 V. Na Figura 18, o sinal de saída é regulado a 12,0 V, com uma corrente fixa de

saída de 490 mA. A partir disso, foram realizados testes de variação de tensão de entrada e avaliação do comportamento de transientes.

Com objetivo de observar o circuito de controle, variando o sinal de entrada do *push-pull*, foi alimentado inicialmente o conversor com 20,0 V e essa tensão foi aumentada para 25,0 V e por fim, 30,0 V.

A Figura 18 mostra o comportamento do PWM ao se variar a tensão de entrada sendo (a) alimentação de 20,0 V, (b) alimentação de 25,0 V e (c) alimentação de 30,0 V.



(c)
Fonte: Autoria própria (2021).

A tabela 4 demonstra os resultados deste teste com o conversor em malha fechada e suas respectivas variações de tensão de entrada e saída, corrente de entrada e saída bem como percentual do ciclo de trabalho dos sinais de controle.

Tabela 4 - Resultados de operação em malha fechada.

V_i	D	V_S	I_i	I_o
20V	13,9%	12V	470 mA	490 mA
25V	9,6%	12V	460 mA	490 mA
30v	6,1%	12V	440 mA	490 mA

Fonte: Autoria própria (2021).

É possível observar o bom desempenho do circuito em malha fechada, em que o *duty cycle* responde muito bem às variações de entrada e o *ripple* da tensão de saída se manteve entre 600 mV e 800 mV, estando dentro dos valores projetados.

Com objetivo de observar o circuito de controle, variando a carga, o conversor foi alimentado com 20,0 V fixos e saída regulada em 12,0 V. Em seguida, adicionada as resistências descritas no Quadro 5 na saída do conversor e registrar os valores do *duty cycle*, da corrente de entrada, da corrente de saída e da tensão de saída, conforme o Tabela 5.

Tabela 5 - Operação em Malha Fechada com variação de carga

SG3524 MALHA FECHADA					
R	V_i	D	I_i	I_o	V_S
100	20	26,1%	218 mA	122 mA	12,22 V
50	20	39,0%	327 mA	249 mA	12,22 V
20	20	41,4%	620 mA	616 mA	12,26 V
10	20	44,1%	1,10 A	1,15 A	12,36 V
5	20	48,7%	2,10 A	2,39 A	12,65 V

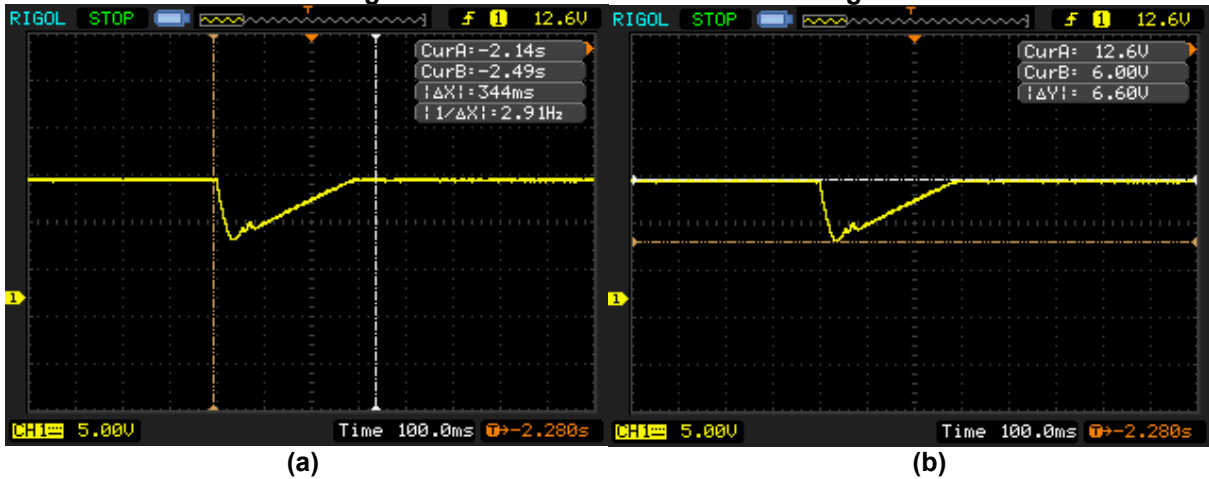
Fonte: Autoria própria (2021).

Em última análise usando o controle em malha fechada, foram realizados testes para avaliar o comportamento das curvas transientes do conversor.

Assim sendo, para este ensaio, foi adicionada uma carga puramente resistiva de 15Ω na saída do conversor com tensão de saída regulada em 12 V, para se avaliar a estabilização do sinal de saída durante a entrada ou a saída desta carga.

A primeira análise do transiente do circuito foi realizada com o conversor estabilizado sem carga e foi adicionado uma carga que consumisse uma corrente fixa de 490 mA. O tempo de estabilização do sinal de saída foi de 344 ms, e $\Delta V = 6,60 V$. A Figura 19 mostra a curva de estabilização da tensão de saída.

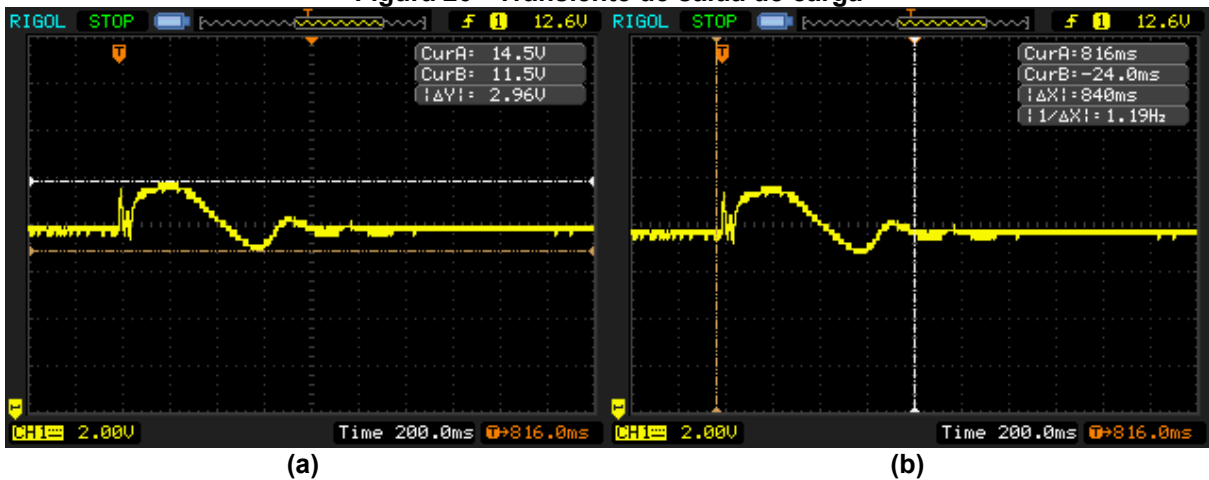
Figura 19 - Transiente de entrada de carga



Fonte: Autoria própria (2021).

Para a segunda análise do transiente, foi removida a mesma carga de 15Ω do conversor para avaliar o comportamento da tensão em cenários de saída de carga. Como resultado, o tempo obtido de estabilização do sinal de saída de 840 ms , e $\Delta V = 2,96\text{ V}$. A Figura 20 mostra a curva de estabilização da tensão de saída.

