



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM CONVERSOR DO TIPO *BUCK* E ANÁLISE DE DADOS EM
 RELAÇÃO A UM MODELO EM CONDIÇÕES IDEAIS.**

***DESIGN AND CONSTRUCTION OF A BUCK TYPE CONVERTER AND DATA ANALYSIS IN
 RELATION TO A MODEL IN IDEAL CONDITIONS.***

Miguel Victor Ribeiro de Paiva¹, Thiago Amaral Melo Lima²

Submetido em: 18/05/2021

e25329

Aprovado em: 08/06/2021

RESUMO

O presente artigo objetivou a elaboração do projeto de um conversor tipo *buck*, bem como a execução de testes e a análise de dados e/ou sinais em relação a um modelo de conversor em condições ideais. A construção do protótipo foi feita utilizando dispositivos reaproveitados de sucata, porém em bom estado, e de alguns poucos materiais comprados com recursos próprios. Para análise de dados foram utilizados equipamentos com alto grau de confiabilidade, como osciloscópio e fonte reguladora de tensão, além de se utilizar um *software* de projetos eletrônicos conhecido como PSIM, de grande precisão e bastante utilizado na Engenharia. Quanto à revisão bibliográfica, apoiamos nosso estudo em autores com rico conhecimento na área de Eletrônica de Potência, tais como HART (2011), AHMED (2000) e BOYLESTAD-NASHELSKY (1999), onde além de identificar os conhecimentos técnicos úteis para a realização desta pesquisa, foi observado a grande importância desta área do conhecimento em vários setores do meio tecnológico, como também a importância dos conversores dentro da Eletrônica de Potência desde a produção de energia até o seu consumo final. Assim, este artigo visa demonstrar não apenas como é possível executar um projeto de conversor, mas também demonstrar a importância do assunto dentro da área de engenharia e de suas aplicações reais dentro do contexto tecnológico que vivenciamos. Com os resultados obtidos, pode-se concluir que o projeto obteve êxito, apesar de ser executado manualmente e com utilização de materiais reaproveitados.

PALAVRAS-CHAVE: Eletrônica de Potência. Conversores. *Buck*.

ABSTRACT

The present article aimed at the elaboration of the design of a buck converter, as well as the execution of tests and the analysis of data and / or signals in relation to a converter model in ideal conditions. The construction of the prototype was made using devices reused from scrap, but in good condition, and from a few materials purchased with its own resources. For data analysis, equipment with a high degree of reliability was used, such as an oscilloscope and a voltage regulating source, in addition to using electronic design software known as PSIM, of great precision and widely used in engineering. As for the bibliographic review, we support our study in authors with rich knowledge in the field of Power Electronics, such as HART (2011), AHMED (2000) and BOYLESTAD-NASHELSKY (1999), where in addition to identifying the technical knowledge useful for the realization from this research, the great importance of this area of knowledge was observed in several sectors of the technological environment, as well as the importance of converters within Power Electronics from the production of energy to its final consumption. Thus, this article aims to demonstrate not only how it is possible to execute a converter project, but also to demonstrate the importance of the subject within the engineering area and its real applications within the technological context that we are experiencing.

¹ Especialista em Eng. Elétrica - Sistemas de Potência pelo Instituto Brasil de Ensino (IBRA). Graduado em Mecatrônica Industrial pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE).

² Mestrado em Matemática pela Universidade Estadual do Piauí – UESPI.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM CONVERSOR DO TIPO *BUCK* E ANÁLISE DE DADOS
EM RELAÇÃO A UM MODELO EM CONDIÇÕES IDEAIS.
Miguel Victor Ribeiro de Paiva, Thiago Amaral Melo Lima

With the results obtained, it can be concluded that the project was successful, despite being carried out manually and using reused materials.

KEYWORDS: *Power Electronics. Converters. Buck.*

INTRODUÇÃO

Os sistemas eletromecânicos utilizados no início da era eletrônica, não foram suficientes para fornecer um comportamento dinâmico adequado as novas necessidades elétricas que a modernidade propunha. Somente com o advento da Eletrônica de Potência na década de 60 é que foi possível atuar, praticamente, em tempo real sobre grandes quantidades de energia em qualquer estágio, desde sua geração até o seu consumo.

Dentro deste contexto, a Eletrônica de Potência torna-se importante porque agrega uma tecnologia capaz de implementar estratégias de controle eficaz desde a produção até o consumo final de energia elétrica.

Segundo Pomilio (2018, p.01) embora limitada pela capacidade de bloqueio de tensão e de condução de corrente dos dispositivos semicondutores, atualmente é possível construir conversores com capacidade para alguns *MVA*. Tem-se a expectativa de, com evoluções nos materiais utilizados para a construção destes dispositivos, ampliar em pelo menos uma ordem de grandeza estes valores, o que trará ainda maior capacidade de processamento de energia.

No início do século XX, Thomas Edson executou um experimento que seria o precursor dos retificadores. Edson introduziu um eletrodo com potencial positivo em sua lâmpada de filamento e o cientista Ambrose Fleming conseguiu identificar a capacidade deste dispositivo servir como retificador. Ou seja, foi possível converter uma alimentação *CA* ao dispositivo (filamento) *CC*, coletada no eletrodo auxiliar. Assim foi possível processar a energia elétrica para se adequar às cargas *CC*.

Em 23 de Dezembro de 1947 a indústria eletrônica estava prestes a experimentar uma linha de interesse e desenvolvimento completamente nova. Foi durante a tarde deste dia que John Bardeen e Walter Brattain demonstraram a função de ampliação do primeiro transistor, nos laboratórios da companhia Bell Telephone. As vantagens deste dispositivo de estado sólido de três terminais em relação à válvula eram óbvias: menor e mais leve, não apresentava necessidades ou perdas de aquecimento; mais robusto; mais eficiente, já que menos potência era absorvida pelo dispositivo, estava instantaneamente disponível para utilização, não necessitando de um período de aquecimento; e tensões de operação menores poderiam ser utilizadas (BOYLESTAD; NASHELSKY, 1999).

Bardeen e Brattain receberam o Prêmio Nobel de Física de 1956, juntamente com William Shockley, "por suas pesquisas em semicondutores e descoberta do efeito transistor" (POMILIO, 2018, p.12).



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM CONVERSOR DO TIPO *BUCK* E ANÁLISE DE DADOS EM RELAÇÃO A UM MODELO EM CONDIÇÕES IDEAIS.
Miguel Victor Ribeiro de Paiva, Thiago Amaral Melo Lima

A incrível descoberta do transistor levou a pesquisa na área da eletrônica a um outro patamar durante a década de 50 e houve um enorme esforço no desenvolvimento dos dispositivos de estado sólido.

Segundo Pomilio (2018, p.13) O primeiro dispositivo de estado sólido, que marca o nascimento do campo tecnológico a que denominamos Eletrônica de Potência foi o *SCR* (Retificador Controlado de Silício), denominação dada pela General Electric, em 1958. Tratava-se de um dispositivo com o mesmo comportamento biestável da *thyatron* (um tipo de tubo cheio de gás usado como um interruptor elétrico de alta potência e um retificador controlado). Por essa razão, a denominação genérica que se estabeleceu para o componente foi Tiristor.

Ao longo das próximas décadas, as aplicações eletrônicas, principalmente na área da computação, cresceram exponencialmente. A utilização de energia em áreas diversificadas começou a exigir soluções mais eficientes, leves e compactas. Com isso a evolução dos transistores foi obrigatória, devido a necessidade de dispositivos que operassem como interruptores.

Diferentemente dos tiristores que, por seu modo de funcionamento se adequam à alimentação *CA*, os transistores têm sua melhor aplicação a partir de fontes *CC*. Ao desenvolvimento dos transistores bipolares de potência somou-se a evolução dos transistores de efeito de campo, principalmente o *MOSFET* (*Metal-Oxide Silicon Field Effect Transistor*), resultando, no final dos anos 80 no surgimento do *IGBT* (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). Em níveis crescentes de tensão e corrente, permitindo alimentar cargas na faixa de *MVA*, as fontes chaveadas e os inversores (conversores alimentados em *CC*) tiveram um enorme desenvolvimento em termos de desempenho e confiabilidade (POMILIO, 2018, p.15).

Os conversores tiveram mais aplicações a partir da década de 90. Exemplo disso é sua aplicação em motores de indução, permitindo o controle de velocidade e eliminando o uso de motores *CC* de escovas.

Assim, partindo da importância da pesquisa e da aplicação de conversores dentro do campo da Eletrônica de Potência, este projeto dedica-se ao estudo e construção de um conversor *CC*, exclusivamente o conversor do tipo Buck, e análise de seus dados em relação aos dados de projeto operando em condições ideais.

