

CONTROLE DIGITAL DE UM CONVERSOR CC-CC TIPO BUCK

Ana Caroline Tondo Bonafin¹, Jefferson William Góes², Raul Scarmosin Freitas³

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Via do Conhecimento, Km 1, Pato Branco - PR - Brasil.

e-mail: anabonafin@alunos.utfpr.edu.br¹, jeffersongoes@alunos.utfpr.edu.br², raulfreitas@alunos.utfpr.edu.br³

Resumo - O objetivo deste artigo é mostrar os estágios de projeto e implementação de um conversor digital buck CC-CC. A partir das especificações de tensão de entrada, tensão e potência de saída, foram dimensionados os componentes necessários para a implementação deste conversor. Foram utilizadas simulações em software para validar o funcionamento do conversor e de outros circuitos utilizados, como, driver, filtro e um microcontrolador para fornecer o sinal digital do conversor.

Palavras chave - Conversor Buck, Controle Digital, Regulador de Tensão

I. INTRODUÇÃO

Atualmente, estudos envolvendo a área de Sistemas de Potência são de grande interesse, devido as incontáveis aplicações industriais existentes. Conversores de Potência CC-CC como o Buck, Boost e Buck-Boost apresentam diversas aplicações associadas à regulação de tensão, são circuitos simples e de fácil implementação, amplamente utilizados na Engenharia Elétrica, visto que a tensão da rede normalmente é alternada e superior a requerida para os equipamentos eletrônicos em geral.

A conversão de tensão é essencial em projetos de sistemas eletrônicos e de potência. De acordo com [S.D. Mitchell, 2008], os conversores CC-CC oferecem a capacidade de incrementar ou decrementar fontes de tensão contínuas fixas. Tais conversores podem ser usados não somente em dispositivos como automóveis e fontes de energia, mas também podem estender consideravelmente a vida útil de uma bateria.

Neste artigo é apresentada a implementação de um conversor CC-CC do tipo Buck, ou abaixador de tensão, controlado digitalmente.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

De acordo com [Petry, 2001] conversores CC-CC são sistemas formados por semicondutores de potência, operando como interruptores, e elementos passivos, que controlam o fluxo de potência de uma fonte de entrada para uma fonte de saída.

Segundo [Keeping, 2013] conversores eram controlados analógicamente devido a facilidade de implementação e o aumento da eficiência que proporcionavam ao conversor, enquanto componentes digitais eram lentos, caros e consumiam muita energia.

[Ogata, 1995] escreve que com o passar dos anos houve um rápido crescimento no uso de controladores digitais em sistemas de controle, pois veem atingindo desempenho otimizado, com custo mínimo e melhor gerenciamento de energia quando comparado a controladores analógicos.

A. Conversor Buck

O conversor buck é um conversor abaixador de tensão, desenvolvido para reduzir a tensão de alimentação fornecida à carga a partir de uma fonte externa, seu circuito é apresentado na figura 1.

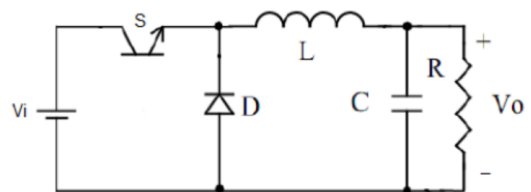


Figura 1: Topologia de um Conversor Buck.

Segundo [Pomilio, 2016] a tensão de entrada V_i é recortada pela chave S e V_o é praticamente constante pela ação de filtragem do capacitor de saída. O indutor L promove o

alisamento da corrente fornecida à carga pelo diodo D , pela chave T , pela fonte V_i e pela carga R .

A corrente aplicada à carga é controlada por meio da chave S , de acordo com [Tajiri, 2009] quando a chave se encontra fechada, a fonte fornece potência para à carga, já com a chave aberta não há mais transferência de energia entre a fonte e a carga. Portanto, alterando o período de condução da chave é possível controlar a tensão média na carga.