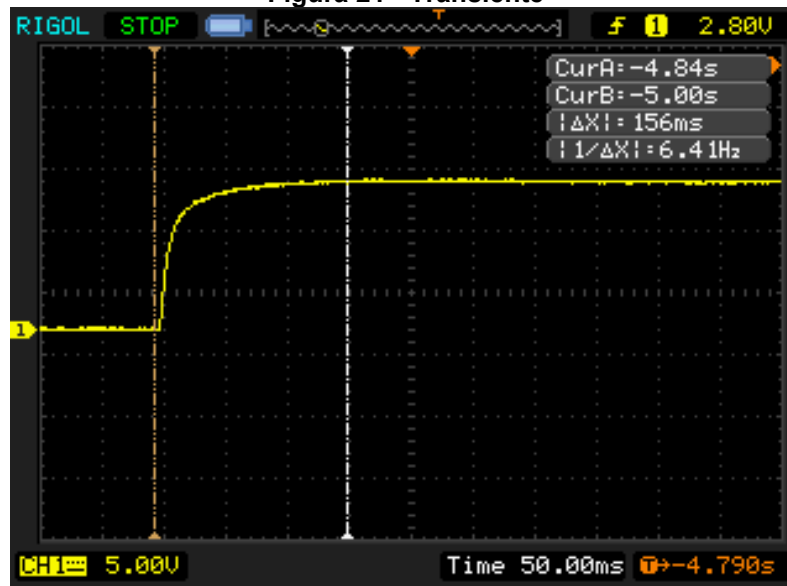
Figura 20 - Transiente de saída de carga



Fonte: Autoria própria (2021).

Por fim, a Figura 21 mostra a curva transitória do circuito do momento em que é alimentado até a estabilização do sinal de saída. Como resultado, foi obtido um tempo de 156 ms até alcançar a tensão de 12 V na saída do conversor.

Figura 21 - Transiente



Fonte: Autoria própria (2021).

5 CONCLUSÃO

A eletrônica de potência é uma importante área das engenharias elétrica e eletrônica, a qual proporcionou vantagens para o processamento de energia de modo a aumentar substancialmente a eficiência energética dos dispositivos eletrônicos de maneira geral.

Sendo assim, o estudo e a pesquisa nas áreas correlatas à eletrônica de potência é difundida em instituições de ensino técnico e superior, portanto, o projeto de um conversor preparado para fins didáticos é uma importante ferramenta para fins de pedagógicos.

No que tange ao projeto do conversor, conclui-se que todos os objetivos deste trabalho foram alcançados, uma vez que o conversor funcionou com todas as características preestabelecidas durante o planejamento do conversor.

O conversor *push-pull* operou com tensão de saída de $12,0 V$, com um *ripple* $800 mV$, dentro dos limites do projeto. O controle realizado com realimentação (malha fechada) se mostrou igualmente satisfatório, com boa resposta a variações de tensão de entrada ou carga. O rendimento obtido nesse conversor foi de cerca de $0,68$ e potência de $28,92 W$, com cargas que consumissem até $2,41 A$.

Além disso, todos os resultados do roteiro de experimentação elaborado para aulas práticas encontram-se nos apêndices deste trabalho, servindo como referência para comparação aos obtidos em laboratório.

Os exemplares dos conversores projetados e confeccionados serão disponibilizados em forma de kits didáticos para a disciplina de modelagem e controle de conversores estáticos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - campus Campo Mourão, para que possam ser utilizados em aulas práticas.

Sugestões de trabalhos futuros:

- Projeto de um módulo de controle utilizando um microcontrolador, a fim de complementar os estudos com este conversor.
- Diagnosticar possíveis problemas no projeto, com o intuito de melhorar a eficiência do conversor.

REFERÊNCIAS

- BARBI, I; MARTINS, D. C. **Conversores CC-CC Básicos Não Isolados**. 3. ed. Florianópolis: Edição dos Autores, 2008. p.2-6.
- FREIRE, P. **Pedagogia da autonomia: saberes necessários à prática educativa**. 33. ed. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 2006. p. 67.
- GOZZI, J. Sobre o problema da evasão no curso de engenharia eletrônica da UFRJ. *In: XXVII Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia*, 1999, Natal. **Anais eletrônicos**, Natal, 1999. Disponível em: <http://www.abenge.org.br/cobenge/arquivos/19/artigos/379.pdf> Acesso em: 18 out. 2019.
- HART, D. H. **Eletrônica de Potência análise e projeto de circuitos**. 1. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012. p. 267-294.
- MAIA, A. C. N. **Sistemas de conversão de energia multiníveis obtidos através da interconexão de módulos de conversores estáticos de potência de dois níveis**. 2016. 219 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/1561> Acesso em: 14 dez. 2020.
- MALVINO, A. P. **Eletrônica**. Vol. 1. 4. ed. São Paulo: Pearson, 1997. p. 97-106.
- MELLO, L. F. P. **Análise e Projeto de Fontes Chaveadas**. 1. ed. São Paulo: Erica, 1996. p.1-200.
- _____. **Projeto de Fontes Chaveadas**. 2. ed. São Paulo: Erica, 1988. p.153-200.
- MOHAN, N. **Power Electronics: A first course**. 1. ed. Minnesota: John Wiley & Sons, 2011. p.1-4.
- POMÍLIO, J. A. **Topologias básicas de conversores CC-CC com isolamento**. Apostila Didática. Publicação FEE 13/95. Revisão: 2018. Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdffiles/it505/CAP2.pdf>. Acesso em: 25 out. 2019.
- _____. **Topologias Básicas de Conversores CC-CC não-isolados**. Apostila Didática. Publicação FEE 13/95. Revisão: 2014. Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdffiles/CAP1.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2020.
- SCHIAVON, G. J. **No-Break 1.2KVA, senoidal, operando em Malha Fechada: Circuito de Potência, Circuito de Controle Analógico e Circuito de Controle Digital com DSC**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2007.

APÊNDICE A - Aula prática – Conversores CC-CC conversor isolado *push-pull*

AULA PRÁTICA – CONVERSORES

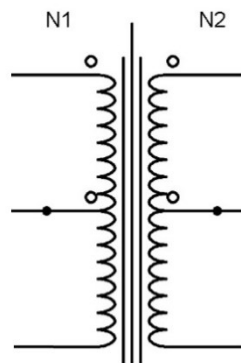
CC-CC CONVERSOR ISOLADO *PUSH-PULL*

1 INTRODUÇÃO

O conversor *push-pull* é um tipo de conversor de tensão isolado. O nome deste conversor faz uma alusão ao seu modo de trabalho, *push-pull*, que traduzido para o português significa empurrar-puxar (MELLO, 1996).

Deste modo, para Mello (1996), este conversor faz uso de um transformador de núcleo relativamente pequeno e que, por sua vez, requer altas frequências de chaveamento. Este transformador deve contar com dois enrolamentos em fase e com uma derivação central, tanto no primário quanto no secundário. A Figura 1 mostra a disposição das bobinas, conforme mencionado.

Figura 1 - Transformador



Fonte: Autoria própria (2021).

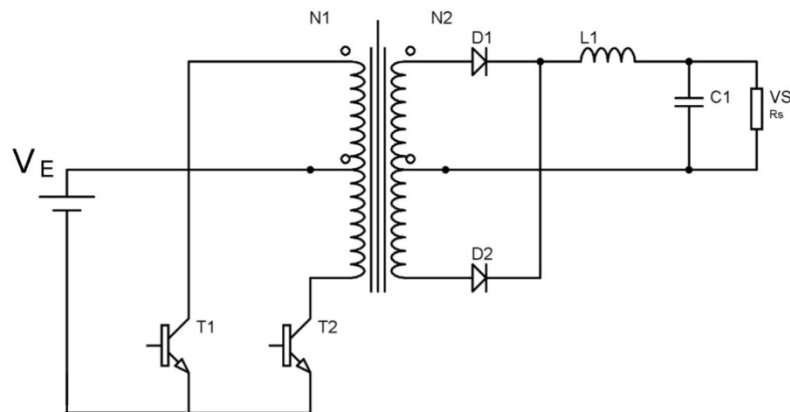
Por sua vez, os enrolamentos do transformador precisam ser excitados alternadamente (de onde vem o nome do conversor puxar e empurrar), para criar um campo magnético que deve induzir a tensão do primário para o secundário (POMILIO, 2018)

Para que isso seja possível, são utilizados dois transistores do tipo MOSFET entre a alimentação do conversor e cada enrolamento do transformador.

O controle desses transistores precisa ser feito com dois sinais de PWM defasados em 180°, para que os MOSFETS sejam acionados de maneira alternada (POMILIO, 2018).

