



# **DO EFEITO DO FILTRO DE KALMAN NA AÇÃO DE CONTROLE DE CONVERSOR CC-CC COM RUÍDO ADITIVO**

## **RELATÓRIO DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA (PIBIC/INPE/CNPq)**

**Luca Sauer de Araujo (UFSM, Bolsista PIBIC/CNPq)**  
**lucasauerr@gmail.com**

**Everson Mattos (INPE, Orientador)**  
**everson.mattos@gmail.com**

**Junho de 2020**



## SUMÁRIO

RESUMO .....	5
1. INTRODUÇÃO.....	6
2. OBJETIVOS DO TRABALHO .....	7
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	8
4. METODOLOGIA .....	9
5. ANÁLISES E RESULTADOS .....	12
6. CONCLUSÕES.....	14
REFERÊNCIAS .....	15



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Circuito Buck padrão. ....	9
Figura 2. Circuito Buck utilizado.....	11
Figura 3. Representação de Picos Falsos. ....	12



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Tabela com resultados percentuais obtidos.....	13
Tabela 2. Tabela com resultados absolutos obtidos.....	13

## RESUMO

Conversores são dispositivos responsáveis por transformar a energia e mostram-se indispensáveis em diversos equipamentos eletrônicos, devido à eficiência desejada e a densidade de potência que apresentam. Dentre as operações mais frequentes dos conversores CC-CC está a regulação da tensão de saída para as cargas desejadas. Para que tensão de saída seja corretamente regulada, faz-se necessário o uso de sensores de medidas capazes de medir a variável controlada, nesse caso, a tensão de saída  $V_0$ . Nesse sentido, além dos controladores, os sensores também se mostram necessários para que haja um bom desempenho em malha fechada (controlador e conversor), garantindo assim que os circuitos alimentados pelo conversor funcionem adequadamente. Neste trabalho, procurou-se avaliar a influência da relação sinal-ruído na ação de controle de conversores CC-CC. Para isso, foi utilizado um controlador proporcional-integral-derivativo (PID) junto a um conversor abaixador *buck*. Este controlador pode ser aproximado a um filtro rejeita-faixa e, dessa forma, dependendo da frequência de cruzamento por zero do sistema compensado, pode ocorrer pouca atenuação do ruído, podendo gerar instabilidade do sistema, aumento do *ripple* e ainda gerar pulsos PWM falsos na chave, o que pode gerar aumento de perdas por calor e harmônicos indesejados na tensão de saída. Para mitigar esses efeitos, buscou-se avaliar o modo no qual o conversor trabalhava pela variação da amplitude do ruído aditivo aplicado e, conseqüentemente, de acordo com a relação sinal-ruído da variável de controle  $V_0$ . Observou-se que, os efeitos indesejáveis ocorrem com maior intensidade se a relação sinal/ruído é pequena e se a frequência de cruzamento por zero do sistema compensado em malha aberta for alta. Para reduzir os danos causados por esses efeitos, houve a implementação do algoritmo de filtragem ótima baseado no Filtro de Kalman no circuito em malha fechada. O software PSIM<sup>®</sup> foi utilizado para a aplicação do controlador, do conversor e do Filtro de Kalman. Os resultados mostram que o controlador pode ganhar em robustez ao impedir que o ruído afete a ação de controle e o acionamento das chaves de potência, podendo, com isso, garantir a estabilidade do sistema para ambientes com relação sinal-ruído baixa através do uso de filtragem ótima.

**Palavras-chave:** Filtragem Ótima, Conversor CC-CC, Controle, Filtro de Kalman.

*Trabalho apoiado pelo programa PIBIC-CNPq*

## 1. INTRODUÇÃO

Os sensores são essenciais para que uma malha de controle funcione corretamente. No entanto, sensores estão sujeitos a vários erros, como por exemplo resolução finita, erros de medida, e ruídos (tanto conduzido como radiados). No contexto de eletrônica de potência, o ruído conduzido está relacionado, normalmente, a harmônicas de chaveamento, as quais podem ser atenuadas com filtros em hardware. Já os ruídos radiados, podem ter diversas fontes de geração incluindo, ruídos ambientais. Este trabalho será limitado a análise do ruído conduzido e branco, em princípio descorrelacionado da frequência de chaveamento do conversor de potência.