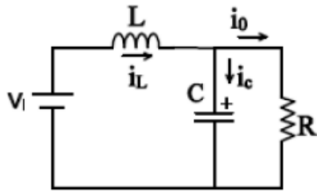


Figura 2: Topologia de um Conversor Buck com a chave fechada.

A figura 2 mostra o comportamento do circuito no momento em que a chave se encontra fechada, a fonte energiza o sistema e a corrente parte da fonte, passando pela chave, seguindo para o indutor e se dividindo entre o capacitor e a carga, fazendo com que a variação de tensão de saída seja positiva. O diodo não conduz nesta etapa pois está reversamente polarizado. Enquanto a chave permanecer fechada a corrente carrega o capacitor, fazendo com que a tensão na carga aumente gradativamente.

Equacionando o circuito da figura 2, obtém-se:

$$V_I - V_L - V_C = 0; \quad (1)$$

$$I_L = I_C + I_R \quad (2)$$

Aplicando as derivadas para deixar em função da corrente do indutor e da tensão do capacitor tem-se:

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_I}{L} - \frac{V_C}{L} \quad (3)$$

$$\frac{dV_C}{dt} = \frac{I_L}{C} - \frac{V_C}{RC} \quad (4)$$

Aplicando as equações 3 e 4 para formar um espaço de estados obtém-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_C \\ \dot{I}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{RC} & \frac{-1}{C} \\ \frac{-1}{L} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_C \\ I_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} \times V_I \quad (5)$$

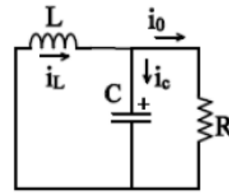


Figura 3: Topologia de um Conversor Buck com a chave aberta.

Quando a chave se abre, figura 3, a energia armazenada no indutor e no capacitor se dissipa na carga, reduzindo a tensão de saída.

Abaixo mostra-se o equacionamento do circuito quando a chave se encontra aberta:

$$V_C + V_L = 0 \quad (6)$$

A equação 2 pode ser reutilizada para esse caso também.

Substituído as derivadas nas equações, tem-se:

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

$$\frac{dV_C}{dt} = \frac{I_L}{C} - \frac{V_C}{RC} \quad (8)$$

Utilizando as equações 7 e 8 obtém-se o seguinte espaço de estados:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_C \\ \dot{I}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{RC} & \frac{-1}{C} \\ \frac{-1}{L} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_C \\ I_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-1}{L} \end{bmatrix} \times V_I \quad (9)$$

Para o obter o espaço de estados completo, ou seja, considerando o tempo com chave ligada T_{on} e tempo com chave desligada T_{off} se faz necessário somar ambos espaço de estados. Usando os 5 e 9 e considerando um espaço de estados desta maneira:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (10)$$

Fazendo O espaço de estados com chave aberta da equação 9 equivalente a x_1 e o espaço de estados com chave fechada da equação 5 é equivalente a x_2 . E considerando :

$$T = T_{on} + T_{off}. \quad (11)$$

$$T_{on} = DT \quad (12)$$

$$T_{off} = T(1 - D) \quad (13)$$

O ciclo de trabalho (*Duty Clicle*) é representado por:

$$D = \frac{T_{on}}{T} \quad (14)$$

O espaço de estados médio que é representado pelo tempo

de chave aberta mais tempo de chave fechada é definido por:

$$\dot{x}_1 T_{on} + \dot{x}_2 T_{off} = A_1 x_1 T_{on} + B_1 U_1 T_{on} + A_2 x_2 T_{off} + B_2 x_2 T_{off} \quad (15)$$

Aplicando as equações 12 e 13 em 15 e colocando o T em evidência obtém-se:

$$\frac{\dot{x}_1 T + \dot{x}_2 (1 - D) T}{T} = \frac{A_1 x_1 T + A_2 x_2 (1 - D) T + B_1 U_1 T + B_2 U_2 (1 - D) T}{T} \quad (16)$$

Simplificando:

$$\dot{x}_1 T + \dot{x}_2 (1 - D) = A_1 x_1 T + A_2 x_2 (1 - D) + B_1 U_1 T + B_2 U_2 (1 - D) \quad (17)$$