Além das características do primário deste conversor, o lado secundário tem a necessidade de dois diodos ultrarrápidos para retificação do sinal de saída, um para cada enrolamento do lado secundário do transformador. Assim como em todos os outros conversores CC-CC chaveados, o *push-pull* conta com um indutor que fica série com um capacitor de saída. A Figura 2 apresenta o circuito do conversor *push-pull* (MELLO, 1996).

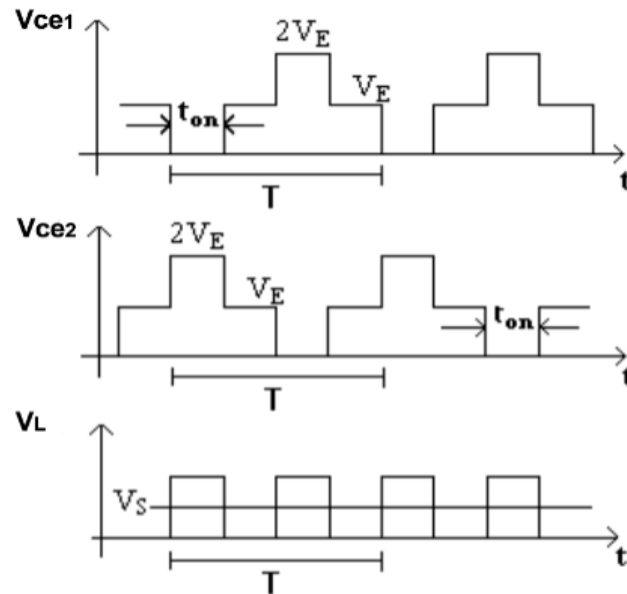
Figura 2 - Topologia Push-Pull



Fonte: Adaptado de Mello (1996, p. 153).

As principais formas de ondas características deste conversor podem ser observadas na Figura 3 em que, V_{ce1} e V_{ce2} correspondem ao *dreno* e *source* dos MOSFETS durante o processo de chaveamento da tensão de entrada para os enrolamentos primários do transformador. Assim sendo, V_L é a tensão no indutor, que possui tensão média V_S (MELLO, 1996).

Figura 3 - Formas de onda Push-Pull



Fonte: Adaptado de Mello (1996, p. 153).

Finalmente, esta aula prática tem por objetivo fomentar o estudo da eletrônica de potência por meio de experimentos com circuitos que envolvam assuntos estudados nesta disciplina para a observação prática de grandezas e fenômenos.

Portando, as medições realizadas e coleta de formas de ondas nos circuitos visam motivar o estudante a buscar as respostas teóricas para questões relacionadas com a eletrônica de potência.

Em síntese, o aluno deverá:

- Montar um circuito de controle para um conversor do tipo *push-pull*;
- Integrar o circuito de controle ao circuito de potência fornecido;
- Entendimento das diferenças do controle em malha aberta e malha fechada, por meio de diferentes cargas;
- Entender os princípios básicos da topologia *push-pull*;
- Coletar as formas de onda características do conversor.

Matérias necessários:

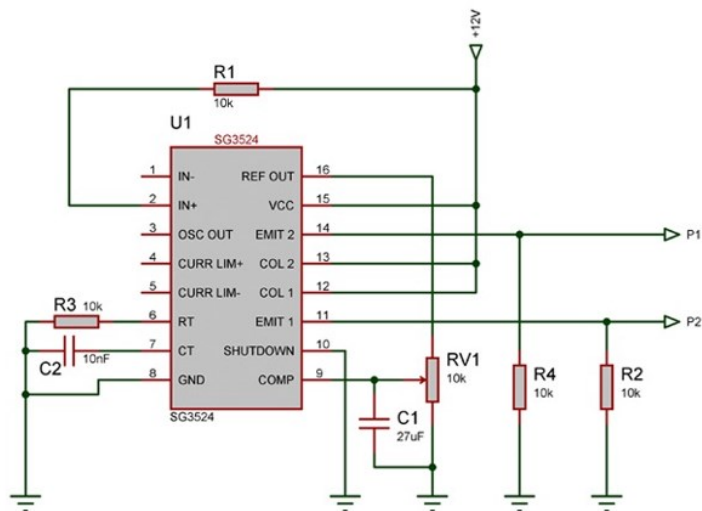
- Osciloscópio de 2 canais;
- Fonte de bancada;
- Reostato;
- Multímetros;

- Cabos de ligação;
- Conversor *push-pull*;
- *Protoboard*;
- Componentes para para montagem dos circuitos de controle.

2 MONTAGEM DOS CIRCUITOS DE CONTROLE

O circuito integrado SG3524 é um dispositivo dedicado para controle PWM. Este dispositivo específico é capaz de gerar até dois sinais PWM já defasados e prontos para efetuar o controle de diversos tipos de conversores chaveados. Por estas e outras características, será utilizado esse circuito integrado para efetuar o controle do conversor *push-pull*, tanto em malha aberta quanto em malha fechada com realimentação. Portanto, usando este circuito integrado, deve-se montar os circuitos de controle para as duas configurações, conforme os circuitos das Figuras 4 e 5, respectivamente:

Figura 4 - SG3524 em malha aberta



Fonte: Autoria própria (2021).

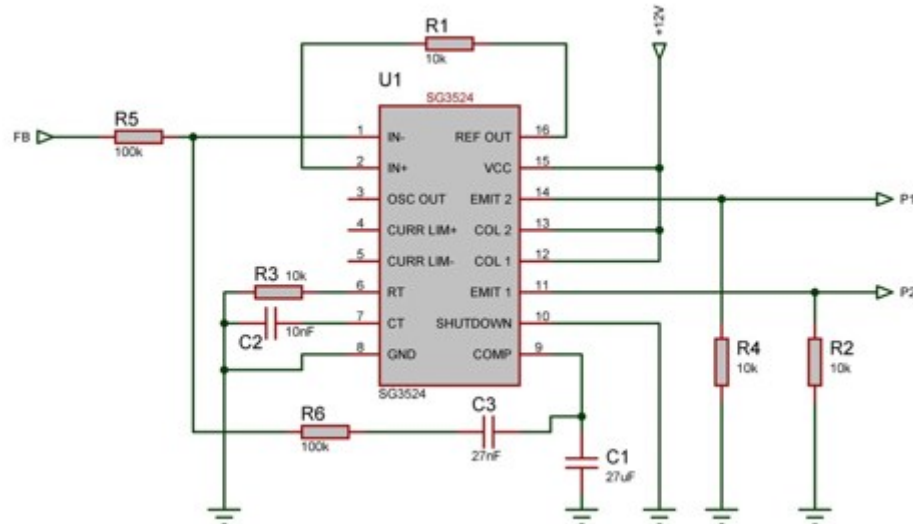
Onde:

- VCC é a alimentação do SG3524 em 12 V;
- GND é o terra do CI em 0 V;
- P1 e P2 são as saídas PWM defasadas em 180°;
- RV1 é o potenciômetro de ajuste da largura de pulso;

- RT e CT (R3 e C2) são responsáveis pelo ajuste da frequência de acordo com a equação encontrada na folha de dados do fabricante STMicroelectronics.

$$f = \frac{1.18}{R_T C_T}$$

Figura 5 - SG3524 em malha fechada



Fonte: Autoria própria (2021).

Onde:

- VCC é a alimentação do SG3524 em 12 V;
- GND é o terra do CI em 0 V;
- P1 e P2 são as saídas PWM defasadas em 180°;
- FB é a entrada para a realimentação que vem da saída do conversor;
- RT e CT (R3 e C2) são responsáveis pelo ajuste da frequência de acordo com a equação encontrada na folha de dados do fabricante STMicroelectronics.