Os objetivos específicos deste artigo é projetar um conversor *CC-CC* abaixador de tensão ou conversor *Buck*. Usar a exibição das principais formas de onda encontradas e atuação dos componentes em simulação através do *software* PSIM para propiciar uma melhor análise dos resultados obtidos na prática após a montagem da placa. Projetar um *layout* de placa de modo a definir uma melhor adequação dos dispositivos para o uso adequado de espaço e deixar a placa de circuito mais compacta. Após executar todos os passos de projeto, analisar todos os sinais de entrada e saída do conversor e comparar com um modelo em condições ideais de projeto.

Sendo assim, o objetivo principal é projetar um circuito de modo que a operação do conversor determine uma tensão de entrada de 24V e uma tensão de saída de 15V com uma potência de saída de 10W.

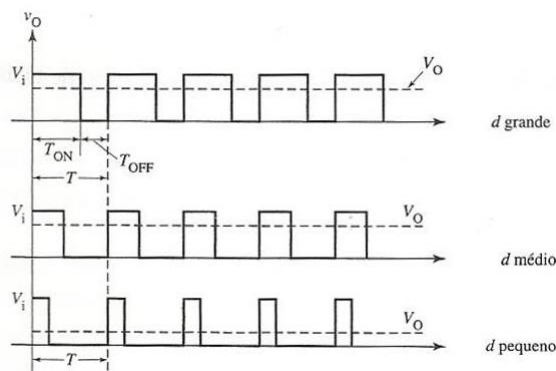


FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os conversores *CC* para *CC* são dispositivos usados para obter uma tensão *CC* variável a partir de uma fonte de tensão *CC* constante. Essa conversão pode ser obtida pela combinação de um indutor e/ou capacitor e um dispositivo de estado sólido que opere no modo de chaveamento em alta frequência.

A técnica de chaveamento usada nesses conversores é denominada *PWM* (*pulse-width modulation* – modulação por largura de pulso). Nesse método, a largura de pulso T_{ON} varia enquanto o período de chaveamento total T é constante. A Figura 1 mostra como as formas de ondas de saída variam à medida que o ciclo de trabalho aumenta (AHMED, 2000).

Figura 1: Formas de onda da tensão de saída com frequência de chaveamento fixa.



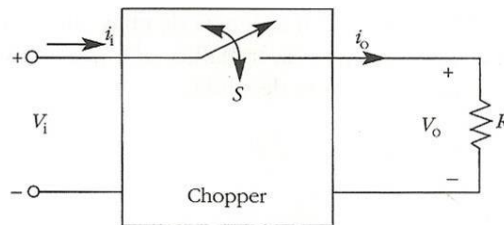
Fonte: (AHMED, 2000).

Há duas espécies de circuitos conversores *CC-CC*: *Buck* e *Boost*. O modelo *Buck* produz uma tensão de saída menor ou igual à tensão de entrada e o modelo *Boost* fornece uma tensão de saída maior ou igual a tensão de entrada. Ambos são usados em várias aplicações industriais nas quais há uma fonte de alimentação constante.

Segundo Ahmed (2000) o princípio fundamental de um *chopper* (Conversor *CC* para *CC*) básico é ilustrado na figura 2. Uma chave é ligada em série com a fonte da tensão *CC* (V_i) e a carga. A chave S pode ser um transistor de potência, um *SCR* (*silicon controlled rectifier* - retificador controlado de silício) ou um tiristor *GTO*. Supondo-se que as chaves sejam ideais, possuem as seguintes características:

- 1.resistência zero (queda de tensão nula) quando ligadas;
- 2.resistência infinita (corrente de fuga nula) quando desligadas;
- 3.podem chavear instantaneamente a partir de cada um dos dois estados.

Figura 2: *Chopper* CC básico.



Fonte: (AHMED, 2000).

Em condições ideais, a perda de potência no *chopper* é zero. Portanto, a potência de saída é igual à potência de entrada:

$$V_o I_o = V_i I_i \quad (1)$$

Onde:

V_o = tensão média de saída;

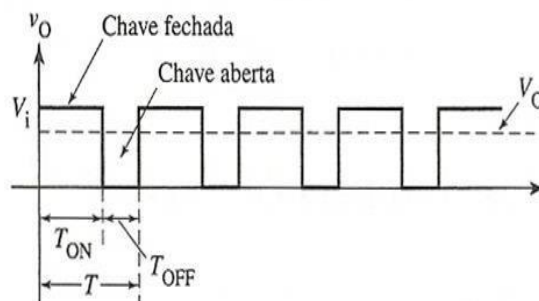
V_i = tensão de entrada;

I_o = corrente média de saída;

I_i = corrente média na entrada.

Suponhamos que a tensão de saída seja ajustável em uma certa faixa, de zero ao nível de entrada. Vamos operar a chave de tal modo que ela esteja ligada (fechada) por um tempo T_{ON} e desligada (aberta) por um tempo T_{OFF} em cada ciclo de um período T prefixado. A forma de onda resultante da tensão de saída (mostrada na figura 3) é um trem de pulsos retangulares de duração T_{ON} .

Figura 3: Forma de onda de V_o para a Figura 1



Fonte: (AHMED, 2000).

Ainda segundo Ahmed (2000) a figura mostra que a tensão instantânea na carga é zero (S desligada) ou V_i (S ligada). A tensão média (CC) na saída em um ciclo é dada por:



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM CONVERSOR DO TIPO *BUCK* E ANÁLISE DE DADOS
EM RELAÇÃO A UM MODELO EM CONDIÇÕES IDEAIS.
Miguel Victor Ribeiro de Paiva, Thiago Amaral Melo Lima

$$V_o = (T_{ON} / T_{ON} + T_{OFF}) V_i \quad (2)$$

$$V_o = (T_{ON} / T) V_i \quad (3)$$

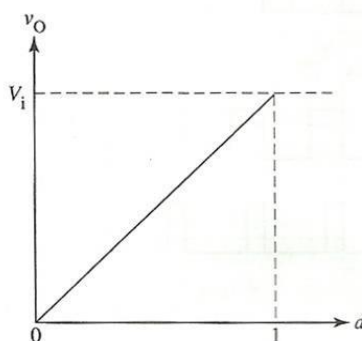
onde T é o período ($T_{ON} + T_{OFF}$). A frequência de chaveamento do *chopper* é $f = 1/T$. Se utilizarmos a ideia do ciclo de trabalho (d), que é a relação entre a largura do pulso T_{ON} e o período da forma de onda:

$$d = T_{ON} / T \quad (4)$$

$$V_o = d V_i \quad (5)$$

A equação 5 mostra que a tensão de saída varia, de modo linear, com o ciclo de trabalho. A figura 4 mostra a tensão de saída à medida que d varia de zero a um. É, portanto, possível controlar a tensão de saída na faixa de zero a V_i .

Figura 4: Tensão de saída V_o em função do ciclo de trabalho.



Fonte: (AHMED, 2000).

Ahmed (2000) ainda define que se a chave S for um transistor, a corrente de base controlará os períodos ligado e desligado da chave do transistor.

O circuito *chopper CC* da figura 2 não é muito prático. Só serve para alimentar cargas resistivas, nas quais não seja necessária uma corrente linear. Um arranjo muito mais prático (mostrado na figura 5a) inclui um indutor L e um diodo D , acrescentados para eliminar as pulsações de corrente. Esse circuito fornece uma corrente *CC* linear para as cargas práticas, como um motor *CC*.



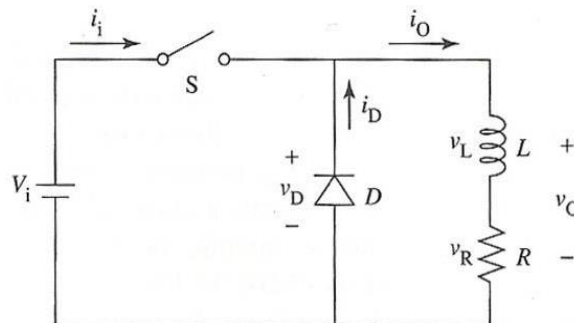
RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM CONVERSOR DO TIPO *BUCK* E ANÁLISE DE DADOS EM RELAÇÃO A UM MODELO EM CONDIÇÕES IDEAIS.
Miguel Victor Ribeiro de Paiva, Thiago Amaral Melo Lima

Quando a chave S for fechada, o diodo D ficará desligado, uma vez que está inversamente polarizado. E permanecerá assim durante todo o tempo em que S estiver ligada. A configuração do circuito equivalente é mostrada na figura 5b. A corrente na entrada cresce de maneira exponencial e flui através do indutor L e da carga. A tensão de saída é igual a V_i . A chave S é mantida ligada por um tempo T_{ON} e depois passa para o estado desligado.