Como $A_1 = A_2 = A$, e $x_1 = x_2 = \bar{x}$, simplificando o resultando é o espaço de estados médio $\dot{\bar{x}}$:

$$\dot{\bar{x}} = A\bar{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} V_I D \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} (1 - D) \quad (18)$$

Consequentemente:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_C \\ \dot{I}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{RC} & \frac{1}{C} \\ \frac{-1}{L} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_C \\ I_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{V_I}{L} \end{bmatrix} D \quad (19)$$

Adicionando um filtro genérico de segunda ordem ao espaço de estados:

$$\frac{Y}{X} = \frac{c'}{s^2 + as + b} \quad (20)$$

Convertendo em espaço de estados:

$$\begin{bmatrix} \dot{Y}_1 \\ \dot{Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a & -b \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c' \\ 0 \end{bmatrix} x \quad (21)$$

Onde $x = V_C$ e $Y_1 = \dot{Y}$. Logo o espaço de estados com buck e filtro mostrasse abaixo:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_C \\ \dot{I}_L \\ \dot{Y}_1 \\ \dot{Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{RC} & \frac{1}{C} & 0 & 0 \\ \frac{-1}{L} & 0 & 0 & 0 \\ c' & 0 & -a & -b \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_C \\ I_L \\ Y_1 \\ Y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{V_I}{L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} D \quad (22)$$

Onde a saída desejada para o controlador é \dot{Y} a qual é a saída do filtro. Aplicando os valores obtém-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_C \\ \dot{I}_L \\ \dot{Y}_1 \\ \dot{Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -55.56 & 1000 & 0 & 0 \\ -238.09 & 0 & 0 & 0 \\ 4.59 \times 10^6 & 0 & -3.03 \times 10^3 & -4.59 \times 10^6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_C \\ I_L \\ Y_1 \\ Y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{V_I}{L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} D \quad (23)$$

III. PROJETO

A. Conversor Buck

O dimensionamento dos componentes para a implementação foram feitos de acordo com as especificações passadas pelo Prof.Me.Tiago Lukasiewicz, como mostra o quadro I.

Tensão de entrada (Vi)	24V
Tensão de saída (Vo)	12V
Potência da carga	8W
Frequência	3600Hz

Tabela I: Requisitos de projeto

A variação de corrente foi calculada a partir de indutores disponíveis, na sala de apoio, que se mantiveram dentro da variação aceita pelo professor, utilizando $L = 4,2$ mH na equação 24 a variação de corrente ΔI_L é aproximadamente 39.68%.

$$L = \frac{V_i}{4 \times \Delta I_L \times f} \quad (24)$$

O capacitor foi calculado a partir da equação 28, utilizando uma variação de tensão de aproximadamente $\Delta C = 2\%$, resultando em um capacitor de valor comercial $C = 1000\mu F$.

$$C = \frac{V_i}{31 \times \Delta I_L \times f^2 \times \Delta V_C} \quad (25)$$

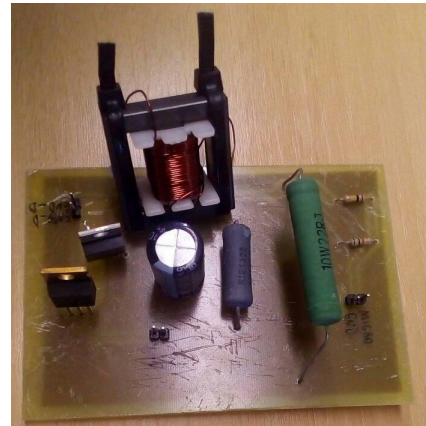


Figura 4: Placa de circuito impresso do conversor BUCK

B. Filtro

Segundo [Junior, 2013],

“Um filtro elétrico é um quadrípulo capaz de atenuar determinadas frequências do espectro do sinal de entrada e permitir a passagem das demais.”