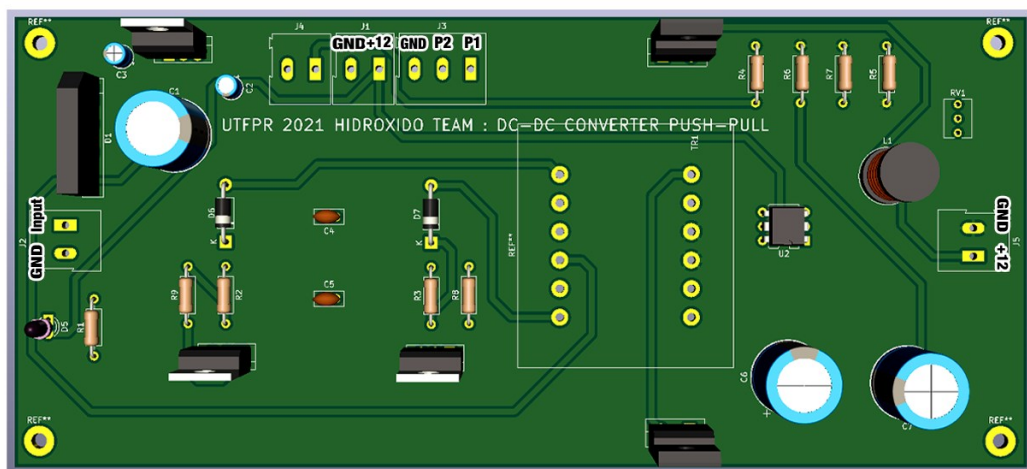
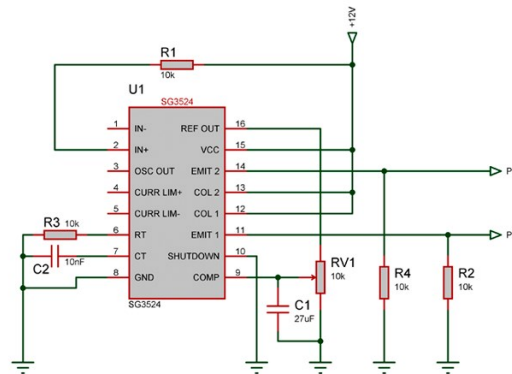
$$f = \frac{1.18}{R_T C_T}$$

- R5 e C3 fazem a ação de controle Proporcional Integral (PI).

3 INTEGRAÇÃO DOS CIRCUITOS DE CONTROLE E DE POTÊNCIA

Para o controle em malha aberta, o circuito montado com o SG3524 deve ser devidamente conectado com o circuito de potência. Para isso, as saídas de PWM sendo elas P1 e P2 devem ligadas a P1 e P2 do conversor, bem como alimentação 12V e GND, como pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 - Integração dos circuitos de controle e de potência em malha aberta



Fonte: Autoria própria (2021).

Onde:

- J1 Tensão auxiliar de 12 V, para alimentar o PWM;
- J2 Tensão de entrada do circuito de potência, conversor *push-pull*;
- J3 Entrada do sinal de controle, no circuito de potência, conversor *push-pull*;
- J4 Só é utilizado no circuito de controle em malha fechada;
- J5 Tensão de saída do circuito.

3.1 Operação em Malha Aberta

Na operação em malha aberta, efetua-se o controle do conversor *push-pull* por meio do circuito montado. Inicialmente, ajusta-se a tensão de entrada em 20 V e a saída em 12 V por meio de RV1 do circuito de controle. Varia-se a tensão de entrada de acordo com a Tabela 1, registrando os valores do *Duty Cycle* e Tensão de Saída:

Tabela 1 - Operação em Malha Aberta

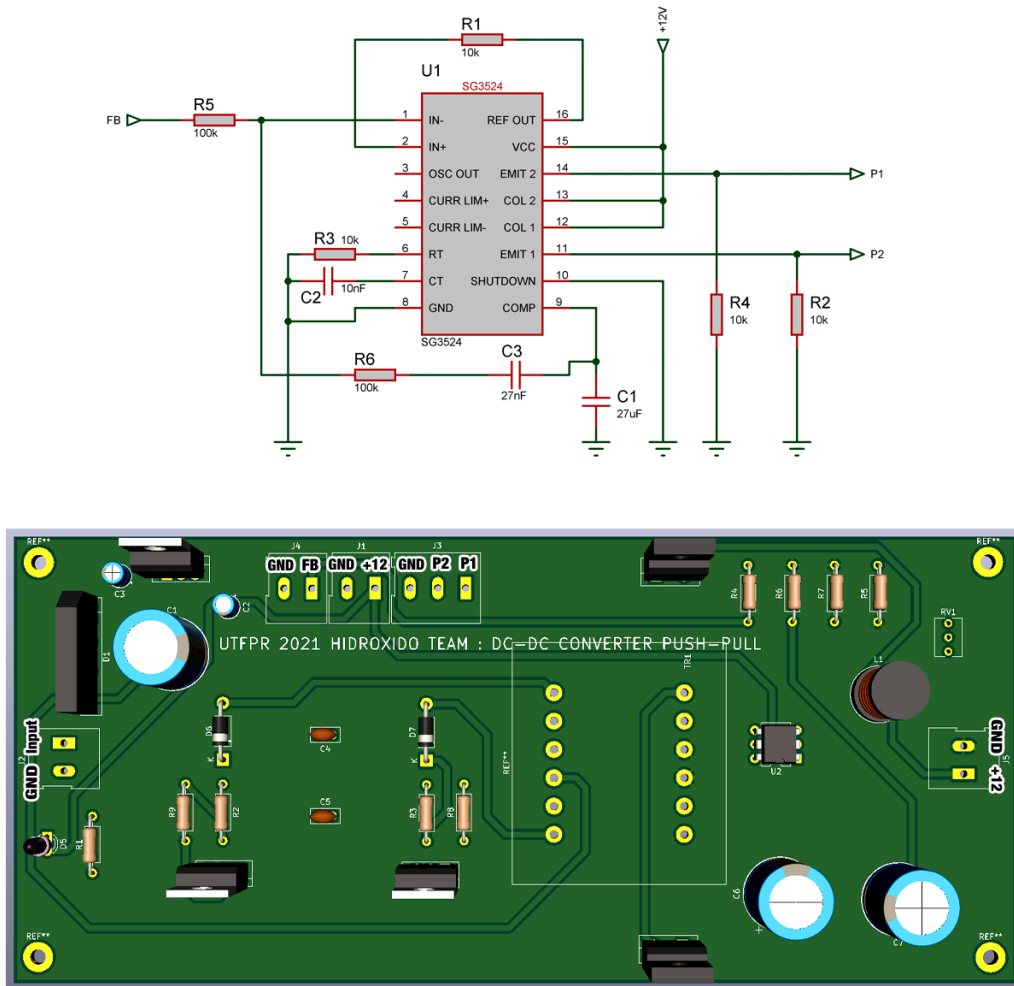
SG3524 MALHA ABERTA		
TENSÃO DE ENTRADA [V]	DUTY CYCLE [%]	TENSÃO DE SAÍDA [V]
30	16,9%	17,83 V
25	16,9%	14,59 V
20	16,9%	12,10 V
15	16,9%	8,64 V
10	16,9%	5,38 V

Fonte: Autoria própria (2021).

3.2 Operação em Malha Fechada

Para o controle em malha fechada, o circuito montado com o SG3524 deve ser devidamente conectado com o circuito de potência. Para isso, da mesma forma que no controle em malha aberta as saídas de PWM sendo elas P1 e P2 devem ligadas a P1 e P2 do conversor, bem como alimentação 12V e GND. Além disso, para o controle com *feedback* deve ser conectado ao conversor o pino FB do circuito de controle.

Figura 7 - Integração dos circuitos de controle e de potência em malha fechada



Fonte: Autoria própria (2021).

Onde:

- J1 Tensão auxiliar de 12 V para alimentar o PWM;
- J2 Tensão de entrada do circuito de potência, conversor *push-pull*;
- J3 Entrada do sinal de controle, no circuito de potência, conversor *push-pull*;
- J4 Realimentação do circuito, *Feedback*;
- J5 Tensão de saída do circuito.

