

Implementação do Projeto Conversor Buck

Carla Wosniak, Emanuel Cristian de Cesaro, João Gabriel Bortot Cadore, Welliton J. Leal Babinski

Resumo - Este artigo é referente ao projeto proposto na disciplina de sistemas de controle 2, e tem como objetivo apresentar o desenvolvimento teórico e prático de um circuito conversor Buck usando o controle proporcional integral (PI).

Palavras chave - Conversor Buck, controlador PI, instrumentação, PWM, sistemas de controle.

I. INTRODUÇÃO

UM conversor Buck consiste em um gerador de pulsos e um filtro passivo. Ambos se combinam para converter uma tensão de entrada CC¹ aplicada em uma tensão CC de saída com um valor inferior. A técnica de usar uma fonte de impulso e um filtro LC² na saída permite a transferência de energia com alta eficiência. Ou seja, pouca energia é dissipada do próprio conversor. Para regular a tensão de saída, uma fonte de tensão e um amplificador de erro são adicionados ao circuito. A figura 1 apresenta o diagrama de blocos do sistema de um conversor Buck, onde estão os três elementos, gerador de pulso, filtro de saída e o amplificador, que se somam para formar um conversor CC-CC completo [1].

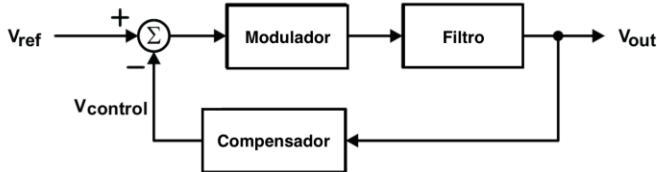


Fig. 1. Diagrama de blocos de um conversor Buck [1].

A figura 2 trás o esquemático do circuito de um conversor Buck que associa um filtro passa-baixa e posteriormente um comutador. O diodo fornece um caminho para a corrente do indutor quando a chave é aberta e é polarizado reversamente quando a chave está fechada [2].

Entre as vantagens do uso de um conversor Buck estão a boa imunidade a ruído, máxima flexibilidade na escolha de valores de indutor e tipos de capacitores, garantia de estabilidade do sistema, elevado ganho em baixas frequências e garantia de margem de fase [3].

A partir desse embasamento teórico, este artigo apresenta o projeto e construção de um conversor Buck.

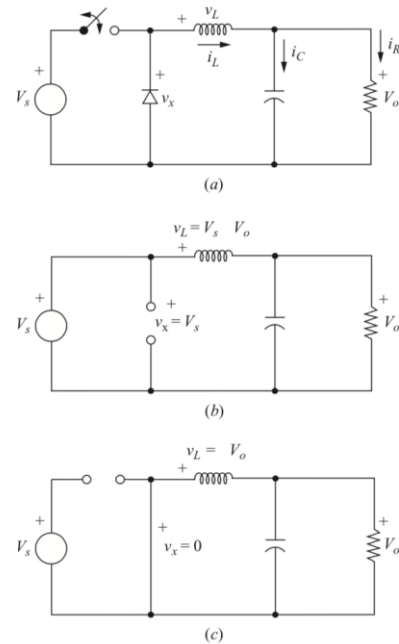


Fig. 2. (a) Circuito conversor Buck; (b) Circuito equivalente para o comutador fechado; (c) Circuito equivalente para o comutador aberto [2].

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico serão apresentados a modelagem do conversor Buck, os resultados da simulação e a lista de componentes necessários para montagem do circuito do conversor.

A. Modelagem do Conversor Buck

Para a modelagem do conversor Buck usou-se como base o desenvolvimento matemático de HART, 2010.

Analisando a figura 2(a) e considerando um filtro passa-baixa ideal, a tensão de saída é a média da tensão de entrada para o filtro. Para a situação do comutador estar fechada (figura 2(b)), a entrada do filtro v_x é igual V_s , quando o comutador está aberto $v_x = 0$.

Se o comutador está sendo fechado periodicamente, então o *duty cycle* D é adicionado a tensão média de entrada, sendo representada por $V_s D$.

Para a análise, supõe-se que o diodo permanece polarizado diretamente durante o tempo que o comutador está aberto, implicando em uma corrente no indutor positiva, ou seja, corrente contínua. Em caso de corrente descontínua a corrente do indutor retorna para zero em cada período.

¹CC: Corrente Contínua.

²LC: Indutor e Capacitor

A segunda parte da análise do conversor Buck é examinar a tensão e a corrente no indutor. Esta análise é útil para projetar o filtro e realizar a análise dos circuitos posteriormente.