Neste projeto é apresentado um filtro ativo de ganho unitário, com frequência de corte de 360 Hz, uma década a baixo da frequência de operação 3600 Hz. Seu objetivo é permitir a passagem de frequências abaixo da frequência de corte e atenuar as frequências acima deste valor, portanto um filtro Passa-Baixas de segunda ordem e topologia Sallen-Key foi escolhido, como o da figura 5.

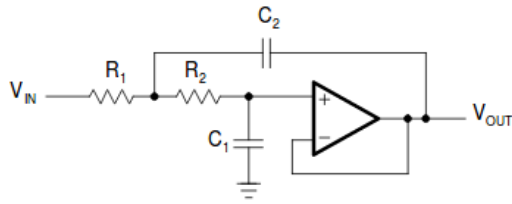


Figura 5: Filtro Ativo

Em [Mancini, 2001], obteve-se a tabela de coeficientes e as equações 28 e 31 para realizar o cálculo dos capacitores e resistores necessários para uma frequência $f = 360Hz$.

Apartir da tabela, os seguintes coeficientes de Butterworth para um filtro ativo de segunda ordem foram encontrados:

$$a_1 = 1,4142 \quad (26)$$

$$b_1 = 1 \quad (27)$$

$$C_2 \geq C_1 \times \frac{4 \times b_1}{a_1^2} \quad (28)$$

Resolvendo a equação 28 utilizando 26 e 27, obtem-se:

$$C_1 = 10nF \quad (29)$$

$$C_2 = 20nF \quad (30)$$

$$R_{1,2} = \frac{a_1 \times C_2 \pm \sqrt{a_1^2 \times C_2^2 - 4 \times b_1 \times C_1 \times C_2}}{4 \times \pi \times f \times C_1 \times C_2} \quad (31)$$

Resolvendo a equação 31 para $f = 360Hz$, 26, 27, 29 e 30, obtem-se:

$$R_1 = R_2 = 33k\Omega \quad (32)$$

Devido aos componentes disponíveis, foram utilizados resistores de $33k\Omega$ para a realização deste filtro.

Também foram adicionados buffers na entrada e saída do filtro.

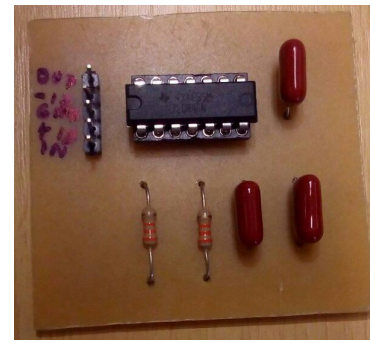


Figura 6: Placa de circuito impresso do filtro

C. Controlador

Para projetar o controlador, foi utilizado o software MATLAB. Primeiramente, foi obtido o gráfico da resposta a um degrau do buck ligado ao filtro à malha aberta.

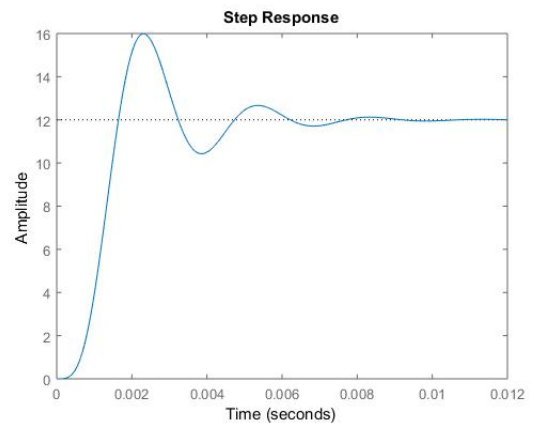


Figura 7: Saída do filtro à malha aberta no MATLAB.

Através de ferramentas fornecidas pelo matlab, foi construído o filtro em tempo contínuo e domínio de frequência, resultando na seguinte função transferência.

$$G_{controlador}(s) = \frac{Kp * (s + \frac{Ki}{Kp})}{s} \quad (33)$$

Fazendo a transformada Z com a aproximação de Tustin, obtem-se:

$$G_{controlador}(z) = \frac{3.004 \times 10^{-4}z + 6.042 \times 10^{-5}}{z} \quad (34)$$

E por equação de diferenças, o controlador no domínio K no tempo discreto:

$$G_c[k+1] = G_c[k] + 3.005 \times 10^{-4}x[k+1] + 6.042 \times 10^{-5}x[k] \quad (35)$$

Após o controlador ser obtido, é possível obter a resposta à malha fechada via simulação no matlab de acordo a com

a figura 8, onde contém tanto em tempo contínuo quanto discreto.