3.2.1 Variando a Entrada com Carga Fixa

Neste processo, deve-se fornecer alimentação inicial de 30 V ao conversor e regular sua saída para uma tensão constante de 12 V, além de variar a tensão de

entrada e registrar os valores do *Duty Cycle*, e Tensão de Saída, conforme a Tabela 2:

Observações de condições para os ensaios: Corrente de entrada 56,8 mA; $R_L = 220 \Omega$; $P = 3 \text{ W}$.

Tabela 2 - Operação em Malha Fechada com variação de entrada

SG3524 MALHA FECHADA		
TENSÃO DE ENTRADA [V]	DUTY CYCLE [%]	TENSÃO DE SAÍDA [V]
30	8,30%	12,14 V
25	9,80%	12,14 V
20	17,04%	12,14 V
15	49,06%	9,91 V
13	49,06%	8,51 V

Fonte: Autoria própria (2021).

3.2.2 Variando a Carga com Entrada Fixa

Aqui deve-se fornecer alimentação fixa de 20 V ao conversor e regular sua saída para uma tensão constante de 12 V. Em seguida, adicionar as resistências propostas na Tabela 3 na saída do conversor e registrar os valores do *duty cycle*, da Corrente de Entrada, da Corrente de Saída e da Tensão de Saída, conforme a Tabela 3:

Tabela 3 - Operação em Malha Fechada com variação de carga

SG3524 MALHA FECHADA					
CARGA [Ω]	TENSÃO DE ENTRADA [V]	DUTY CYCLE [%]	CORRENTE DE ENTRADA [mA]	CORRENTE DE SAÍDA [mA]	TENSÃO DE SAÍDA [V]
100	20	26,10%	218 mA	122 mA	12,22 V
50	20	39,00%	327 mA	249 mA	12,22 V
20	20	41,40%	620 mA	616 mA	12,26 V
10	20	44,10%	1,12A	1,15 A	12,36 V
5	20	48,75%	2,10A	2,39A	12,65 V

Fonte: Autoria própria (2021).

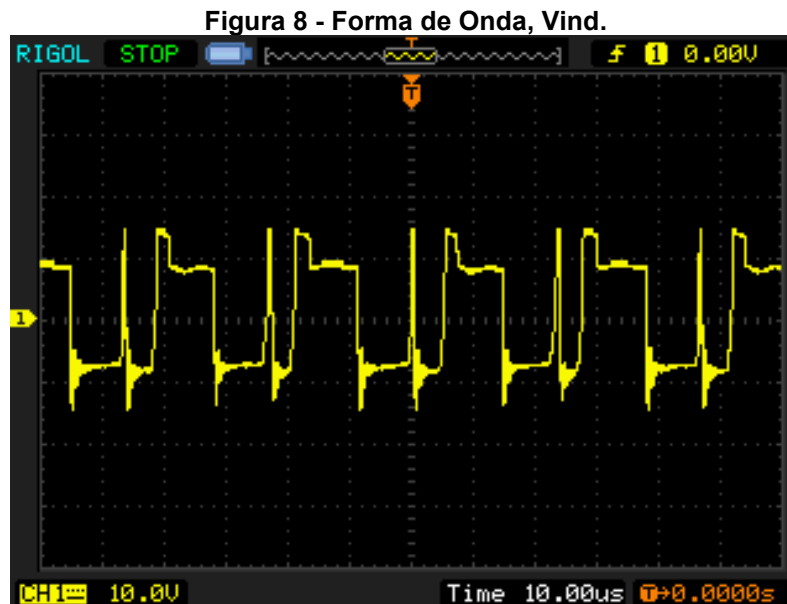
3.3 Coleta de Formas de Onda do Conversor

Para a coleta de formas de onda do conversor, é preciso efetuar o controle do conversor *push-pull* por meio do circuito de malha fechada, fornecer alimentação de 20 V ao conversor e regular sua saída para uma tensão constante de 12 V e manter

uma carga de 100Ω em sua saída, e por fim, coletar as formas de onda pedidas abaixo:

- Forma de onda em VL(Indutor);
- Formas de ondas em VDS1 e VDS2 (*Dreno e Source* dos MOSFETS);
- Formas de ondas em VGS1 e VGS2 (MOSFETS);
- Com o objetivo de avaliar o comportamento do conversor em malha fechada sob a aplicação de degrau de carga, coloque uma resistência na saída do conversor de modo que o seu consumo seja de aproximadamente 0,5 A. Com auxílio de um osciloscópio, colete a forma de onda transitória da tensão de saída, bem como qual será a amplitude máxima, tempo de estabilização e a variação do *Duty Cycle* do conversor;
- Colete a forma de onda transitória da retirada de carga do circuito, bem como qual será a amplitude máxima, tempo de estabilização e variação do *Duty Cycle* do conversor.

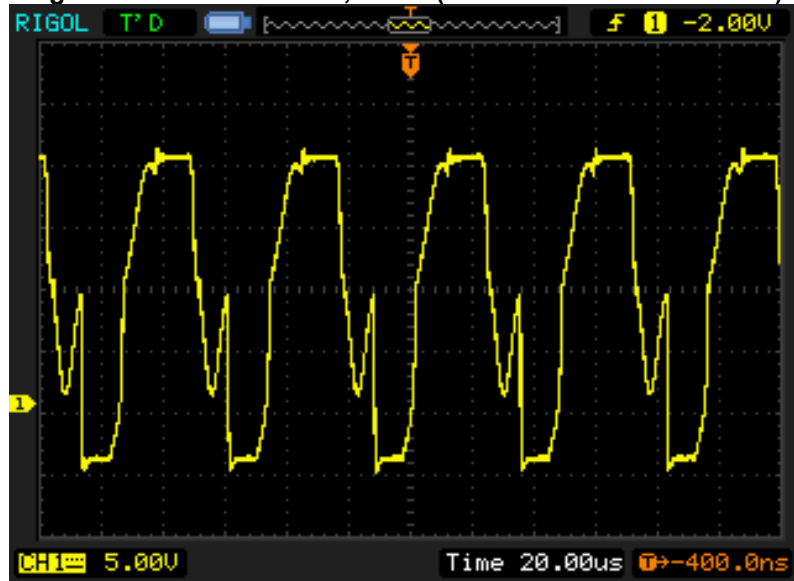
Na Figura 8, é possível observar a forma de onda em V_{ind} , ou seja, o comportamento da tensão no indutor.



Fonte: Autoria própria (2021).

Na Figura 9, é a coleta da forma de onda entre o *dreno* e *source* do mosfet VDS1.

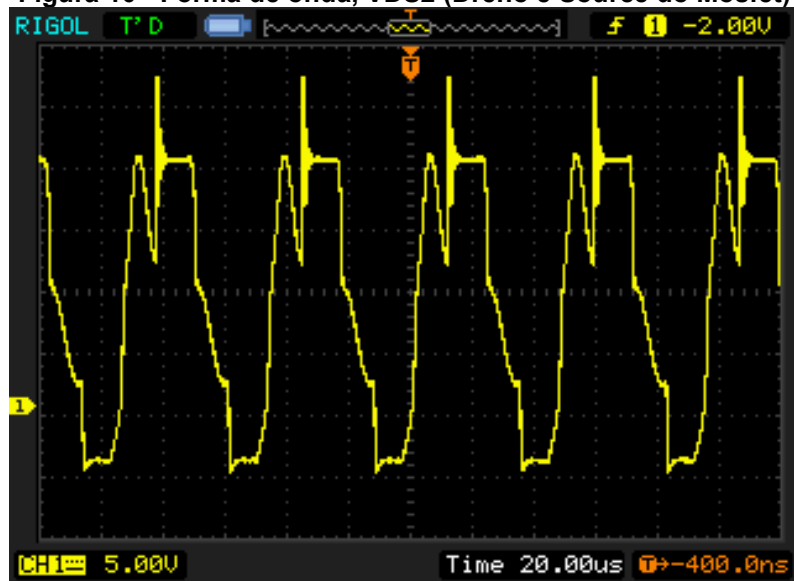
Figura 9 - Forma de onda, VDS1 (Dreno e Source do Mosfet)



Fonte: Autoria própria (2021).