No presente relatório, expõe-se o problema relacionado à geração de *False Pulse Width Modulation*, (em português, picos falsos) nos transistores de chaveamento, presentes nos conversores abaixadores de tensão, também conhecidos como conversor *buck* (Erickson, 1997). Os picos falsos, do modulador PWM podem causar o aparecimento de harmônicos, reduzir a eficiência, aumentar as perdas por calor e eventualmente a queima do transistor. Nenhum conversor de potência pode rejeitar distúrbios ou ter sua saída regulada em um valor, seja contínuo ou não sem o uso de um controlador em malha fechada. Um controlador pode ser visto como um filtro, esse filtro, atua na variável de controle da planta (conversor de potência) de modo a garantir que os requisitos de desempenho sejam atingidos.

Ao utilizar um controle do tipo *Proportional Integrative Derivative* (sigla PID, em português: Controlador proporcional integrativo derivativo), escolhido aqui devido à sua relevância na indústria (Astrom e Hagglund, 1995), em malha fechada, dependendo dos requisitos de projeto do controlador, das dinâmicas não modeladas do conversor e da relação sinal-ruído, o controlador pode não processar corretamente o sinal de erro (i.e. tensão de saída subtraída da tensão de referência), podendo inclusive reduzir a relação sinal-ruído, aumentando o aparecimento de pulsos falsos.

Assim, a sintonia do controlador pode causar instabilidade no sistema e aumentar o *Ripple* na tensão de saída  $V_o$ . Esses efeitos combinados podem ainda gerar aumento nas perdas do calor nos componentes do conversor e a induzir de harmônicos indesejáveis na variável de controle. Estes fatores em conjunto geram problemas

consideráveis para o uso de conversores em equipamentos eletrônicos, principalmente em ambientes aeroespaciais. Dada a necessidade destes componentes em equipamentos eletrônicos modernos que demandam elevada densidade de potência e eficiência, procurou-se avaliar a inclusão de um Filtro de Kalman.

O Filtro de Kalman, proposto por Rudolf Emili Kalman em 1960 (Kalman, 1960) é um algoritmo de estimação ótimo que utiliza critérios estocásticos para atualizar a estimativa atual e futura de uma amostra. O algoritmo foi adaptado para operar *on-line*, em conjunto com a ação de controle do controlador PID em malha fechada. Nesse sentido, foram comparadas as respostas dos sistemas com e sem o filtro de Kalman para diversas relações sinal-ruído falsos, detectáveis através de simulações, para avaliar a diferença da resposta do sistema quando há o filtro aplicado e quando o mesmo não está presente. Os resultados foram obtidos em software de simulação especialista em eletrônica de potência e controle da powersim (PSIM©). Vale ressaltar que outro software auxiliar também foi utilizado, e este é o MATLAB©, que foi utilizado para definir alguns parâmetros do controlador através do comando *sisotool* que nos permite, através da função de transferência do sistema, visualizar graficamente a resposta em frequência com a utilização de Diagramas de Bode, entre outros métodos.

## 2. OBJETIVOS DO TRABALHO

O principal objetivo do trabalho é avaliar a ação de controle proporcionada pela utilização do Filtro de Kalman e compará-la com a resposta do sistema sem o uso de filtro. A ação de controle é avaliada de acordo com a geração de picos falsos nos transistores de chaveamento, facilmente detectáveis de forma gráfica através de simulações realizadas em software especializado em eletrônica de potência. Através disso, usou-se a relação sinal-ruído (“*Signal-to-Noise Ratio*”) para comparar numericamente a variação de ruído efetiva e percentual que pode-se obter ao utilizar um sistema com o Filtro de Kalman na ação de controle e um sistema sem utilizá-lo.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para que fosse possível realizar o trabalho, teve-se de construir uma fundamentação teórica considerável. Essa passou por diversas publicações acerca do Filtro de Kalman para sua melhor compreensão e posterior aplicação no software utilizado. Vale ressaltar que os estudos com o Filtro de Kalman são uma continuidade neste projeto de iniciação científica, uma vez que o mesmo já havia sido estudado para implementação em dados de refletância de sensoriamento remoto, projeto realizado em 2019-2020.

Além disso, precisou-se compreender o funcionamento do software de eletrônica e potência amplamente utilizado na área de engenharia elétrica. Acabou sendo uma necessidade para dar continuidade ao projeto dadas as restrições de acesso à laboratórios onde o experimento poderia ser também conduzido, por exemplo. No entanto, vale ressaltar que são softwares altamente confiáveis e são amplamente utilizados para que se teste um modelo antes de desenvolvê-lo na forma de um protótipo. Esse aprendizado se deu através de vídeos explicativos e até mesmo aulas dadas no formato virtual nas quais os professores exemplificam a utilização do software para simular a resposta de um circuito qualquer. O aprendizado foi então transferido para a aplicação em um circuito conversor CC-CC do tipo *buck*, conforme comentado.