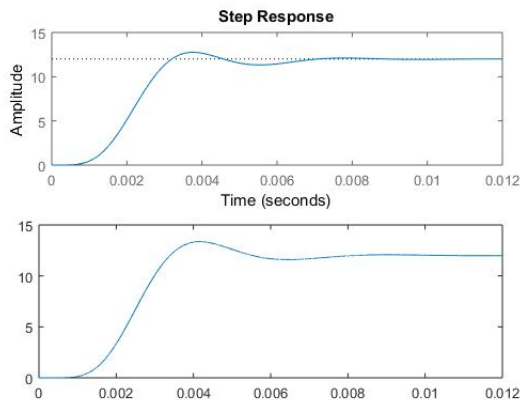


Figura 8: Saída a malha fechada controlada em tempo contínuo e discreto. Em cima contínuo e em baixo discreto.

IV. IMPLEMENTAÇÃO

A implementação deste projeto se divide em: confecção de circuitos impressos de driver, buck e filtro; e a implementação do controlador.

A. Microcontrolador

O microcontrolador utilizado foi um STM32F030F46 por afinidade do método de trabalho e também por ter 48 Mhz de clock e um ADC de 12 bits.

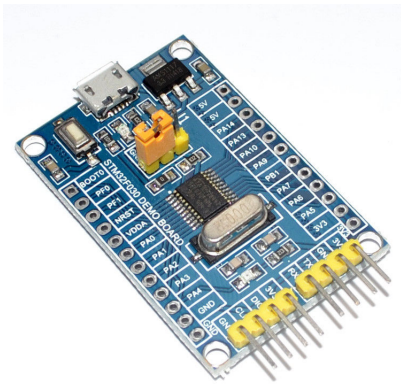


Figura 9: Microcontrolador utilizado.

A lógica de funcionamento ocorre desta maneira: O contador gera um PWM com a frequência de amostragem; a cada ciclo do PWM, a interrupção aciona o ADC; quando o ad termina a conversão, a interrupção do ADC é acionada; na interrupção do ADC, o valor lido é transformado em um valor de tensão e comparado com a referência para gerar o erro; como erro e o erro anterior é gerada a ação de controle

que varia de 0 a 1; e finalmente com essa ação de controle é atualizado o valor do duty cycle do contador que gera o PWM.

Utilizando a equação 35 e aplicando no microcontrolador resultou no seguinte código:

```
void ADC1_IRQHandler(void)
{
    //Funcao de interrupcao do ADC.
    HAL_ADC_IRQHandler(&hadc);
    //Parar a interrupcao do ADC.
    HAL_ADC_Stop_IT(&hadc);
    //Pegar valor do ADC.
    valor = HAL_ADC_GetValue(&hadc);
    //Converter para um valor de tensao real.
    Tensao = 3.3*11*valor/4096;
    ErroA = Erro;
    Erro = 12-Tensao;
    Acao de controle que varia de 0 a 1;
    Duty += Erro*0.0003004 + ErroA*0.00006042;
    //Implementacao de saturadores
    if(Duty > 1) Duty = 1;
    else if(Duty < 0) Duty = 0;
    //Setar PWM do Timer.
    htim17.Instance->CCR1 = Duty*13333;
}

void TIM17_IRQHandler(void)
{
    //Interupcao do timer
    HAL_TIM_IRQHandler(&htim17);
    //Gatilho por software do ADC.
    HAL_ADC_Start_IT(&hadc);
}
```

B. Driver

O Driver é um amplificador de potência, recebe um sinal de baixa potência de um Circuito Integrado e produz uma alta corrente emulada para a entrada *gate* de um transistor de alta potência, como um MOSFET tipo Intensificação, nesse caso.