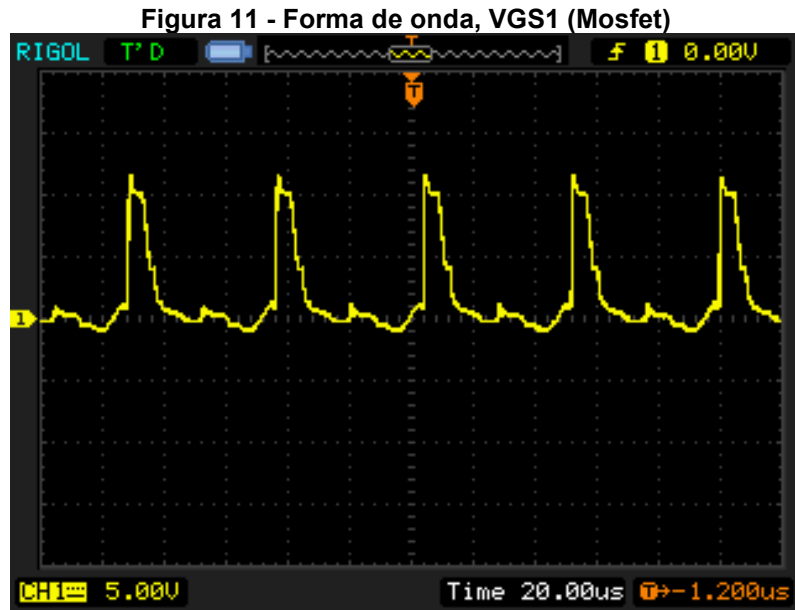
Na Figura 10, é a coleta da forma de onda entre *dreno* e *source* do mosfet VDS2.

Figura 10 - Forma de onda, VDS2 (Dreno e Source do Mosfet)

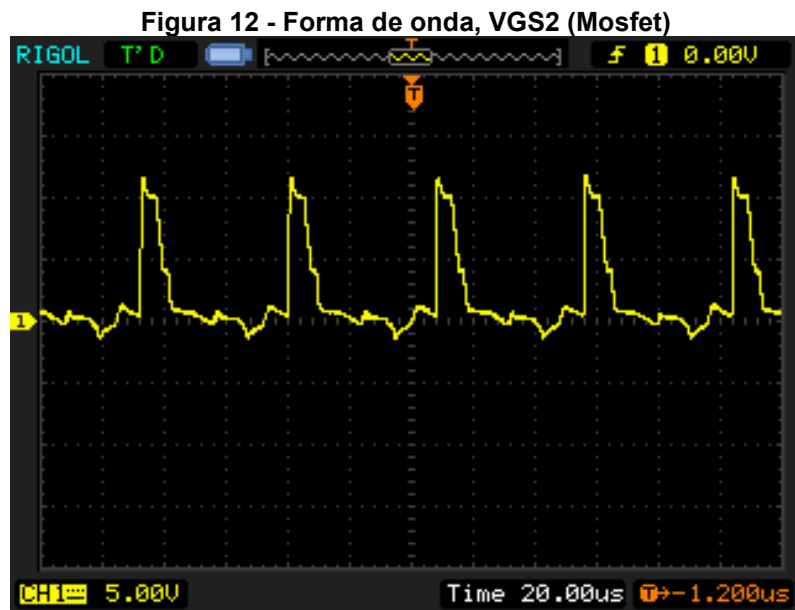


Fonte: Autoria própria (2021).

Na Figura 11, é a forma de onda entre o *gate* e *source* do MOSFET VGS1. Sendo o sinal responsável pelo controle do chaveamento do dispositivo.

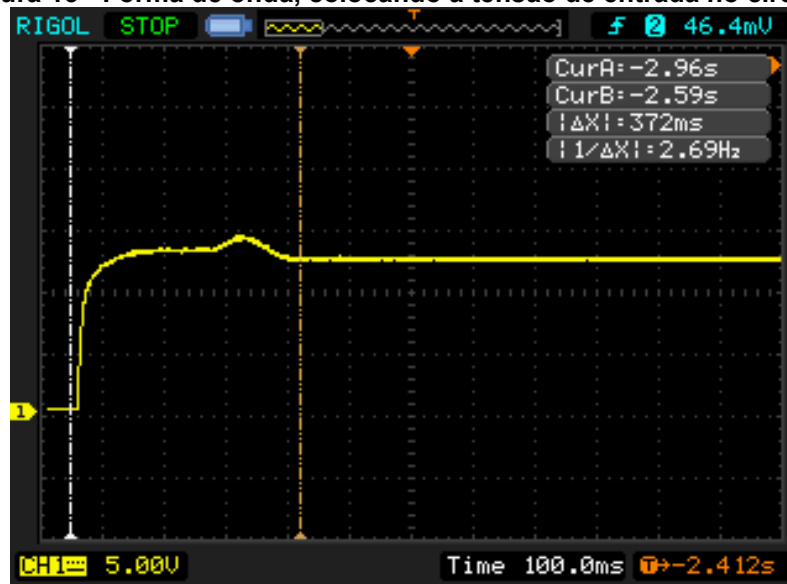


Na Figura 12, é a coleta da forma de onda entre *gate* e *source* do MOSFET *VGS2*. Sendo o sinal responsável pelo controle do chaveamento do dispositivo.



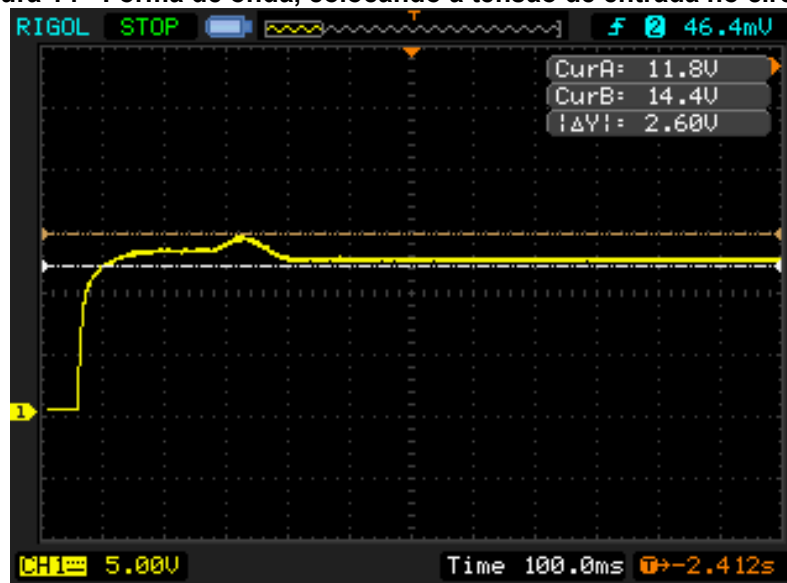
O transiente de estabilização do circuito durante a aplicação da tensão de entrada pode ser observado na Figura 13 e Figura 14. A captura foi realizada com uma carga que demandava $0,5A$, de tal modo que o tempo de estabilização do sinal de saída foi de 372 ms e $\Delta V = 2,60$.

Figura 13 - Forma de onda, colocando a tensão de entrada no circuito.



Fonte: Autoria própria (2021).