Compreender o funcionamento de um conversor CC-CC também foi fundamental para que se pudesse avaliar o controle. O conversor CC-CC pode ser de três tipos: elevador de tensão, abaixador de tensão e ambos. Como dito, conversores se fazem necessários na maioria dos equipamentos eletrônicos, pois, para o bom funcionamento de um componente específico, precisa de uma determinada de tensão, porém, uma mesma fonte de tensão comumente é utilizada para alimentar diversos componentes na eletrônica de potência, e como a tensão precisa ser adequada para cada componente, utilizam-se conversores de tensão para que não haja problemas devido à amplitude inadequada de tensão. O conversor funciona basicamente através do diferente arranjo de componentes e dispositivos, como capacitores, indutores, transistores e diodos, além de resistências.



## 4. METODOLOGIA

Um conversor *buck* é um sistema não linear que pode ser modelado em espaço de estados em torno de um ponto de operação, linearizado e convertido em uma função de transferência, que relaciona a variável de controle com a variável controlada. A metodologia adotada nesse processo de modelagem está contida em (Erickson, 1997). A função de transferência do modelo de conversor CC-CC abaixador de tensão, é dada pela Equação (1), no domínio da frequência, comumente utilizada para determinar a resposta de circuitos mais elaborados por ser uma abordagem menos indireta sobre o sistema, sem utilizar parâmetros diferenciais. Após a determinação desta resposta no domínio da frequência, pode-se utilizar a transformada inversa de Laplace para que se obtenha a resposta no domínio do tempo.

$$G_{vd}(S) = \frac{1}{LCS^2 + \frac{L}{R}S + 1} \quad (1)$$

O circuito do conversor *buck* utilizado nesta modelagem pode ser visualizado na Figura (1). Esse circuito não leva em consideração as não idealidades dos componentes. A frequência de chaveamento adotada é de 10 KHz. A potência do conversor é de 10 W.

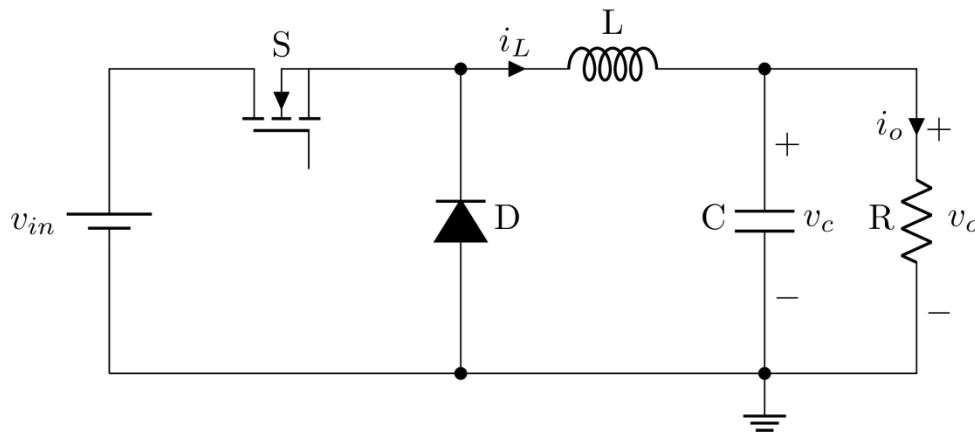


Figura 1. Circuito Buck padrão.

Para avaliar a influência do ruído de medida da variável controlada na ação de controle, tanto no tempo contínuo quanto no tempo discreto, foram sintonizados três

controladores PID utilizando a ferramenta *sisotool* do software MATLAB®. A ferramenta é útil para modelar o sistema levando em conta fatores como sua estabilidade, podendo facilmente avaliar os diagramas de fase, diagrama de Bode, e entre outros. Sua sigla representa a frase *System Input, System Output*, traduzido por entrada do sistema, saída do sistema.