Dado o sinal de entrada, é utilizado um fotodiodo (optoacoplador), que é ativado por meio do sinal de controle na entrada, alimentado com 3,3V. O objetivo deste é isolar opticamente o sinal de controle do sinal de potência, encontrado na saída do driver, para evitar danos ao microcontrolador.

Na etapa de potência, o optoacoplador devolve o sinal de entrada amplificado, porem invertido, uma vez que sua saída encontra-se no coletor, como pode-se observar na Figura 10.

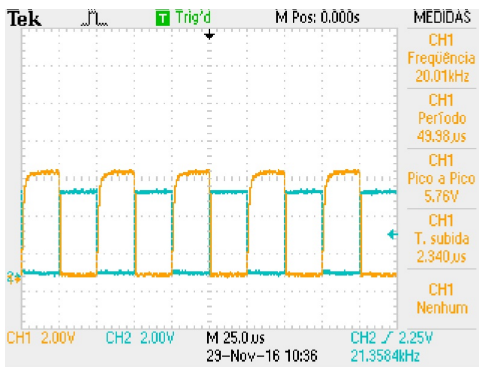


Figura 10: Efeito de inversão do sinal de controle na saída do optocoplador.

Em sequência, foi utilizado um transistor BC547, com relação da corrente do coletor e corrente de base de aproximadamente 397. Alimentado com 12 Volts e na configuração de emissor comum, o transistor tem a função de desinverter o sinal e amplificar. Como pode ser observado, o sinal de saída tem a mesma fase do sinal de entrada e amplitude elevada.

Na saída do BC547, insere-se um circuito do tipo *push-and-pull*, que consiste em dois transistores, um tipo PNP e um tipo NPN, utilizados para oscilar a corrente nos dois sentidos, conforme a entrada da base comum dos mesmos. Quando um dos transistores ativa, o outro desativa, fazendo com que a corrente da alimentação de 12V vá para a saída. Quando o oposto ocorre, a corrente volta da saída e vai para o terra.

A saída do Driver pode ser observada na Figura 11.

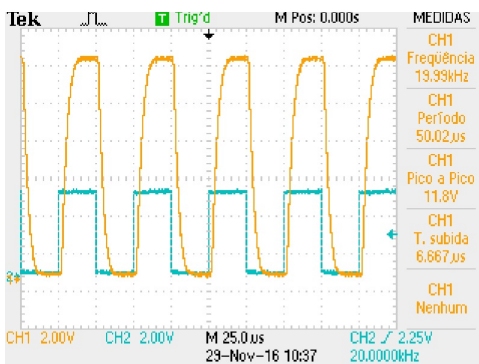


Figura 11: Saída do driver.

As saídas mostradas nas figuras anteriores não condizem exatamente com o sinal de entrada, pois há uma distorção no sinal gerado pela falta de linearidade dos transistores utilizados.

Deve-se levar em consideração que o driver foi projetado para uma frequência mais alta do que a esperada (3,6kHz), para garantir seu funcionamento em propósitos gerais.

O circuito do projeto do driver pode ser visto na Figura 12:

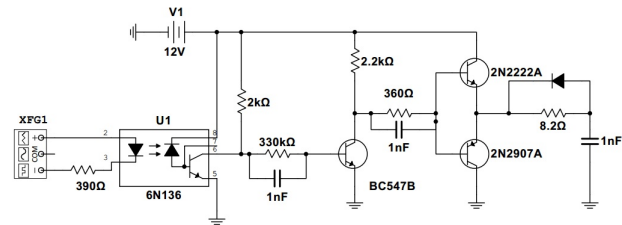


Figura 12: Circuito do Driver

A placa em circuito impresso pode ser observada abaixo:

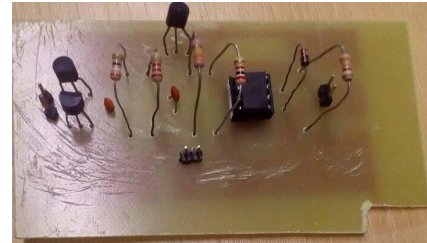


Figura 13: Placa em circuito impresso do Driver

C. Testes

Para realização dos testes, utilizou-se as tensões de 24V(tensão de projeto), 20V, e 30V. Essa variação é feita para verificar se o controlador projetado consegue controlar a tensão, mesmo sendo abaixo ou acima da projetada.