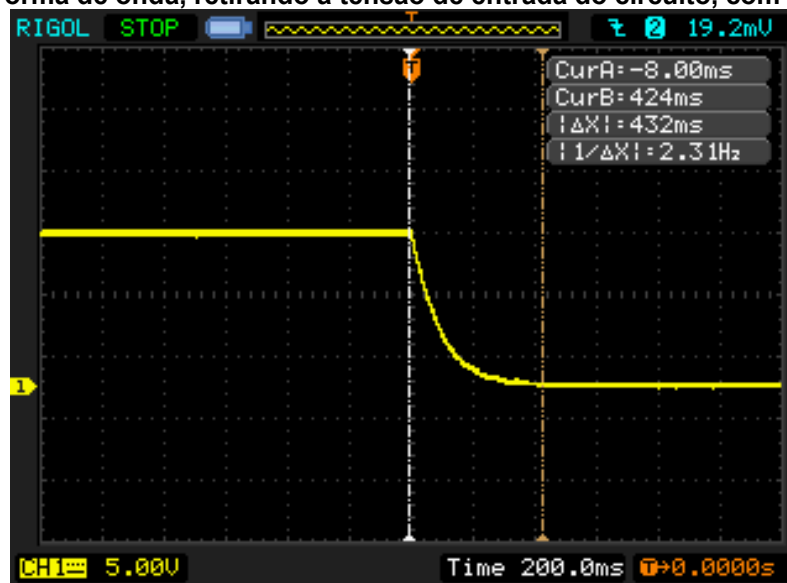
Figura 14 - Forma de onda, colocando a tensão de entrada no circuito.



Fonte: Autoria própria (2021).

Após o circuito ligado e estabilizado com carga de 0,5A, foi retirada alimentação de entrada. De tal modo, a Figura 15 mostra a forma de onda da saída do conversor.

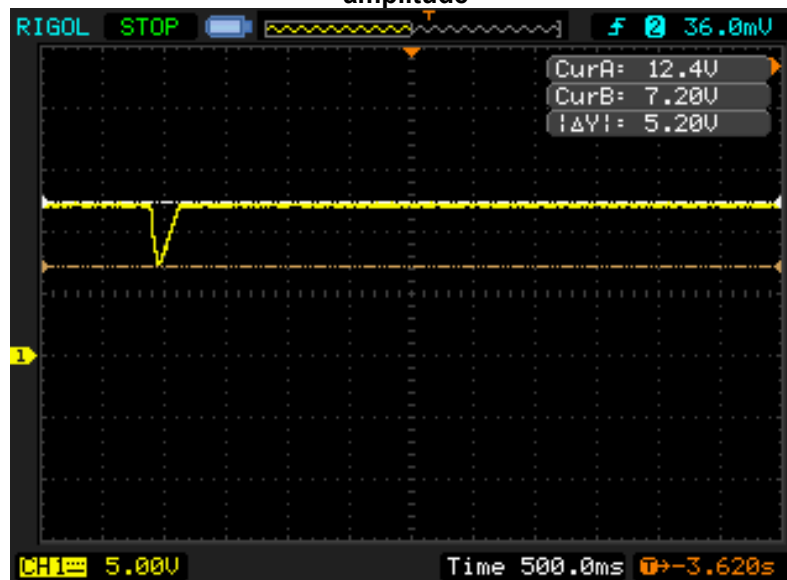
Figura 15 - Forma de onda, retirando a tensão de entrada do circuito, com a carga de 0,5



Fonte: Autoria própria (2021).

Com o conversor já estabilizado sem nenhuma carga, foi acionada carga com consumo de 0,5A, assim sendo, na Figura 16 é possível visualizar a forma de onda com o *undershoot* no sinal de saída com $\Delta V = 5,20 V$.

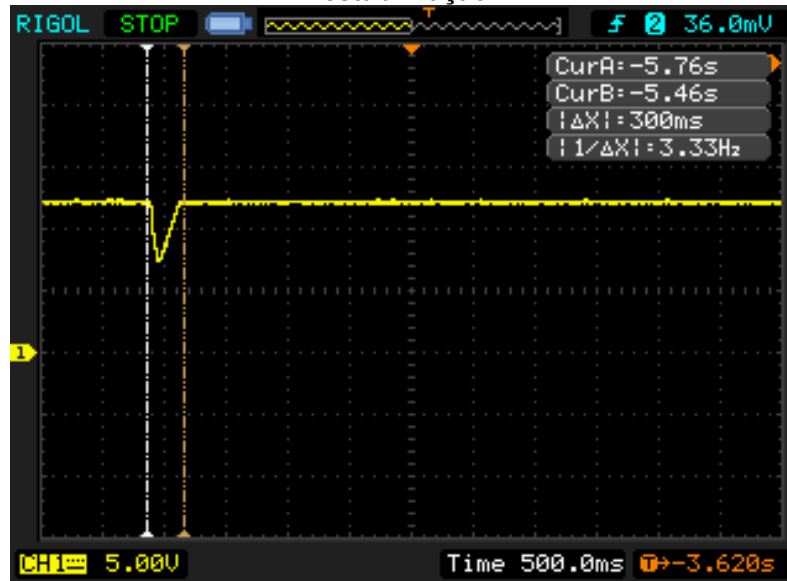
Figura 16 - Forma de onda, colocando a carga de 0,5 A no circuito, com a variação da amplitude



Fonte: Autoria própria (2021).

Na Figura 17, com os cursores do osciloscópio no eixo do tempo, é possível visualizar a estabilização do *undershoot* no momento em que se adiciona a carga até a estabilização do sinal de saída que foi de 300 ms.

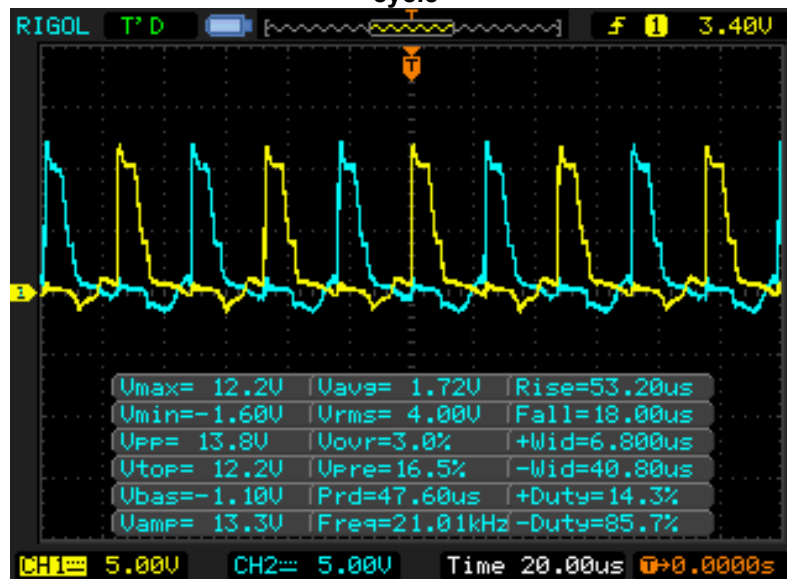
Figura 17 - Forma de onda, colocando a carga de 0,5 A no circuito, com a variação no tempo de estabilização



Fonte: Autoria própria (2021).

A Figura 18, é forma de onda dos sinais de controle do conversor sem carga.

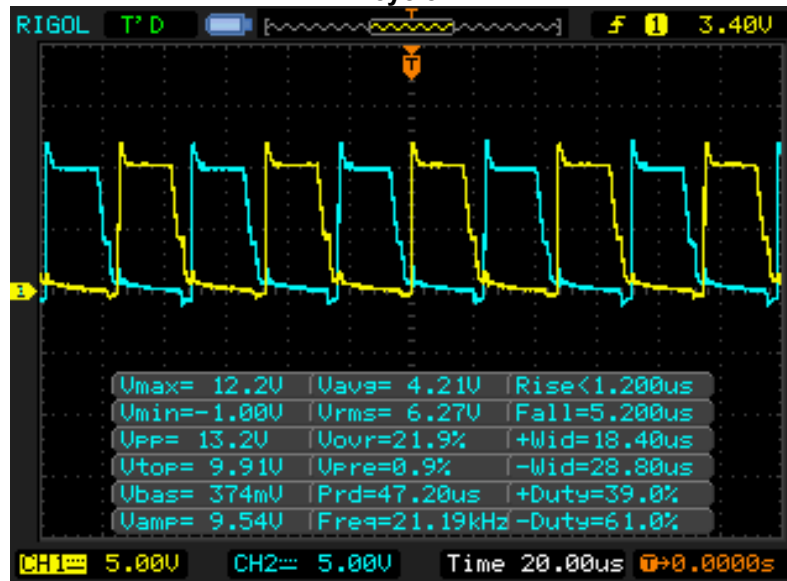
Figura 18 - Forma de onda, colocando a carga de 0,5 A no circuito, com a variação do duty cycle



Fonte: Autoria própria (2021).