Os conversores Buck e os conversores CC-CC possuem as seguintes propriedades quando operam em regime permanente:

1. A corrente do indutor é periódica:

$$i_L(t + T) = i_L(t) \quad (1)$$
2. A tensão média do indutor é zero:

$$V_L = \frac{1}{T} \cdot \int V_L(\lambda) d\lambda = 0 \quad (2)$$
3. A corrente média no capacitor é zero:

$$I_c = \frac{1}{T} \cdot \int I_c(\lambda) d\lambda = 0 \quad (3)$$
4. A potência fornecida pela fonte é a mesma potência fornecida pela carga. Para componentes não ideais, a fonte também fornece perdas.

$$P_s = P_o \text{ (ideal)} \quad (4)$$

$$P_s = P_o + \text{perdas (não ideal)} \quad (5)$$

Para iniciar a análise do circuito conversor Buck da figura x, devemos assumir algumas afirmações:

1. O circuito está operando em estado estacionário.
2. A corrente do indutor é contínua e sempre positiva.
3. Considera-se que o capacitor possui um valor elevado, e a tensão de saída é mantida constante para V_0 .
4. O período de comutação é T , a chave está fechada para o tempo DT e aberta para o tempo $(1-D)T$.
5. Os componentes são considerados ideais.

Primeiramente a análise será feita considerando o circuito com a chave fechada (figura 2(b)) e depois para o circuito com a chave aberta (figura 2(c)).

• Análise para a chave fechada

Quando a chave está fechada no circuito Buck (figura 2(b)) o díodo é polarizado inversamente, e a tensão no indutor é:

$$V_L = V_s - V_0 = L \cdot \left(\frac{dI_L}{dt} \right) \quad (6)$$

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_s - V_0}{L} \quad (7)$$

A derivada da corrente é uma constante positiva, a mesma aumenta linearmente. A variação da corrente no indutor é apresentada pelo modelo matemático a seguir:

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{\Delta I_L}{DT} = \frac{V_s - V_0}{L} \quad (8)$$

$$(\Delta I_L)_{\text{fechado}} = \left(\frac{V_s - V_0}{L} \right) DT \quad (9)$$

• Análise para a chave aberta

Quando a chave está aberta o díodo permanece polarizado diretamente, e a tensão no indutor é:

$$V_L = -V_0 = L \left(\frac{dI_L}{dt} \right) \quad (10)$$

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_0}{L} \quad (11)$$

A derivada da corrente no indutor é uma constante negativa,

e a corrente diminui como mostrado na figura 2(c). A mudança de corrente no indutor está demonstrada a seguir:

$$\frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{\Delta I_L}{(1-D)T} = -\frac{V_0}{L} \quad (12)$$

$$(\Delta I_L)_{\text{aberto}} = -\left(\frac{V_0}{L} \right) (1-D)T \quad (13)$$

A operação em estado estacionário requer que a corrente no indutor no final do ciclo de comutação seja a mesma que no começo, o que significa que a mudança na corrente do indutor ao longo do tempo seja zero.

$$(\Delta I_L)_{\text{fechado}} + (\Delta I_L)_{\text{aberto}} = 0 \quad (14)$$

Usando as equações para corrente no indutor fechado e aberto, temos:

$$\frac{V_s - V_0}{L} \cdot (DT) - \left(\frac{V_0}{L} \right) (1-D)T = 0 \quad (15)$$

$$V_0 = V_s D \quad (16)$$

O conversor Buck produz uma tensão de saída menor ou igual à entrada. Como a tensão média do indutor é zero para operação periódica.

$$V_L = (V_s - V_0)DT + (-V_0)(1-D)T = 0 \quad (17)$$

A corrente média do indutor deve ser a mesma corrente média na carga do resistor, desde que a corrente média do capacitor deve ser zero para a operação estável:

$$I_L = I_R = V_0/R \quad (18)$$

Desenvolvendo as equações da corrente no indutor máxima e mínima, temos:

$$\begin{aligned} I_{\text{máx}} &= I_L + \frac{\Delta I}{2} \\ &= \frac{V_0}{R} + \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{V_0}{L} \cdot (1-D)T \right] = V_0 \left(\frac{1}{R} + \frac{1-D}{2Lf} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} I_{\text{mín}} &= I_L - \frac{\Delta I_L}{2} \\ &= \frac{V_0}{R} - \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{V_0}{L} \cdot (1-D)T \right] = V_0 \left(\frac{1}{R} - \frac{1-D}{2Lf} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

A última equação encontrada pode ser usada para encontrar o valor do indutor e da frequência de chaveamento. Considerando $I_{\text{mín}} = 0$, encontramos as seguintes expressões matemáticas:

$$I_{\text{mín}} = 0 = V_0 \left(\frac{1}{R} - \frac{1-D}{2Lf} \right) \quad (21)$$

$$(Lf)_{\text{mín}} = (1-D)R/2 \quad (22)$$

$$L_{\text{mín}} = \frac{(1-D)R}{2f} \text{ para corrente contínua} \quad (23)$$

Onde L_{min} é o valor de indutância mínima para a corrente contínua, na prática este valor deve ser maior.