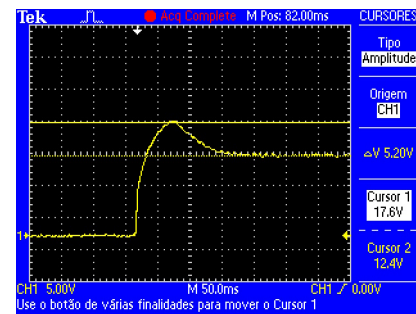


Figura 14: Saída do buck à malha fechada com tensão de entrada de 24 volts.

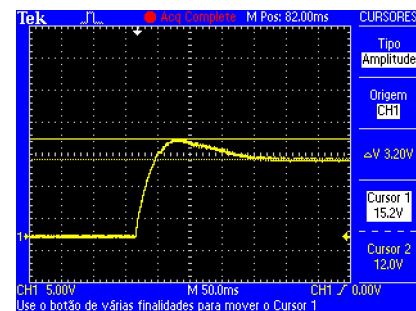


Figura 15: Saída do buck à malha fechada com tensão de entrada de 20 volts.

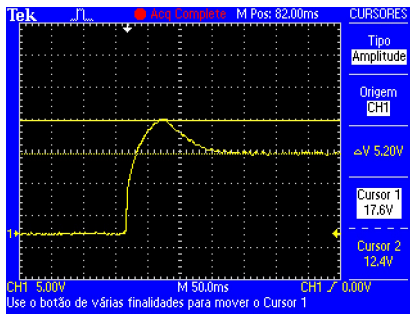


Figura 16: Saída do buck à malha fechada com tensão de entrada de 30 volts.

Como é possível perceber, nas figuras 14, 15 e 16, o controlador ajusta as tensões diferentes da tensão de entrada projetada.

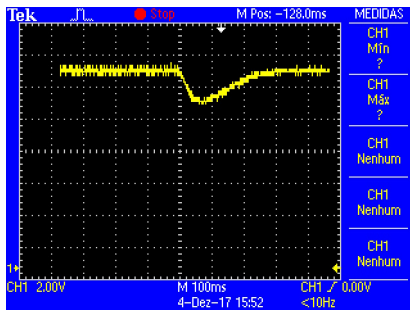


Figura 17: Saída já controlada com uma perturbação inserida afim de se notar a influência do controlador.

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como pode ser observado nas figuras 14, 16, 15 e 17 o controlador projetado atinge as metas previstas de controle de um buck. Porém o tempo de assentamento é um pouco superior do que o medido em simulação na ferramenta Matlab. Isto pode ser justificado por interferências nas placas, indutâncias de fios muito longos, ruídos de chaveamento e outras causas não medidas. O sistema a olho nú ainda permanece rápido.

REFERÊNCIAS

- [Junior, 2013] Junior, A. P. (2013). Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos.
- [Keeping, 2013] Keeping, S. (2013). The Rise of Digital Control for DC/DC Regulation.
- [Mancini, 2001] Mancini, R. (2001). Op Amps For Everyone.
- [Ogata, 1995] Ogata, K. (1995). Discrete-time control systems.
- [Petry, 2001] Petry, C. A. (2001). Introdução aos Conversores CC-CC.
- [Pomilio, 2016] Pomilio, J. A. (2016). Fontes chaveadas.
- [S.D. Mitchell, 2008] S.D. Mitchell, S. M. Neube, T. G. O. M. H. R. (2008). Applications and Market Analysis of DC-DC Converters.
- [Tajiri, 2009] Tajiri, L. L. (2009). Proposição de um controlador digital para conversores buck e boost usando a teoria de conjuntos aproximados.