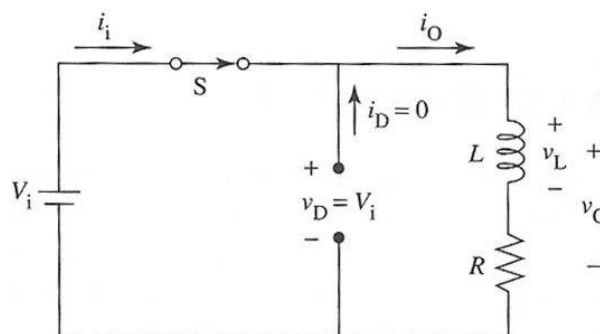
Quando a chave é aberta, a corrente no indutor começa a cair até se anular. Isso provoca, no indutor, uma tensão induzida de polaridade oposta. A tensão no indutor polariza o diodo diretamente e a corrente, agora fluindo no indutor, atua como retorno através do diodo D e da carga. A finalidade do diodo, portanto, é fornecer um caminho para a corrente na carga quando S estiver desligada. Assim ao desligar-se S , automaticamente liga-se D . a configuração do novo circuito é mostrada na figura 5c. A tensão na carga é nula e a corrente cai a zero durante todo o tempo em que S permanecer desligada, isto é, durante o período T_{OFF} . A energia armazenada em L é entregue à carga. Esse arranjo de circuito permite o uso de um filtro simples, como a indutância L , para propiciar uma corrente *CC* linear satisfatória na carga, para várias aplicações. Quando a frequência de chaveamento for alta, uma indutância relativamente pequena será suficiente para reduzir a ondulação a um grau aceitável.

Figura 5a: Circuito básico de *chopper Buck*.



Fonte: (AHMED, 2000).

Figura 5b: Circuito equivalente para chave ligada.



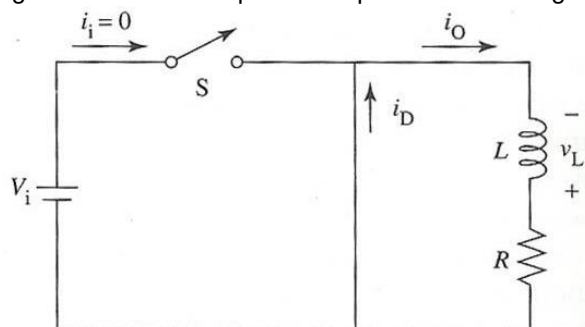
Fonte: (AHMED, 2000).



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM CONVERSOR DO TIPO *BUCK* E ANÁLISE DE DADOS
EM RELAÇÃO A UM MODELO EM CONDIÇÕES IDEAIS.
Miguel Victor Ribeiro de Paiva, Thiago Amaral Melo Lima

Figura 5c: Circuito equivalente para chave desligada.



Fonte: (AHMED, 2000).

Ahmed (2000) ainda define que a figura 6a mostra a forma de onda da tensão de onda da tensão na carga, além da tensão que aparece no diodo. Ele é igual à tensão de entrada V_i quando a chave está ligada e quando o diodo D se acha inversamente polarizado. No momento em que a chave é aberta, a tensão de saída mantém-se em zero pela ação do diodo, que fornece um caminho para a corrente na carga. Como a tensão média no indutor L é desprezível quando não há componente resistiva, a tensão de saída deve ser a tensão média no diodo. Portanto, aqui, a equação 2 também se aplica.

A figura 6 mostra a corrente no diodo. É a mesma da carga (figura 6d) durante T_{OFF} . Em T_{ON} , a corrente de saída i_o é a mesma da entrada i_i . Quando a chave for aberta (T_{OFF}), a corrente na carga cairá de seu valor máximo I_{max} a um valor final I_{min} . Durante esse intervalo, ela fluirá pelo indutor, pela carga e pelo diodo. Quando tiver caído a um valor I_{min} , ocorrerá o fechamento da chave. A corrente, no diodo, para de fluir nesse instante; a corrente fornecida pela fonte, agora, é I_{min} . Ela começa a aumentar e, quando alcança o valor de I_{max} , depois de um tempo T_{ON} , provoca a reabertura da chave. O diodo fornece outra vez o caminho para a corrente na carga e o ciclo se repete. A corrente, portanto, oscila entre I_{max} e I_{min} . A ondulação incluída na corrente de saída reduz-se à medida que a frequência de chaveamento do *chopper* aumenta.

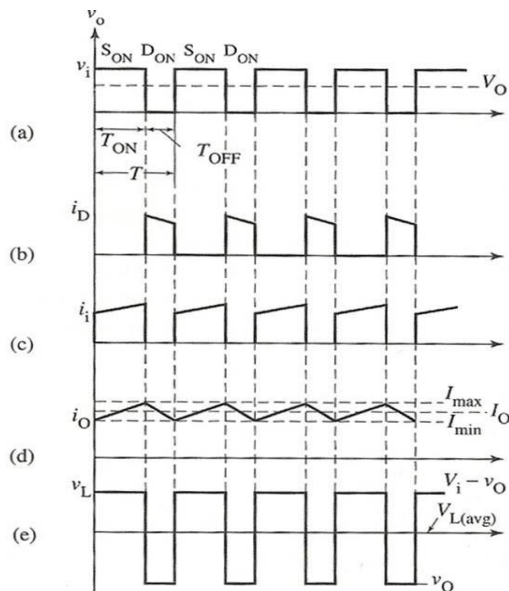
Embora a corrente na carga de um *chopper* seja basicamente constante, na entrada ela ainda consiste em um trem de pulsos agudos. A figura 6c mostra a forma de onda para a fonte de corrente. Um filtro capacitivo costuma ser usado em paralelo com a fonte de potência de entrada, para manter a linearidade da corrente na entrada.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM CONVERSOR DO TIPO *BUCK* E ANÁLISE DE DADOS
EM RELAÇÃO A UM MODELO EM CONDIÇÕES IDEAIS.
Miguel Victor Ribeiro de Paiva, Thiago Amaral Melo Lima

Figura 6: Formas de onda de tensão e de corrente para $T_{ON} \sim T_{OFF}$



Fonte: (AHMED, 2000).

As formas de onda de corrente e de tensão mostradas na figura 6 pressupõem uma frequência de chaveamento e uma carga, tal que, $T \ll \tau$. Aqui, τ é a *constante de tempo do circuito* e depende da relação L/R . Observe que a variação da corrente de saída é linear e a ondulação, bem pequena, por causa da constante de tempo grande. A corrente na saída i_o está sempre presente; portanto, esse modo de operação se chama *modo de condução contínua* de operação. A corrente na saída é contínua porque o indutor absorve energia durante T_{ON} e a descarrega em T_{OFF} . Como consequência, a tensão média em L cai a zero no estado estacionário e a tensão na carga resistiva deve ser igual a V_o .

O conversor *Buck* descrito neste projeto integra o estudo básico dos *chopper's CC* com um estudo mais profundo sobre as variáveis que podem acarretar mudanças nos valores finais de projeto, é a integração de um estudo teórico com orientação prática do modo de funcionamento do conversor.

A utilização de dispositivos adicionais como capacitores de poliéster ou cerâmico para alta frequência e a utilização de um filtro na entrada são características necessárias para o funcionamento correto do conversor eliminando possíveis falhas como variação da corrente na entrada devido pulsos agudos.

O projeto baseia-se na característica do modo de condução contínua de operação porque o indutor absorve energia durante T_{ON} e descarrega em T_{OFF} , isso para que a tensão média no indutor caia a zero quando a chave se encontrar no estado aberto, isso faz com que o indutor não danifique



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM CONVERSOR DO TIPO *BUCK* E ANÁLISE DE DADOS
EM RELAÇÃO A UM MODELO EM CONDIÇÕES IDEAIS.
Miguel Victor Ribeiro de Paiva, Thiago Amaral Melo Lima

o dispositivo de chaveamento, para isso utiliza-se um diodo que sugere um caminho alternativo para corrente.

O método utilizado para acionar o dispositivo de chaveamento, neste caso o *MOSFET* (dispositivo utilizado no projeto), é o *PWM* (*pulse-width modulation* ou modulação por largura de pulso). Nesse método, a largura do pulso T_{ON} varia enquanto o período de chaveamento total T é constante. Esse método é muito viável, pois facilita o modo de operação de chaveamento do circuito e garante uma frequência de chaveamento fixa.

METODOLOGIA

Para realizar os experimentos do projeto foram utilizados os seguintes equipamentos: Osciloscópio *Tektronix Mixed Signal Oscilloscope 2012*, Gerador de Função *Peaktech 2830 Sweep/Function Generator*, Fonte Regulada CC *Power Supply Minipa MPL-3305M*, Ponte *LCR MXB-821* (Minipa) e Placa de Fenolite (7,4 x 5,8). Quanto ao modelo proposto, o definimos com os parâmetros abaixo:

Tabela 1: Parâmetros para o dimensionamento do conversor *BUCK*.

Tensão de entrada – V_{in}	24 V
Tensão de saída – V_{out}	15 V
Potência de saída – P_{out}	10 W
Frequência de operação – f	30 KHz
Capacitância – C	1000 μF

Fonte: Elaboração dos autores (2021).