Para determinar o valor de indutância específica para um indutor pico a pico, associasse a equação de i_{min} com $V_o = V_s D$

$$\Delta I_L = \left(\frac{V_s - V_o}{L} \right) DT = (V_s - V_o) D = V_o \cdot \frac{1-D}{L f} \quad (24)$$

$$L = \left(\frac{V_s - V_o}{\Delta I_L f} \right) D = V_o \cdot \frac{1-D}{\Delta I_L f} \quad (25)$$

Considerando que os componentes do conversor são ideais, a potência da alimentação deve ser a mesma da potência absorvida pelo resistor de carga.

$$\begin{aligned} P_S &= P_o \\ V_S \cdot I_S &= V_o \cdot I_o \\ \frac{V_o}{V_S} &= \frac{I_S}{I_o} \end{aligned} \quad (26)$$

Para encontrar a corrente no capacitor a seguinte equivalência é considerada:

$$I_C = I_L - I_R \quad (27)$$

Onde a corrente no capacitor é positiva, enquanto o mesmo carrega. Pelas definições de capacitância:

$$\begin{aligned} Q &= C \cdot V_o \\ \Delta Q &= C \cdot \Delta V_o \\ \Delta V_o &= \frac{\Delta Q}{C} \end{aligned} \quad (28)$$

Considerando a variação de tensão na carga Q , temos:

$$\Delta V_o = T \cdot \Delta I_L / 8 \quad (29)$$

Usando a equação da variação de corrente no indutor, podemos chegar a uma expressão de ondulação como uma fração de tensão da saída.

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1-D}{8LCf^2} \quad (30)$$

Isolando o capacitor na equação encontramos a expressão para a capacitância necessária em termos de ondulação de tensão específica:

$$C = \frac{1-D}{8L \left(\frac{\Delta V_o}{V_o} \right) f^2} \quad (31)$$

B. Componentes do projeto

Com base na modelagem matemática apresentada para o conversor Buck, e usando os parâmetros para o projeto, calcula-se os valores para os componentes necessário para a implementação do circuito conversor Buck.

TABELA 1
PARÂMETROS DO PROJETO

Parâmetro	Valor
Tensão de entrada	24 Volts
Tensão de saída	12 Volts
Frequência de chaveamento	25 kHz
Potência de saída	20 W

Substituindo os valores da tabela 1 nas equações (25) e (31), encontra-se os valores para o indutor e capacitor do conversor Buck, que são respectivamente $L=1,152$ mH e $C=2,174$ µF.

C. Modulo do Controlador

Diferentes ações de controle existem e estão disponíveis ao projetista, com a finalidade de melhorar o desempenho e funcionamento do sistema a ser controlado. Cada tipo de ação tem como consequência a melhoria de determinada especificação, podendo ser: a velocidade da resposta transitória, reduzir o erro em regime permanente, diminuir porcentagem de ultrapassagem e alcançar a estabilidade, entre outras [4].

O sistema de controle é responsável por receber o sinal de erro que é provindo da comparação do sinal de referência com o sinal de tensão na carga do circuito Buck. Este sinal de erro é a entrada do circuito de controle, qual devido a sua topologia de construção gera um sinal que é utilizado para controlar o que se faz necessário, neste caso a tensão sobre a resistência.

A topologia de controle utilizada para o desenvolvimento do projeto é denominada de controle proporcional e integral, conhecido também como controlador PI. Este controlador possui duas ações sobre o sinal de erro, quais são a ação proporcional, que age de forma instantânea no sistema, qual gera um sinal diretamente proporcional ao erro, e a ação de controle integral, que como o próprio sugere, atua sobre a integral do erro, portanto sua ação no sistema não é imediata.

Os circuitos integral e proporcional foram implementados em paralelo para que os ganhos K_p e K_i fossem controlados de forma independente, o sinal de saída de ambos circuitos é somado através de um circuito somador.

• Ação Proporcional

O sinal de controle aplicado à planta é proporcional a amplitude do valor do sinal de erro. Esta ação pode ser usada para corrigir a resposta transitória ou o erro, não podendo efetuar as duas correções simultaneamente. Com o aumento de K_p , o erro tende a diminuir, porém não se anula. Um aumento expressivo no K_p pode ter como consequência a instabilidade e até mesmo a saturação do sistema, para esta aplicação foi utilizado um amplificador operacional inversor (fig. 3).