Os testes foram realizados levando em conta controladores sobre baixas frequências. Mais precisamente, três delas foram avaliadas: de 80 Hz, de 800 Hz, e de 1 kHz. Todos controladores dependem então da função de transferência no domínio da frequência, e as funções para eles, obtidas através do *sisotool* são, respectivamente:

$$G(S)_{80\text{Hz}} = \frac{0.0135S^2 + 38.7469S + 1250674.431}{S^2 + 88098.57S} \quad (2)$$

$$G(S)_{800\text{Hz}} = \frac{0.13399S^2 + 401.6S + 12962879.89}{S^2 + 88098.57S} \quad (3)$$

$$G(S)_{1\text{kHz}} = \frac{0.1517S^2 + 526.2055S + 15560987.18}{S^2 + 88098.57S} \quad (4)$$

Como pode-se constatar, o ganho  $k$  dessas funções é unitário e são equações de segunda ordem, que são responsáveis pela ação de controle proposto à um circuito do tipo *buck* com o intuito de reduzir a tensão de entrada de 40V para uma tensão de saída  $V_0$  de 30V.

A metodologia utilizada baseia-se então na execução de simulações nas frequências escolhidas, utilizando um passo de  $1\mu s$  e tempo total de 0.35s. O software utilizado para esse estudo foi o PSIM®. O circuito montado pode ser conferido na Fig. (2). Note que há algumas diferenças em termos de *design* quando comparado à Fig. (1), e isso se deve à algumas não idealidades e necessidades que as simulações fazem necessárias para a obtenção de resultados fidedignos. Descritivamente falando, temos à direita do *buck* a adição do ruído considerado para este trabalho.

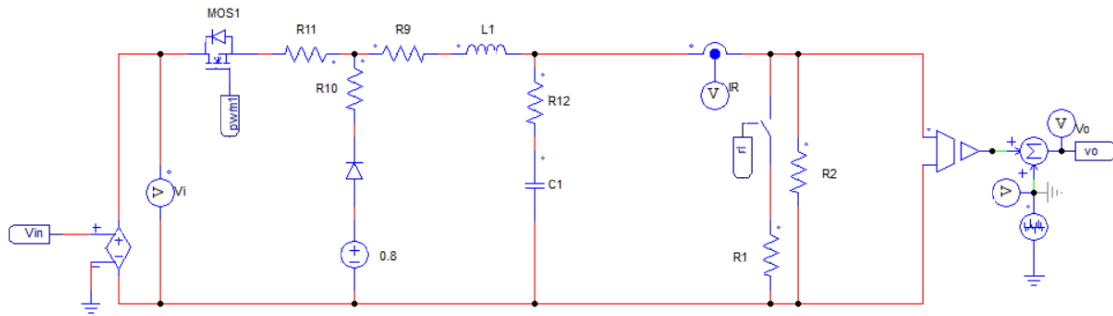


Figura 2. Circuito Buck utilizado.

Matematicamente falando,  $R_9$ ,  $R_{10}$  e  $R_{11}$  representam as não idealidades presentes no circuito e possuem, portanto, magnitudes negligenciáveis. Já  $R_1 = 3\ \Omega$ , de acordo com a LTK e  $R_2 = 3\ \Omega$ , que é um valor arbitrariamente escolhido. A capacitância de  $C_1$  é de  $100\ \mu F$  enquanto que  $L_1 = 100\ \mu H$ . Ressalta-se ainda que a tensão de entrada possui magnitude de  $40\ V$ .

Para avaliarmos a eficiência do controle do tipo proporcional integrativo derivativo (PID), através da variação do nível de ruído aditivo, procurou-se por picos falsos que possam ter ocorrido no diodo, simbolizando então o mau funcionamento do mesmo. Embora os picos falsos não sejam por si o problema mais relevante, os mesmos estão atrelados à perda de desempenho do controle e, juntamente deles, pode ocorrer a instabilidade do sistema em malha fechada, além de aumento da amplitude de oscilação em torno do ponto de tensão de saída desejado (popularmente conhecido como *ripple*), apresentando ainda harmônicos indesejáveis (ao considerarmos um período de tempo maior) em torno da variável de controle desejada.

A vantagem de se avaliar através dos picos falsos se dá pela acessibilidade dos dados no software. O gráfico PWM do diodo pode ser conferido, devendo possuir uma razão cíclica adequada para o funcionamento apropriado do *buck*. Ressalta-se que, por se tratar de um diodo, o componente está necessariamente diretamente ou reversamente polarizado, de acordo com (Boylestad, 2013). Em outras palavras, isso significa que o estado do diodo encontra-se ou em curto-circuito, e portanto, em condução, ou em circuito aberto, não conduzindo corrente. Graficamente, isso significa que o PWM deve então possuir apenas dois valores, sendo eles 0 (circuito aberto) ou 1 (curto-circuito), intercalados de acordo com sua razão cíclica, que é um dado de entrada que é controlado ou definido. Para exemplificação, se a razão cíclica  $D$  for de 0.5, o diodo

estará metade de seu período no estado 1 e a outra metade no 0 e, portanto, valores intermediários ou períodos curtos em um dos dois valores demonstram o que temos chamado de picos falsos neste relatório. Visualmente, podemos conferir o exposto na Fig. (3).