A Figura 19, é forma de onda dos sinais de controle do conversor agora com carga consumindo 0,5 A.

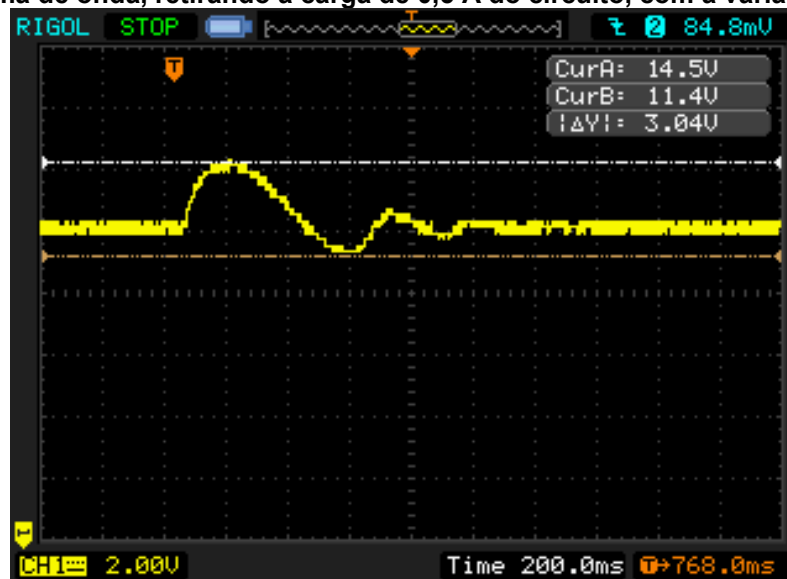
Figura 19 - Forma de onda, colocando a carga de 0,5 A no circuito, com a variação do duty cycle



Fonte: Autoria própria (2021).

A Figura 20, é a forma de onda transiente do sinal de saída do conversor após a retirada da carga de 0,5A com $\Delta V = 3,04V$.

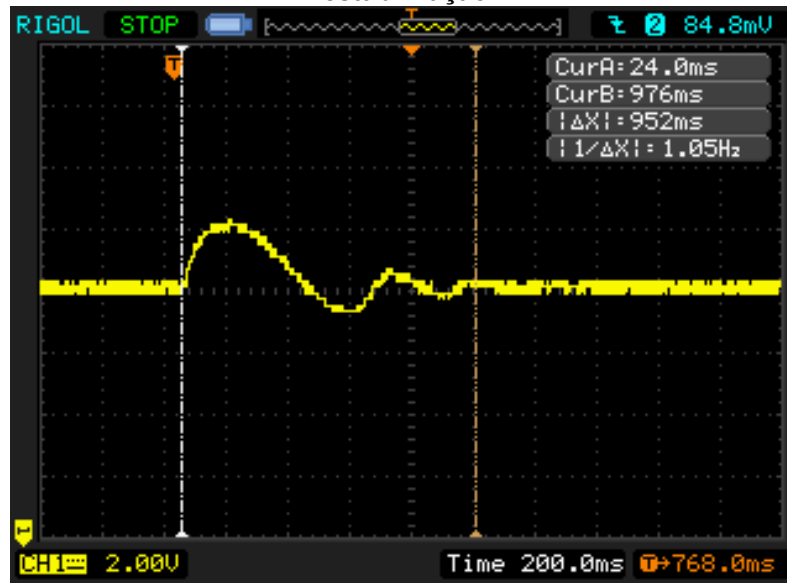
Figura 20 - Forma de onda, retirando a carga de 0,5 A do circuito, com a variação da amplitude



Fonte: Autoria própria (2021).

O tempo de estabilização do sinal de saída na retirada da carga de 0,5A é de 952 ms, como pode ser visto na Figura 21.

Figura 21 - Forma de onda, retirando a carga de 0,5 A do circuito, com a variação do tempo de estabilização



Fonte: Autoria própria (2021).

REFERÊNCIAS

MELLO, L. F. P. **Análise e Projeto de Fontes Chaveadas**. 1. ed. São Paulo: Erica, 1996. p.1-200.

_____. **Projeto de Fontes Chaveadas**. 2. ed. São Paulo: Erica, 1988. p.153-200.

POMÍLIO, J. A. **Topologias básicas de conversores CC-CC com isolamento**. Apostila Didática. Publicação FEE 13/95. Revisão: 2018. Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/it505/CAP2.pdf>. Acesso em: 25 out. 2019.

STMICROELECTRONICS INC. **SG3524 Datasheet**: Pulse Width Modulator Control Circuits. Disponível em: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/5632/MOTOROLA/SG3525.html>. Acesso em: 8 dez. 2021.

ANEXO A - Datos de núcleo de ferrite

TABELA 1.1 - Valores de K_j e x para alguns tipos de núcleo.

NÚCLEO	K _j 20 °C ≤ Δt ≤ 60 °C	X
POTE	74,78 . ΔT ^{0,54}	+0,17
EE	63,35 . ΔT ^{0,54}	+0,12
X	56,72 . ΔT ^{0,54}	+0,14
RM	71,7 . ΔT ^{0,54}	+0,13
EC	71,7 . ΔT ^{0,54}	+0,13
PQ	71,7 . ΔT ^{0,54}	+0,13

Tabela B.4 - Dados de núcleo de ferrite.

Tipo	Designação	A _p (cm ⁴)	CEM (cm)	l _e (cm)	A _e (cm ²)	A _s (cm ²)
Pote	9x5	0,0065	1,85	1,25	0,101	3,18
	11x7	0,0152	2,20	1,55	0,162	4,20
	18x11	0,0393	2,80	1,98	0,251	6,77
	22x13	0,114	3,56	2,58	0,433	10,99
	26x16	0,246	4,40	3,15	0,634	16,31
	30x19	0,498	5,20	3,76	0,939	23,0
	36x22	1,01	6,00	4,52	1,37	31,9
	42x29	2,01	7,30	5,32	2,02	44,2
	47x28	4,81	8,60	6,86	2,65	67,4
		5,62	9,30	7,25	3,12	76,0
RM	6	0,47	3,0	2,67	0,313	7,3
	7	0,086	3,5	2,68	0,400	9,9
	8	0,156	4,2	3,51	0,520	13,3
	10	0,340	5,2	4,20	0,830	19,7
	12	1,02	6,1	5,69	1,40	34,1
	14	1,90	7,1	7,10	1,78	46,6
X	22	0,330	4,9	3,80	0,66	19,2
	25	0,480	5,5	4,15	0,73	24,5
	30	1,43	6,4	5,50	1,12	40,9
	35	2,85	7,7	6,73	1,64	56,3
PQ	20/16	0,27	4,4	3,74	0,61	14,2
	26/20	0,65	5,6	4,63	1,13	23,6
	26/25	0,91	5,6	5,55	1,13	27,8
	32/20	1,10	6,71	5,55	1,42	29,5
	32/30	2,06	6,71	7,46	1,42	40,1
	35/35	3,48	7,52	8,79	1,62	51,8
	40/40	6,40	8,39	10,20	2,01	65,6
EE	20/10/5	0,48	3,8	4,28	0,312	28,6
	30/15/7	0,71	5,6	6,69	0,597	34,8
	30/15/14	1,43	6,7	6,69	1,20	43,2
	42/21/15	4,66	9,3	9,7	1,82	89,1
	42/21/20	6,14	10,5	9,7	2,40	97,5
	55/28/21	13,3	11,6	12,3	3,54	150
	65/33/26	57,2	15,0	14,7	10,6	312
EC	35	1,36	5,0	7,74	0,843	43,5
	41	2,68	6,0	8,80	1,25	59,0
	52	5,71	7,3	10,3	1,83	91,0
	70	19,2	9,5	14,1	2,83	170