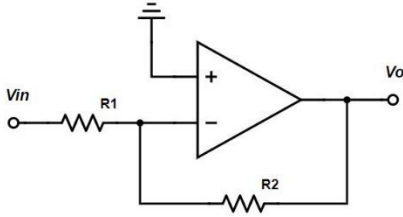


Fig. 3. Amplificador Operacional Inversor.

A tensão de saída é dada pela equação:

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_{in} \quad (32)$$

O ganho pode ser descrito pela equação:

$$A_v = K_p = \frac{R_2}{R_1} \quad (33)$$

Apesar de o resistor R2 escolhido tenha sido uma resistência variável, o ganho K_p foi mantido unitário, onde $R_2=R_1=10K\Omega$.

• Ação Integral

Tem como principal objetivo eliminar o erro em regime permanente. O efeito desta ação é pequeno no início, pois o erro acumulado é pequeno, contudo, seu efeito é crescente a medida que o sistema está perto do regime permanente. Esta ação não é normalmente utilizada isoladamente, uma vez que, sua resposta é lenta e oscilatória. Assim, seu uso é comum em conjunto a ação proporcional, para esta aplicação foi utilizado um amplificador operacional integrador prático (fig. 4).

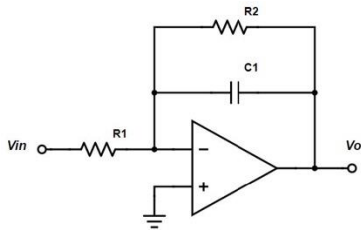


Figura 4: Amplificador Operacional Integrador Prático.

A tensão de saída é dada pela equação:

$$V_o = -\frac{1}{R_1 C_1} \int_0^t V_{in} dt \quad (34)$$

O ganho pode ser descrito pela equação:

$$A_v = K_i = \frac{R_2}{R_1} \quad (35)$$

Apesar de o resistor R2 escolhido tenha sido uma resistência variável, o ganho K_i foi mantido unitário, onde $R_2 = R_1 = 10K\Omega$, ou seja, nosso integrador representa um polo na origem.

D. Modulo de Acionamento

A modulação por largura de pulso, também conhecida como PWM (*Pulse Width Modulation*) é a base para o controle da eletrônica de potência. Um dos tipos de PWM consiste em

chavear cargas variando a tensão média inserida sobre esta, sem modificar a frequência em que ocorre o chaveamento [5].

A modulação por PWM controla o ciclo de trabalho, isto é, o tempo em que a chave entregue a máxima potência para a carga em um período de operação da comutação da chave. O uso de modulação por PWM possui grandes vantagens em relação a utilização de recursos que envolvem resistores pois o uso de chaves como o MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) reduzem as perdas consideravelmente, pois a queda de tensão nas mesmas é muito baixa. Há exemplo pode-se considerar uma chave e uma fonte de corrente contínua conectadas a uma carga resistiva genérica.

O PWM foi gerado através de um circuito integrado SG3524 onde tinha seu pino 09 como entrada da tensão de saída do controlador PI para controlar a razão cíclica (*duty cycle*) do sinal PWM. Variando a tensão no pino 9 de 0 V até 3,5 V a razão cíclica varia de 0% a 100%. A Frequência do sinal PWM foi projetada para ser de 25Khz, para isso foi utilizado a relação do resistor de 4,7K Ω e o capacitor de 10nF respectivamente nos pinos 6 e 7 do SG352.

O MOSFET a ser acionado, operando como chave digital utilizado foi o IRF640N para controle da potência entregue na carga do circuito Buck. O circuito de *driver* utilizado foi um *totem-pole* com 2 Transístores BD135 e BD136.

E. Instrumentação

O amplificador diferencial, também conhecido como subtrator, pode ser aprimorado para aplicações de instrumentação dando origem ao nome de amplificador de instrumentação, nesta configuração a tensão de saída é a diferença entre as tensões aplicadas à entrada, multiplicada pelo ganho do amplificador (fig. 5).

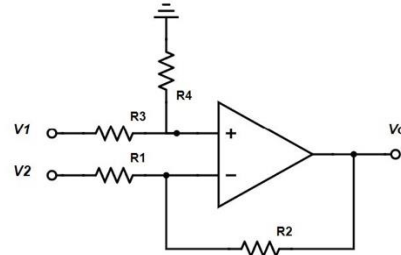


Figura 5: Amplificador Operacional Subtrator.

E a tensão de saída pode ser representada pela equação:

$$V_o = V_1 \frac{R_4(R_1 + R_2)}{R_1(R_1 + R_2)} - V_2 \frac{R_2}{R_1} \quad (36)$$

Qual para $R_1 = R_3$ e $R_2 = R_4$:

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} \cdot (V_1 - V_2) \quad (37)$$

O ganho pode ser descrito pela equação:

$$A_v = \frac{R_2}{R_1} \quad (38)$$

O ganho foi mantido unitário, e os quatro resistores tem o valor de $10\text{k}\Omega$.