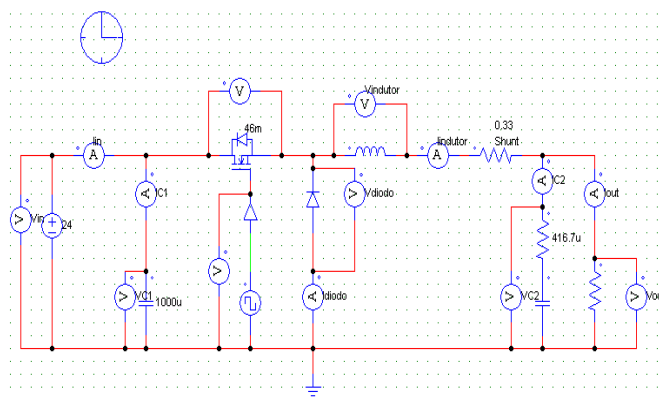
Os valores mostrados na tabela acima foram definidos levando em consideração os componentes disponíveis no laboratório. A partir destes parâmetros foram dimensionados o indutor e o conversor. Abaixo está o circuito que foi parametrizado com os valores obtidos nos dimensionamentos, e simulado no software *PSIM*.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM CONVERSOR DO TIPO *BUCK* E ANÁLISE DE DADOS
EM RELAÇÃO A UM MODELO EM CONDIÇÕES IDEAIS.
Miguel Victor Ribeiro de Paiva, Thiago Amaral Melo Lima

Figura 7: Circuito do conversor *Buck* (PSIM).



Fonte: Elaboração dos autores (2021).

As equações do circuito foram definidas de acordo com as necessidades de projeto. Considerando-se a análise do chaveamento, indutância e capacitâncias para o circuito.

Após todos os cálculos efetuados, foi iniciada a etapa de dimensionamento do indutor. Após definir o núcleo e ter em mãos alguns dos parâmetros já calculados do conversor, iniciou-se, então, o dimensionamento do indutor, que por sinal foi um dos passos mais complexos do projeto, pelo fato de necessitar de parâmetros pré-definidos do conversor. Abaixo é mostrado o resumo dos valores obtidos no dimensionamento.

Especificações do Indutor:

- Núcleo utilizado: *EE30/14*;
- Número de espiras: 115;
- Tipo de fio: *AWG 22*;
- Número de fios em paralelo: 1;
- A/cm^2 : 205,906;
- *Gap*: 0,05cm;
- Constante de ocupação: 0,385;
- Possibilidade de execução $ku < 0,4$: OK;
- Perdas no indutor: $7,069 \times 10^{-3}$ W.

O indutor teve como características primordiais a intenção de se definir um valor de indutância que fosse compatível com o projeto do conversor, este valor foi definido pelas equações e conseguido na montagem física do dispositivo. Seu valor foi definido em 3,516mH no dimensionamento e quase que perfeitamente alcançado na montagem prática.

Então, definido o valor desejado no indutor, partiu-se para a projeção da placa do conversor para que a montagem da mesma fosse definida a partir dos componentes pré-definidos e do indutor já montado.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM CONVERSOR DO TIPO *BUCK* E ANÁLISE DE DADOS
EM RELAÇÃO A UM MODELO EM CONDIÇÕES IDEAIS.
Miguel Victor Ribeiro de Paiva, Thiago Amaral Melo Lima

Os componentes utilizados no protótipo de placa foram:

- Capacitores eletrolíticos (B41821F6108): para dar característica de fonte de tensão na entrada e saída do conversor;
- Capacitores de polipropileno ($\mu 68$ K400): para filtrar ruídos em altas frequências;
- *MOSFET* (IRF2805): para o chaveamento do conversor;
- Diodo (UF4004): Necessário um diodo de preferência ultrarrápido;
- Dissipador de calor para o interruptor;
- Resistor: Foram usados 2 resistores, um resistor de $10k\Omega$ entre o *gate* e *source* do interruptor, e o resistor *SHUNT* com uma resistência de $0,22\Omega$, servindo como “sensor de tensão e corrente” no indutor.

Depois de definidos os componentes a serem utilizados, foi iniciado o dimensionamento do conversor *BUCK*, usando o *software MATHCAD*.

Foi iniciado então o dimensionamento do indutor, porém houve algumas divergências, por exemplo: era possível ter um melhor aproveitamento do núcleo do indutor, foi observado que a indutância estava muito baixa, bem como alguns valores no indutor que precisavam de alguns ajustes. A corrente de saída tinha que ser reduzida para dar uma margem de segurança, devido ao limite de operação dos componentes, então manteve-se a potência constante e aumentou-se a tensão de saída de 10V para 15V, desta forma diminuiu-se a corrente na saída, com isso além de assegurar que os componentes operassem dentro de seus limites, conseguiu-se um acréscimo na indutância, melhorando tanto a variação de tensão na saída como um melhor aproveitamento do indutor. Ao fim, chegou-se à conclusão que o conversor estava bem dimensionado dentro dos limites aceitáveis e que agora seria necessário ajustar o indutor ao projeto do conversor.

Seguindo com o projeto, foi reduzida a densidade de corrente “J” para uma operação mais confiável, porém ainda era possível ajustar mais alguns parâmetros, como por exemplo, a densidade de fluxo magnético “B”, reduzindo as perdas por histerese, e por fim chegando a um ajuste final do projeto.

Logo após o dimensionamento, os parâmetros obtidos foram simulados no *software PSIM* para que fossem comparados os valores obtidos em simulação com o que foi calculado. Ao final, foi verificado que os valores obtidos em simulação corresponderam aos valores calculados com ótima precisão.

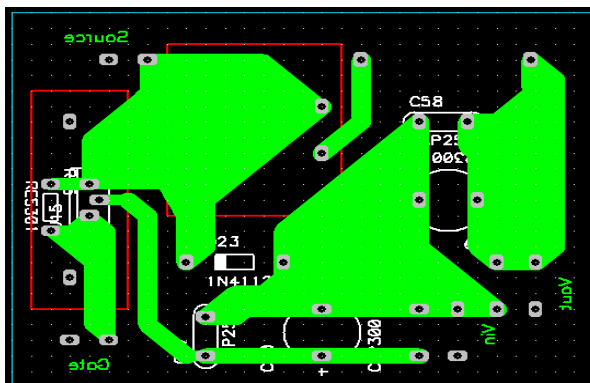
Em seguida é efetuada a etapa de elaboração do *layout* da placa eletrônica, utilizando para este fim o *software PCAD*.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM CONVERSOR DO TIPO *BUCK* E ANÁLISE DE DADOS
EM RELAÇÃO A UM MODELO EM CONDIÇÕES IDEAIS.
Miguel Victor Ribeiro de Paiva, Thiago Amaral Melo Lima

Figura 8: *Layout* da placa no software *P-CAD*.



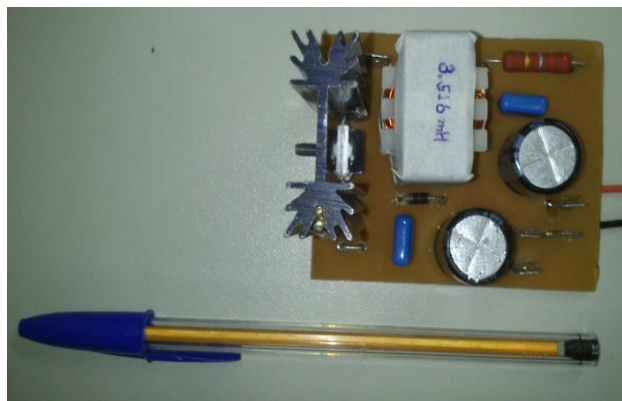
Fonte: Elaboração dos autores (2021).

Posteriormente foi executada a confecção física da placa de circuito impresso, de modo manual, descrita abaixo em 8 passos:

- Delimitação de tamanho da placa;
- Lixamento;
- Lavagem;
- Impressão;
- Corrosão;
- Lavagem;
- Perfuração;
- Envernizamento.

Logo após foi efetuada a soldagem dos componentes na placa. Abaixo temos a imagem da placa do conversor com os componentes prontamente soldados.

Figura 9: Placa de circuito montada.



Fonte: Elaboração dos autores (2021).



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM CONVERSOR DO TIPO *BUCK* E ANÁLISE DE DADOS
EM RELAÇÃO A UM MODELO EM CONDIÇÕES IDEAIS.
Miguel Victor Ribeiro de Paiva, Thiago Amaral Melo Lima

Assim iniciou-se o teste do conversor em laboratório, verificando as formas de ondas e comparando com as obtidas em simulação. Todo processo foi feito com os equipamentos disponíveis, como descrito anteriormente: osciloscópio, fonte e gerador de funções.