Figura 3. Representação de Picos Falsos.

Como o ruído aditivo estava sendo variado para que se procurasse por picos falsos, havia também variação na relação sinal ruído do sistema, que é dada pela Eq. (5). Através da detecção de picos falsos, os valores máximos de ruído para o sistema sem filtro e com filtro foram obtidos e com eles, pôde-se avaliar mais diretamente a diferença através da relação sinal ruído do sistema.

$$SNR = \left( \frac{A_{sinal}}{A_{ruído}} \right)^2 \quad (5)$$

Note que, na Eq. (5),  $A$  se refere à amplitude de cada um dos sinais. Após rodadas de simulações entre níveis de ruído no qual o pico falso existia e não existia, utilizou-se um método análogo ao do método da bisseção para procurarmos qual seria a amplitude limite de ruído que apresentaria os picos falsos. Ao encontrarmos esse valor, avaliou-se a relação sinal ruído para esta amplitude.

## 5. ANÁLISES E RESULTADOS

O procedimento foi tomado inicialmente para o sistema sem filtragem ótima e posteriormente para o sistema com a filtragem ótima. Os resultados obtidos estão dispostos nas Tabelas (1) e (2), para termos percentuais e termos absolutos no sistema avaliado, respectivamente.

Tabela 1. Tabela com resultados percentuais obtidos.

<b>Frequência (Hz)</b>	<b>SNR(%) Sem Filtro</b>	<b>SNR (%) Com Filtro</b>	<b>Diferença (%)</b>
<b>80</b>	19.5	-	+81,5
<b>800</b>	2.5	13	10.7
<b>1k</b>	2.38	13	10.62

Nota-se pela Tabela (1) que, em termos percentuais, há diferença significativa entre o ruído admissível para o conversor *buck* em malha fechada utilizado junto do Filtro de Kalman em comparação com o sistema sem a utilização do mesmo. Ainda, destaca-se que para frequências baixas, como é a de 80 Hz, o sistema não apresentou picos falsos para  $SNR < 1$  (amplitude do ruído igual à amplitude do sinal) após a implementação do Filtro de Kalman, em parte por sua relação sinal ruído já ter sido alta para o caso sem filtragem. Não buscou-se o valor máximo pois os casos de sistemas sujeitos à um ruído de mesma grandeza em termos de amplitude do sinal serem raros.

Tabela 2. Tabela com resultados absolutos obtidos.

<b>Frequência (Hz)</b>	<b>RUÍDO Sem Filtro</b>	<b>Ruído (V) Com Filtro</b>	<b>Diferença (V)</b>
<b>80</b>	3.9	-	+16.1
<b>800</b>	0.5	2.64	2.14
<b>1k</b>	0.475	2.65	2.175

Já, pela Tabela (2), podemos visualizar em termos das grandezas do sistema como foi o comportamento do sistema com e sem o Filtro de Kalman. Apesar de ambas as tabelas representarem os mesmos dados, pela segunda fica mais claramente exposto que, na verdade, o ruído admissível que não afetasse a estabilidade e controle do sistema foi pelo menos 5 vezes maior quando aplicado o Filtro de Kalman do que quando o mesmo não é aplicado.

## 6. CONCLUSÕES

Apesar do estudo realizado ser de certa forma específico para essas entradas no sistema, um estudo análogo poderia ser feito para quaisquer outros valores de entrada desejados. A aplicação do Filtro de Kalman, neste caso, garantiu que o ruído aditivo na entrada precisasse ser pelo menos 5 vezes maior do que o ruído aditivo necessário para gerar instabilidade na frequência de chaveamento de um conversor CC-CC do tipo *buck*. Desta forma, infere-se que a utilização do filtro aumenta a robustez do controle e podendo garantir a estabilidade do sistema para ambientes com baixa relação sinal-ruído.

## REFERÊNCIAS

ASTROM, K. J.; HAGGLUND, T. **PID Controllers: Theory, Design and Tuning**. Research Triangle Park, NC: Instrument Society of America, 1995.

BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Electronic Devices and Circuit Theory**. Pearson, 2013.

ERICKSON, R. W. **Fundamentals of Power Electronics**. New York, NY: Chapman & Hall, 1997.

KALMAN, R. E. A new approach to linear filtering prediction problems. **Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control – Transactions of ASME**, v.82, p. 35-45, 1960.