Os amplificadores de instrumentação são grandes aliados conseguindo agregar características como elevado *CMR*, elevada impedância nas entradas e baixo *offset*.

Na instrumentação foram utilizados dois circuitos subtratores, o primeiro realizava a diferença entre as tensões dos dois extremos da resistência de carga do circuito buck, ou seja, $V_{out} - V_{ref}(\text{ground})$, outra característica do mesmo é o seu ganho de 0,5 por segurança para o amplificador operacional não alcançar com facilidade sua tensão de saturação já que a saída do circuito Buck pode ultrapassar a mesma, já o segundo realiza a diferença entre a saída do subtrator anterior com uma referência de tensão pré-determinada a qual foi definida como a metade da saída desejada na carga devido a operação realizada no subtrator anterior, essa tensão de referência é variável de acordo com a saída desejada, ou seja, 6V representa uma tensão de 12V na carga e assim por diante.

Após as duas operações nos subtratores, a tensão de saída restante é o erro o qual é levado adiante para o circuito controlador PI trata-lo e corrigi-lo, idealmente o levando sempre para zero.

F. Lista de Componentes

Conforme os cálculos e atribuições realizados anteriormente determina-se os componentes necessários para a implementação prática:

- **Buck:** 1 indutor de 1,2 mH, 1 capacitor de 2,2 μF , 1 capacitor de 220 μF , 1 diodo MUR460, 1 resistor de potência 15Ω 20W e 1 MOSFET IRF640N
- **Módulo de controle:** 2 TL084CN, 4 resistores de 1 $\text{k}\Omega$, 4 resistores de 10 $\text{k}\Omega$, 1 capacitor de 6,8 nF, 2 trimpots de 100 $\text{k}\Omega$.
- **Módulo de acionamento:** 1 SG3524N, 1 MOSFET IRF640N, 2 resistores de 4,7 $\text{k}\Omega$, 1 resistor de 1,5 $\text{k}\Omega$, 1 resistor de 68 $\text{k}\Omega$, 1 resistor de 22 $\text{k}\Omega$, 1 capacitor de 10 nF, 1 diodo 1N4148, 2 transistores BD135 e BD136.
- **Instrumentação:** 1 TL084CN, 6 resistores de 10 $\text{k}\Omega$ e 2 resistores de 22 $\text{k}\Omega$.

G. Validação do Projeto – Simulação

Antes da implementação prática a etapa de simulação foi implementada utilizando o *software* PSIM (fig. 6), onde foi realizada a validação dos circuitos projetados anteriormente.

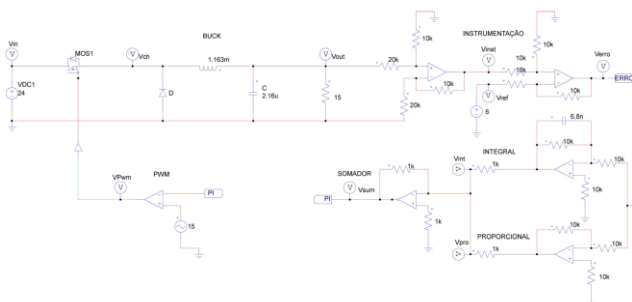


Figura 6: Implementação do projeto do conversor Buck no *software* PSIM.

Através da simulação do circuito da figura 6, obtemos os resultados da para a modulação do PWM (fig. 7), tensão de saída do conversor Buck em malha fechada (fig. 8), comparação da tensão da instrumentação e referência (fig. 9) e a tensão de entrada e saída do controlador PI (fig. 10).

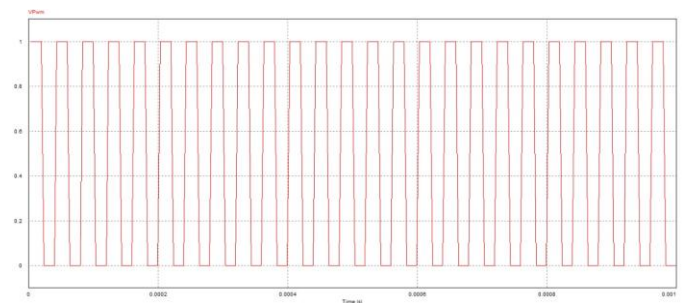


Figura 7: Simulação do pulso de chaveamento do PWM no *software* PSIM.

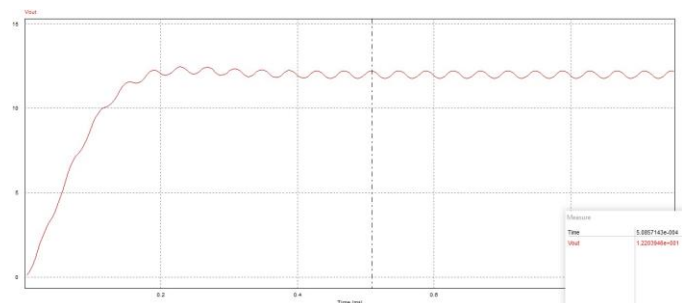


Figura 8: Tensão de saída do conversor Buck em malha fechada no *software* PSIM.