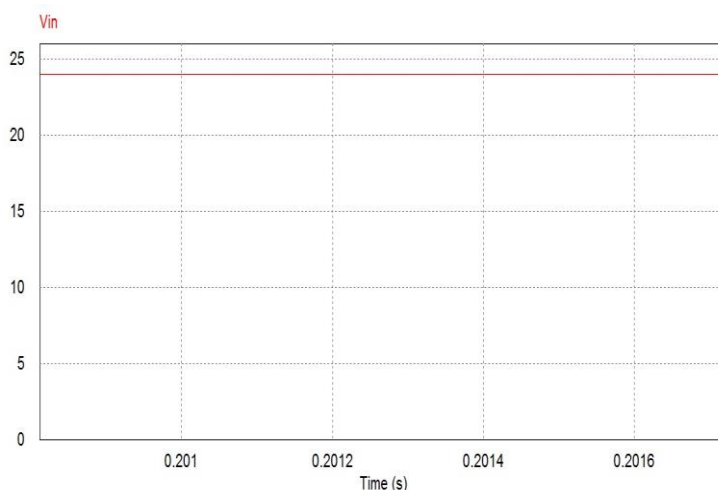
Como último passo, foram feitos ajustes dos dispositivos antes das medições. Primeiro ajustou-se à fonte para que solicitasse à placa uma corrente acima da corrente de entrada para maior segurança, no caso 0,5A com a tensão de entrada definida em 24V. A razão cíclica precisou ser ajustada no gerador de função com o auxílio do osciloscópio e a sua frequência foi ajustada com uma chave de ajuste. O osciloscópio também recebeu algumas modificações antes de testar as formas de onda, como exemplo, sua linguagem foi mudada para Inglês e a sua escala foi mudada para ser compatível com a ponteira, que apresentava uma escala de 10x. Depois de todos os ajustes e configurações, a placa finalmente seguiu para a etapa de teste.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta etapa do projeto é mostrado as formas de onda obtidas pela simulação do conversor feita no *software PSIM* e depois é feita a comparação com as formas obtidas no osciloscópio. Esta prática foi feita em laboratório com uma resistência na saída um pouco acima do valor dimensionado para o conversor, em torno de 30Ω , enquanto a resistência dimensionada tinha valor de $22,5\Omega$.

A forma de onda da tensão de entrada simulada no *software* demonstrou o valor desejado no projeto de 24V. Este valor, como foi definido no projeto, é a tensão de alimentação do conversor e está perfeitamente definido na simulação.

Figura 10: Forma de onda da tensão de entrada com simulador.



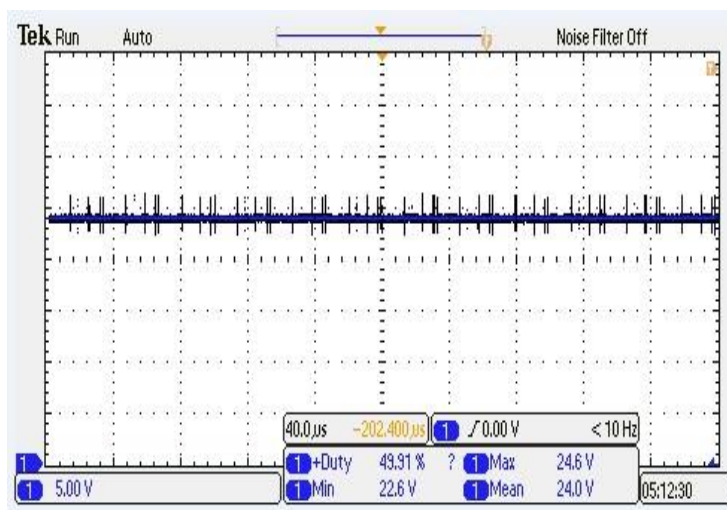
Fonte: Elaboração dos autores (2021).



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM CONVERSOR DO TIPO *BUCK* E ANÁLISE DE DADOS
EM RELAÇÃO A UM MODELO EM CONDIÇÕES IDEAIS.
Miguel Victor Ribeiro de Paiva, Thiago Amaral Melo Lima

Figura 11: Forma de onda da tensão de entrada com osciloscópio.

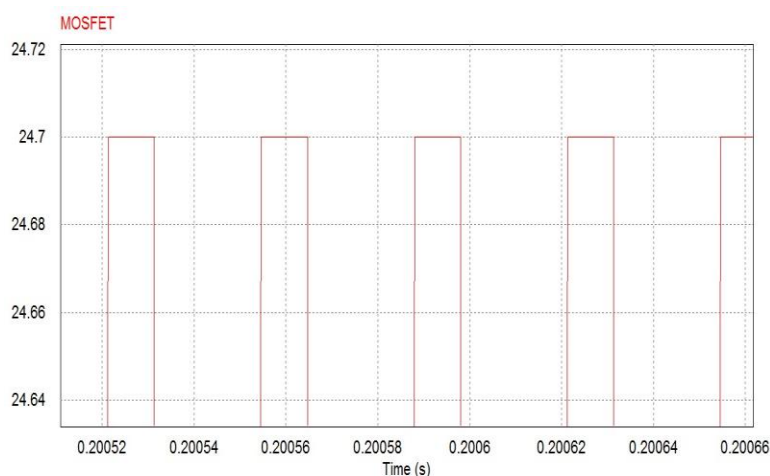


Fonte: Elaboração dos autores (2021).

A tensão de entrada mostrou um valor médio de 24V como projetado, mas devido fatores como a instabilidade da fonte, encontrou-se uma variação na entrada que foi um dos fatores que afetou diretamente na variação da tensão de saída do conversor.

Foi verificado na simulação que a tensão no *MOSFET Dreno-Source* foi um pouco maior que a tensão de entrada, isso ocorre devido à capacitância interna do mesmo, fazendo com que tenha um acréscimo de tensão, mesmo inserindo a resistência intrínseca ainda há um ganho de 0,7V.

Figura 12: Ganho de tensão no *MOSFET* com simulador.



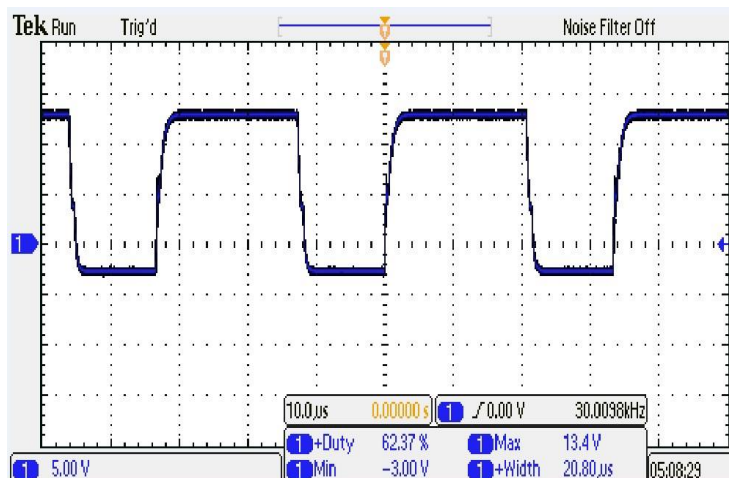
Fonte: Elaboração dos autores (2021).



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM CONVERSOR DO TIPO *BUCK* E ANÁLISE DE DADOS
EM RELAÇÃO A UM MODELO EM CONDIÇÕES IDEAIS.
Miguel Victor Ribeiro de Paiva, Thiago Amaral Melo Lima

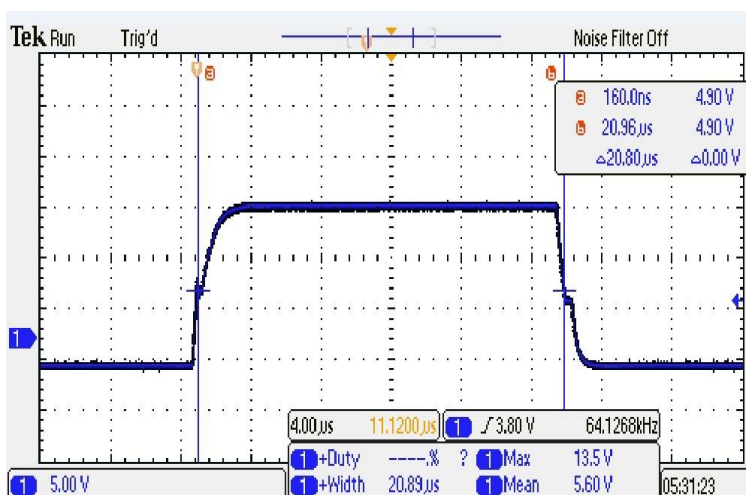
Figura 13: Ganho de tensão no *MOSFET* com osciloscópio.



Fonte: Elaboração dos autores (2021).