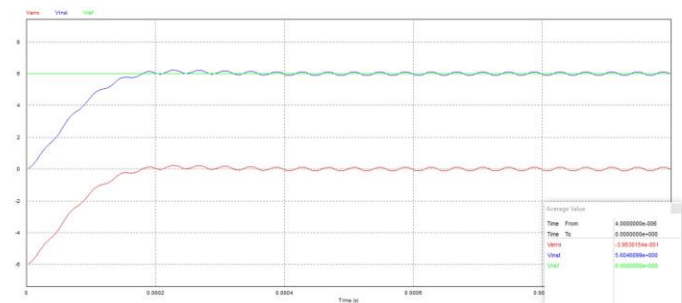


Figura 9: Comparação da tensão do circuito de instrumentação (azul) com a referência (verde), e erro do sistema (vermelho) no *software* PSIM.

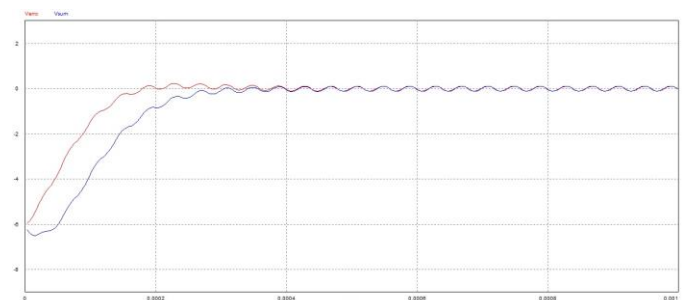


Figura 10: Tensão de entrada (vermelho) e tensão de saída (azul) do controlador PI no *software* PSIM.

As respostas obtidas na simulação foram satisfatórias para prosseguirmos para a etapa de implementação prática do circuito conversor Buck.

III. IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA

Nesta etapa foi implementado na prática o projeto do circuito conversor Buck. Os circuitos foram montados separadamente e testados, para posteriormente o projeto completo ser testado e validado.

O primeiro módulo a ser testado foi o do acionamento, posteriormente foram implementados o módulo de controle e instrumentação e por fim o conversor Buck.

Os circuitos implementados utilizaram os componentes descritos no item *F* dos Materiais e Métodos. Para o acionamento foram utilizadas duas fontes assimétricas, a primeira ajustada com valores de tensão -12V e +12V para alimentação dos circuitos integrados, e a segunda regulada com 6V para a referência (com a possibilidade de variação), e com 24V para alimentar o conversor Buck.

As figuras 11 e 12 apresentam a implementação do projeto prático.

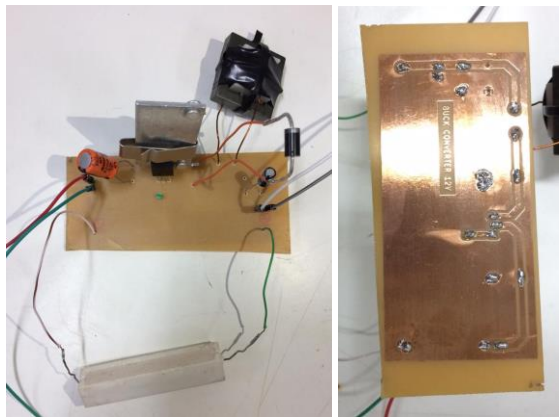


Figura 11: Implementação prática do conversor Buck.

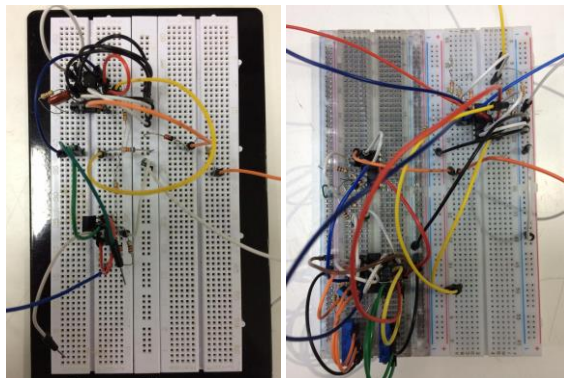


Figura 12: A esquerda os circuitos do PWM e Driver (Totem-pole), e a direita o circuito de instrumentação, controlador PI e somador.