Forma de onda gerada pelo *MOSFET*. Tensão *Gate-Source* no *MOSFET* com carga na saída. Aqui observa-se a presença do efeito Miller, esse efeito é causado devido não só o *Gate* e o *Source* possuem tensão, as outras pontas também possuem e isso pode causar um aumento de corrente na capacitância G-S, para corrigir esse efeito utiliza-se um resistor para desviar a corrente.

Figura 14: Ganho de tensão no *MOSFET* com osciloscópio e cursores.



Fonte: Elaboração dos autores (2021).

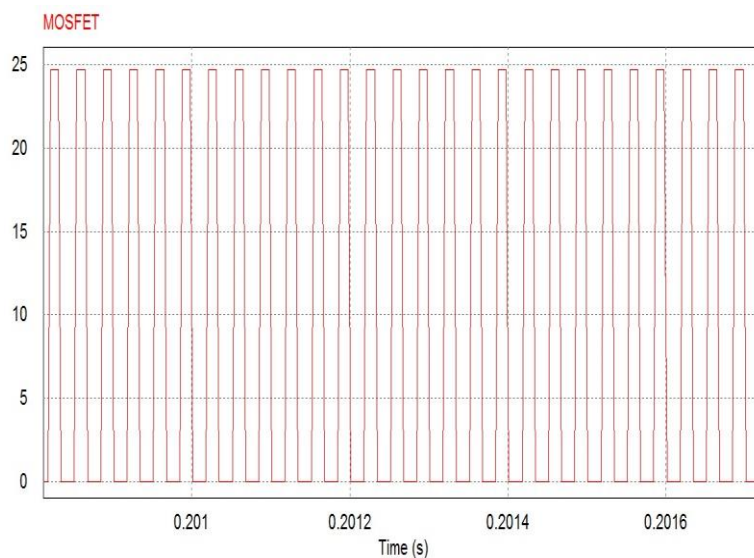
Tensão no *MOSFET* com carga na saída observada com auxílio dos cursores. Aqui observa-se a presença do efeito Miller com mais clareza, seriam basicamente encontrados nos pontos de acionamento e desligamento do *MOSFET*.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

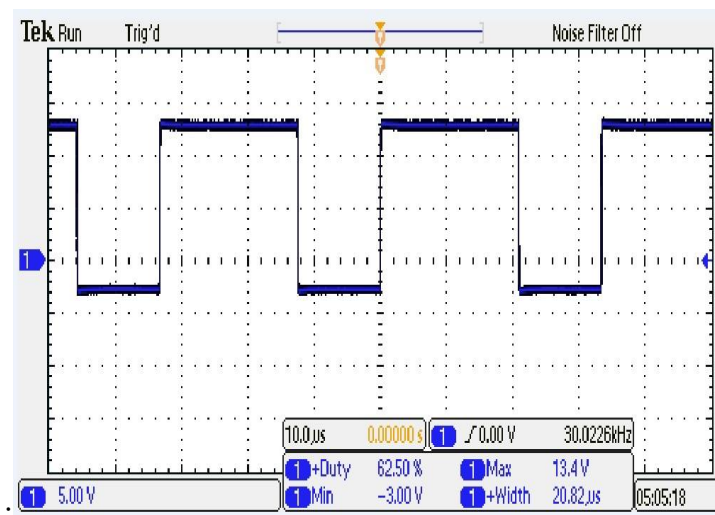
PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM CONVERSOR DO TIPO *BUCK* E ANÁLISE DE DADOS
EM RELAÇÃO A UM MODELO EM CONDIÇÕES IDEAIS.
Miguel Victor Ribeiro de Paiva, Thiago Amaral Melo Lima

Figura 15: Tensão no *MOSFET* com simulador.



Fonte: Elaboração dos autores (2021).

Figura 16: Tensão no *MOSFET* com osciloscópio.



Fonte: Elaboração dos autores (2021).



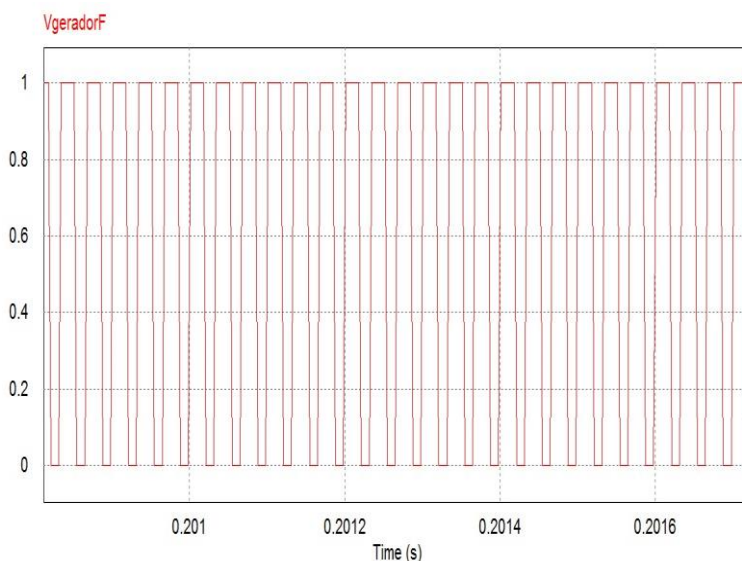
RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM CONVERSOR DO TIPO *BUCK* E ANÁLISE DE DADOS
EM RELAÇÃO A UM MODELO EM CONDIÇÕES IDEAIS.
Miguel Victor Ribeiro de Paiva, Thiago Amaral Melo Lima

Tensão no *Gate-Source* do *MOSFET* com carga ligada na saída, mas sem alimentação. Observa-se aqui que não mais vemos o efeito Miller devido à falta de alimentação na entrada.

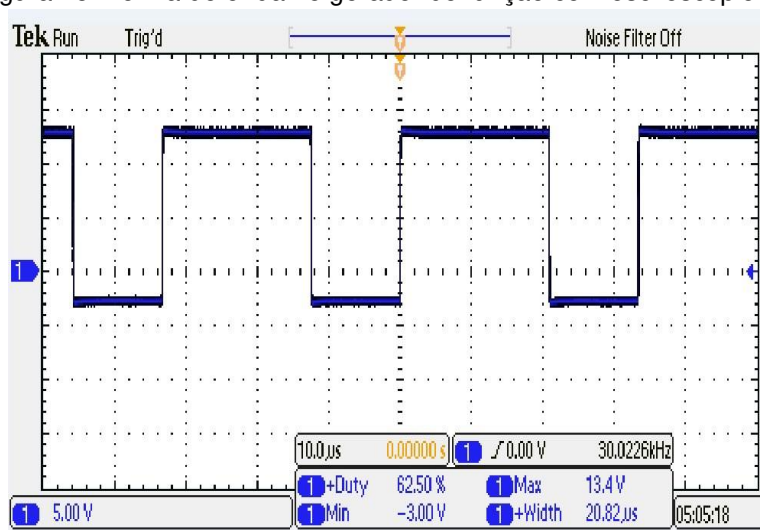
No simulador, por ser ideal, foi colocada uma tensão de 1V apenas para desligar e ligar o drive que aciona o *MOSFET*, porém o *MOSFET* IRF2805 entra na região de saturação com 4V, então foi aplicada uma tensão de 10V a -1V (no simulador), este pico negativo serve para garantir que o diodo desligue.

Figura 17: Forma de onda no gerador de função com simulador.



Fonte: Elaboração dos autores (2021).

Figura 18: Forma de onda no gerador de função com osciloscópio.



Fonte: Elaboração dos autores (2021).



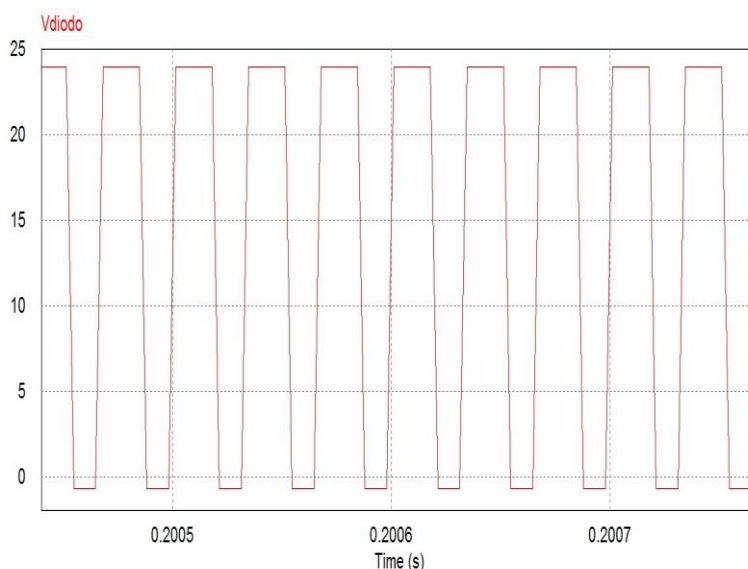
RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM CONVERSOR DO TIPO *BUCK* E ANÁLISE DE DADOS
EM RELAÇÃO A UM MODELO EM CONDIÇÕES IDEAIS.
Miguel Victor Ribeiro de Paiva, Thiago Amaral Melo Lima

No osciloscópio foi colocada uma tensão de 1V apenas para desligar e ligar o drive que aciona o MOSFET, como o *MOSFET* IRF2805 entra na região de saturação com 4V, então foi aplicado uma tensão de 13,4V a -3V, este pico negativo serve para garantir que o diodo desligue sem gerar qualquer erro nos valores da saída do conversor.