IV. RESULTADOS

Neste tópico estão apresentados os resultados obtidos durante o funcionamento do circuito conversor Buck. As imagens apresentadas a seguir foram obtidas utilizando o osciloscópio digital de dois canais da marca Tektronix.

Primeiro observamos o funcionamento do PWM e Driver

(Totem-pole), variando o *duty cycle* em 20% (fig. 13), 50% (fig. 14), 80% (fig. 15).

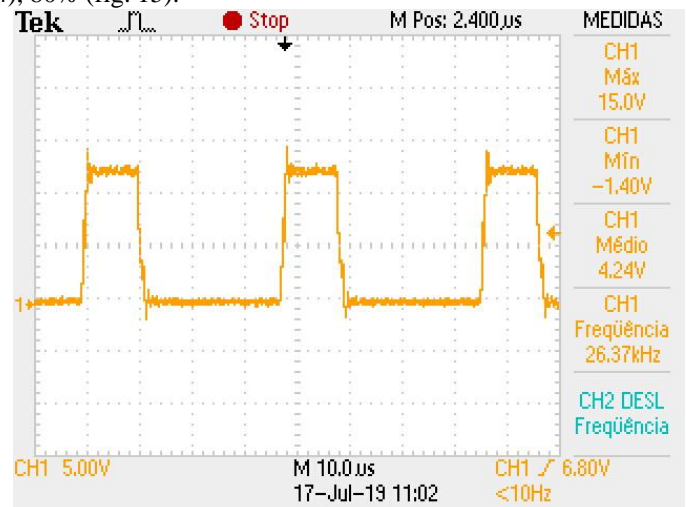


Figura 13: PWM com 20% de *duty cycle*.

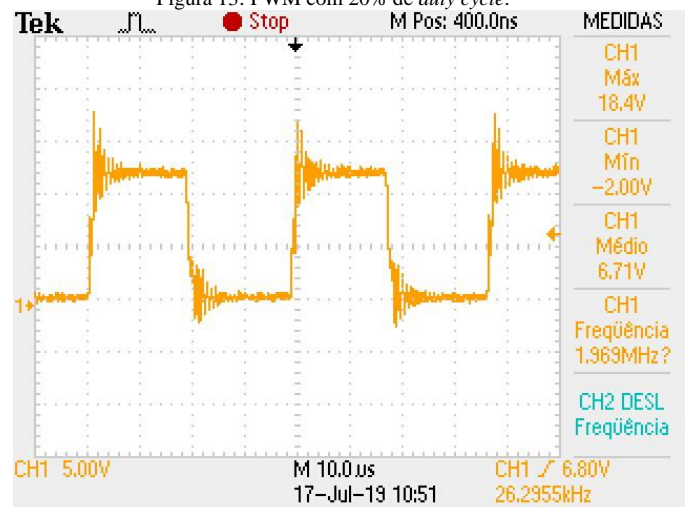


Figura 14: PWM com 50% de *duty cycle*.

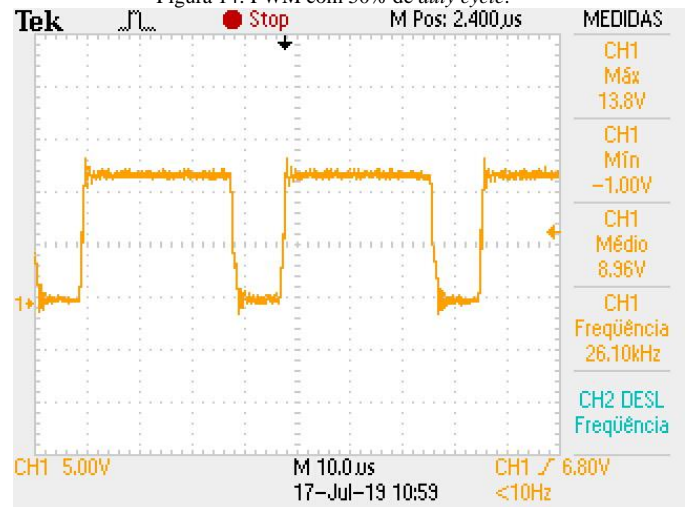


Figura 15: PWM com 80% de *duty cycle*.

A figura 16 e 17 apresentam a saída do conversor Buck no momento do seu acionamento até estabilizar com tensão de 12V.

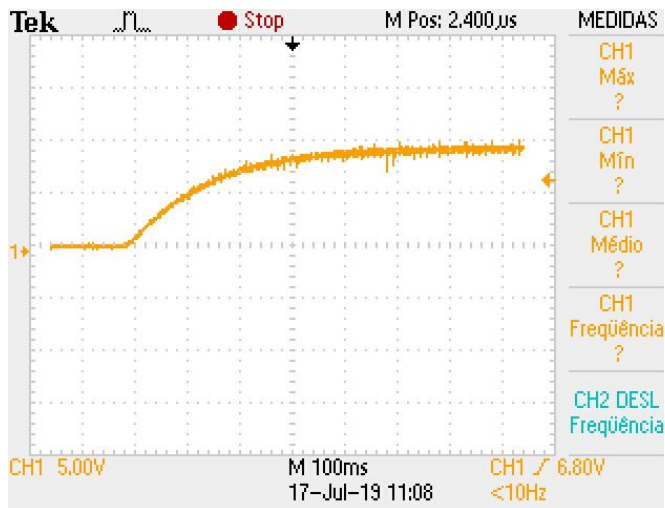


Figura 16: Estabilização da tensão de saída do conversor Buck.

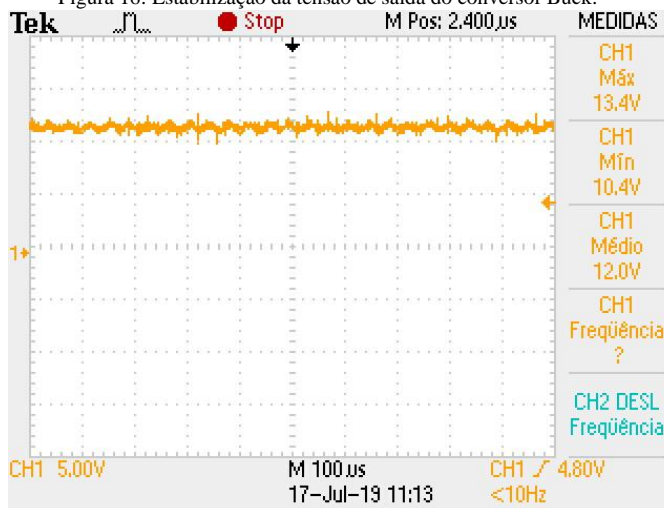


Figura 17: Tensão de saída do conversor Buck já estabilizada.

V. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos na implementação prática mantiveram-se dentro do esperado e dos resultados obtidos anteriormente em simulação. A tensão de saída do conversor Buck manteve-se no valor esperado mesmo sofrendo interferências da variação da fonte de tensão de 24V e da fonte de tensão da referência, isso comprova que o controlador PI estava atuando de maneira eficiente.

Encontramos um valor ligeiramente maior que zero para o erro, porém dentro dos limites aceitáveis, isso ocorre devido a perdas de tensão que o sistema pode sofrer com os fios de ligação e trilhas da *protoboard*. Entretanto, esse não foi um fator que interferiu no objetivo final do projeto, que era um conversor Buck capaz de reduzir uma tensão de 24V para 12 V.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] D. Meeks, "Loop Stability Analysis of Voltage Mode Buck Regulator with Different Output Capacitor Types – Continuous and Discontinuous Mode" Texas Instruments., Dallas, TX, SLVA301, Apr. 2008.
- [2] D. W. Hart, *Power Electronics*. New York: NY, 2011, p. 198-205.
- [3] D. P. F. Bottura, D. M. Bueno, L. P. Ramos, G. M. Cocco, G. S. Da Silva, "Modelagem e Controle de um Conversor Buck," *Universidade Federal do Pampa*, 8º Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão, Set 2016.
- [4] J. M. G. D. Silva, "Ações Básicas de Controle," *UFGRS*, 2010.
- [5] J. Sun, "Dynamics and Control of Switched Electronics Systems: Advanced Perspectives of Modeling, Simulation and Control of Power Converters" *Springer*, 2012.

Também foi observado erro da entrada da ação de controle do PI (fig. 18).

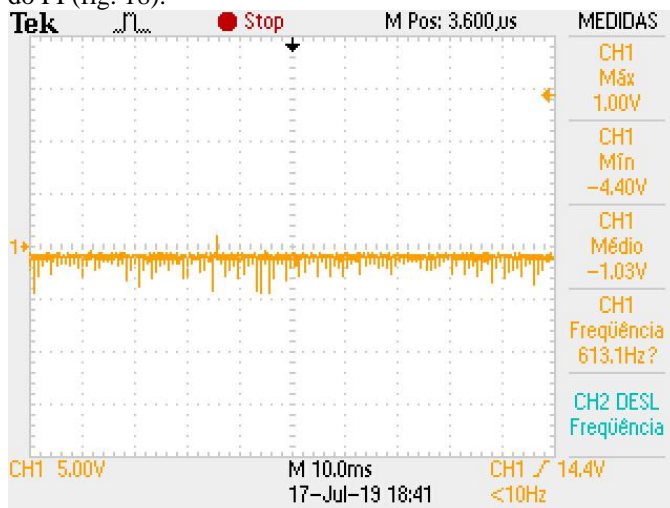


Figura 18: Erro de entrada do controlador PI.