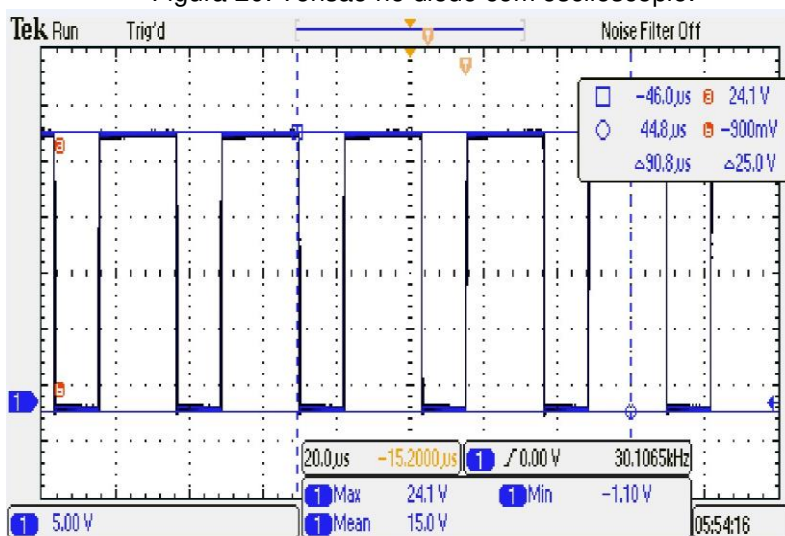
Observa-se que há um tempo para que o diodo fique totalmente desligado, no caso do diodo UF4004, que foi utilizado no protótipo, tem um tempo de recuperação reversa máxima de 50ns especificado no datasheet.

Figura 19: Tensão no diodo com simulador.



Fonte: Elaboração dos autores (2021).

Figura 20: Tensão no diodo com osciloscópio.



Fonte: Elaboração dos autores (2021).

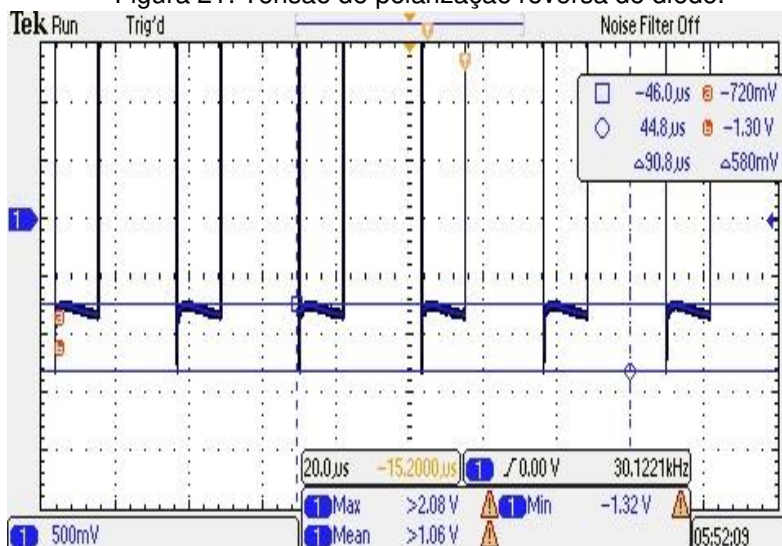


RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM CONVERSOR DO TIPO *BUCK* E ANÁLISE DE DADOS
EM RELAÇÃO A UM MODELO EM CONDIÇÕES IDEAIS.
Miguel Victor Ribeiro de Paiva, Thiago Amaral Melo Lima

O valor de tensão no diodo se equiparou com o dimensionado no simulador, elevando-se de uma tensão de recuperação reversa negativa até alcançar a tensão da fonte quando o mesmo estiver desligado.

Figura 21: Tensão de polarização reversa do diodo.



Fonte: Elaboração dos autores (2021).

Neste gráfico do osciloscópio, vemos nitidamente o tempo de recuperação reversa do diodo.

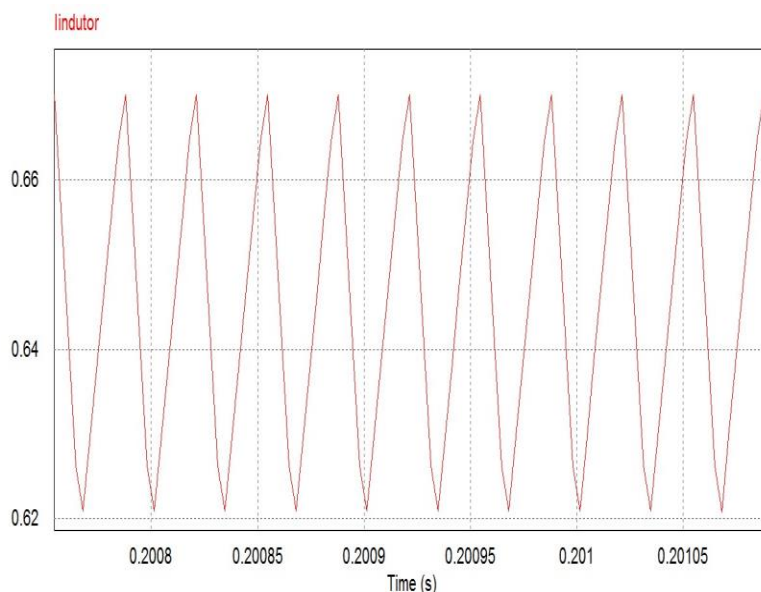
Foi verificado na simulação que os resultados obtidos no dimensionamento coincidiram com os valores calculados dando ainda uma pequena margem de segurança na variação da corrente no indutor e mostrando que ele está trabalhando no modo de condução contínua.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

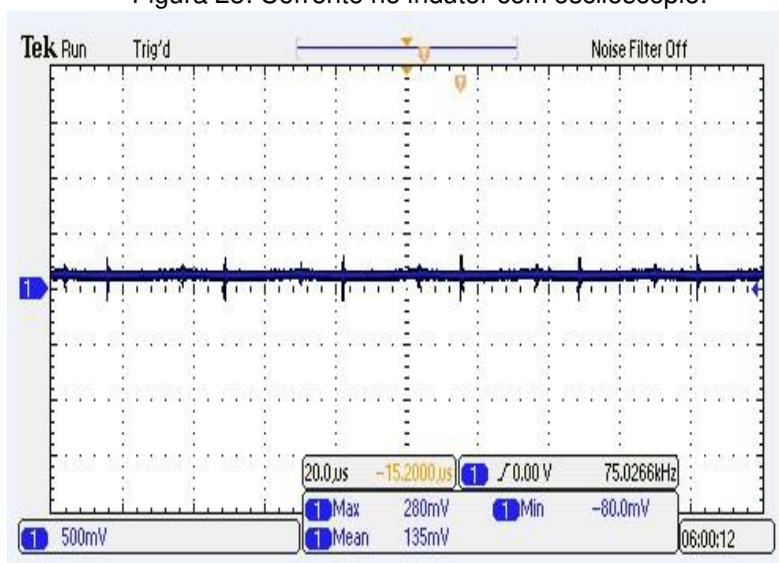
PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM CONVERSOR DO TIPO *BUCK* E ANÁLISE DE DADOS
EM RELAÇÃO A UM MODELO EM CONDIÇÕES IDEAIS.
Miguel Victor Ribeiro de Paiva, Thiago Amaral Melo Lima

Figura 22: Corrente no indutor com simulador.



Fonte: Elaboração dos autores (2021).

Figura 23: Corrente no indutor com osciloscópio.



Fonte: Elaboração dos autores (2021).

Nesta forma de onda, os valores no *shunt* coincidem com a corrente no indutor indicando que ele está mesmo operando no modo de condução contínua, mesmo apresentando alguns ruídos devido à ressonância do indutor ou mesmo pela descarga e recarga do indutor e capacitor do circuito.

Foi comprovado em simulação que a variação da tensão de saída está bem próxima, porém menor que o valor dimensionado, nos dando uma margem de segurança e mostrando que os parâmetros estão de acordo com o dimensionamento. Percebe-se que a tensão de saída simulada se

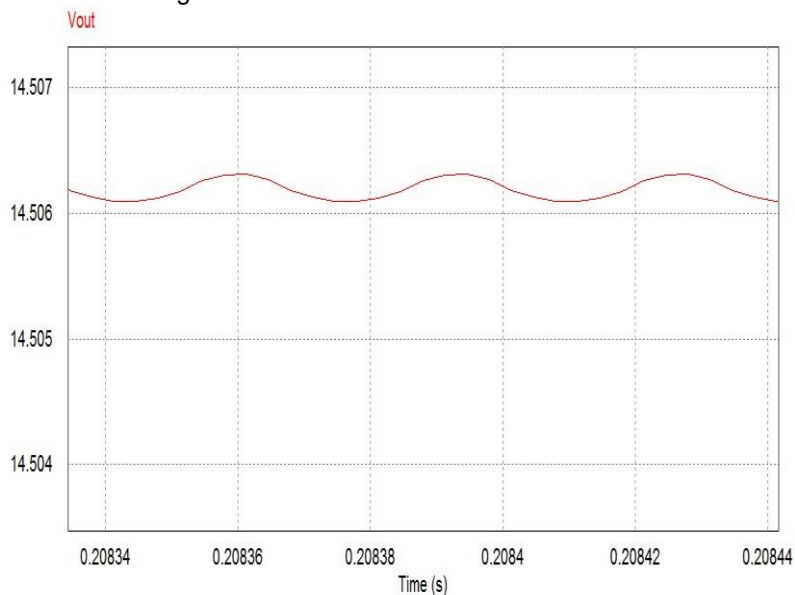


RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM CONVERSOR DO TIPO *BUCK* E ANÁLISE DE DADOS
EM RELAÇÃO A UM MODELO EM CONDIÇÕES IDEAIS.
Miguel Victor Ribeiro de Paiva, Thiago Amaral Melo Lima

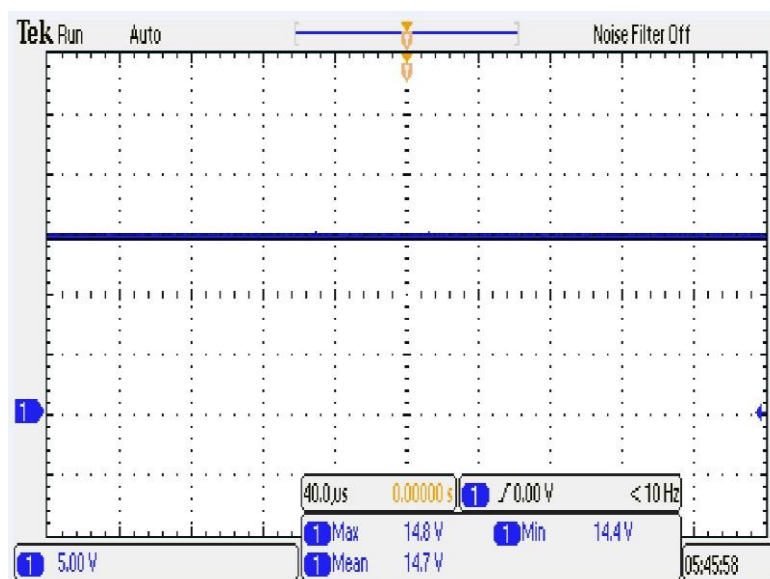
encontra um pouco a baixo dos 15V especificados, isso deu-se porque na própria simulação foram consideradas as perdas no circuito, ou seja, configurou-se mais para o real do que para o ideal.

Figura 24: Tensão de saída com simulador.



Fonte: Elaboração dos autores (2021).

Figura 25: Tensão de saída com osciloscópio.



Fonte: Elaboração dos autores (2021).



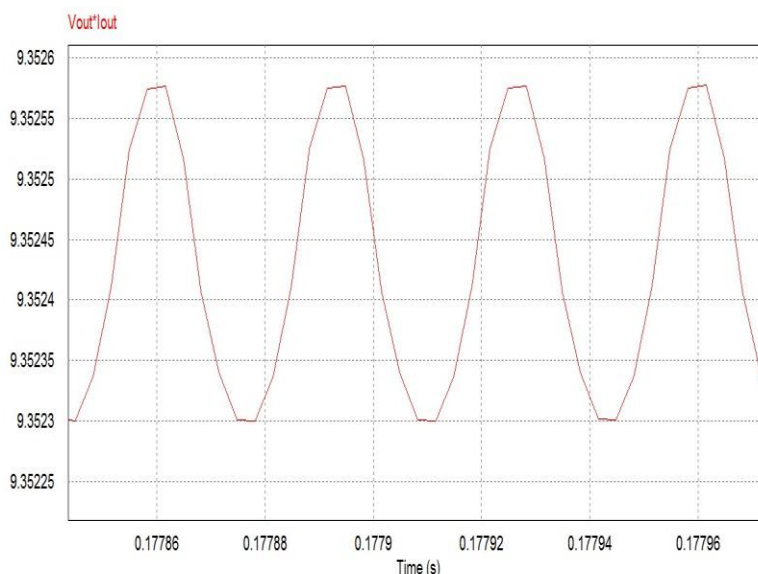
RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM CONVERSOR DO TIPO *BUCK* E ANÁLISE DE DADOS
EM RELAÇÃO A UM MODELO EM CONDIÇÕES IDEAIS.
Miguel Victor Ribeiro de Paiva, Thiago Amaral Melo Lima

O valor de saída equiparou-se ao dimensionado no simulador com pequena variação. Essa pequena variação pode ter sido causada ou pela variação da tensão de entrada, perdas do circuito, à instabilidade da fonte ou devido os dispositivos dimensionados não possuírem características perfeitas por serem dispositivos de sucata e que podem agregar erros no conversor.

A potência de saída deu abaixo do valor parametrizado para o conversor, devido às perdas no circuito, também inseridas na simulação.

Figura 26: Potência de saída – simulador *PSIM*.



Fonte: Elaboração dos autores (2021).

Como não é possível encontrar uma forma de onda para potência no osciloscópio utilizado, devido suas limitações, é demonstrado neste trabalho somente a forma de onda da potência de saída na simulação do *software PSIM*.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a presente pesquisa, observamos uma pequena variação na tensão de saída, diferindo dos resultados anteriormente simulados. Com um estudo mais detalhado pode-se chegar à conclusão que essa variação se dá por conta das tolerâncias dos componentes utilizados, da reutilização dos mesmos de placas sucateadas, além da forma de ajuste dos equipamentos de controle e medição, fato que nos mostra uma quantidade de erros acumulados.

Outro ponto importante a ser observado é a própria característica construtiva do indutor, pois como este é usado para fins didáticos, o mesmo não passa pelo processo de colagem o que ocasiona, com o tempo, uma variação do *gap*, o que influencia diretamente nas medições finais.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM CONVERSOR DO TIPO *BUCK* E ANÁLISE DE DADOS
EM RELAÇÃO A UM MODELO EM CONDIÇÕES IDEAIS.
Miguel Victor Ribeiro de Paiva, Thiago Amaral Melo Lima

Para trabalhos futuros, uma melhor solução para se obter dados mais precisos em relação às simulações, seria dimensionar dispositivos mais confiáveis e projetar um indutor com entreferro pré-dimensionado de fábrica, assim seriam obtidos resultados mais significativos e mais corretos, eliminando erros nos resultados finais.

Uma nova proposta seria trabalhar na execução de outros conversores de potência, por exemplo os modelos *Boost* ou *Buck-Boost* e projetar os mesmos em situações reais com pequenos sistemas de potência em laboratório ou fora dele.

REFERÊNCIAS

AHMED, A. **Eletrônica de Potência**. São Paulo: Editora afiliada ABDR, Pearson Prentice Hall, 2000. 240 p.

BARBI, I. **Eletrônica de Potência**. 5. ed. Florianópolis: Edição do Autor, 2005. 328 p.

BOYLESTAD, R.; NASHELSKY, L. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1999. 646 p.

HART, D. W. **Eletrônica de Potência – Análise e Projetos de Circuitos**. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2011. 496 p.

POMILIO, J. A. **EE833 Eletrônica de Potência**. 2018. 18 p. Disciplina (Disciplina de Graduação em Eletrônica de Potência) - Departamento de Sistemas e Energia, Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, Fevereiro de 2018.

RASHID, M. H. **Eletrônica de Potência: Circuitos, Dispositivos e Aplicações**. São Paulo: Makron Books do Brasil Editora Ltda, 1999. 821 p.

SÁ JR., E. M. **Planilha para Dimensionamento de Indutores**. Sobral: Instituto Federal do Ceará – IFCE, 2013.

SÁ JR., E. M.; LIMA, R. M. S. **Confecção de Placas de Circuito Impresso por Transferência Térmica e Soldagem dos Componentes**. Sobral: Instituto Federal do Ceará – IFCE, 2011.

WIKIPEDIA. **Thyatron**. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Thyatron>. Acesso em: 26 maio 2020.