



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[®] 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.

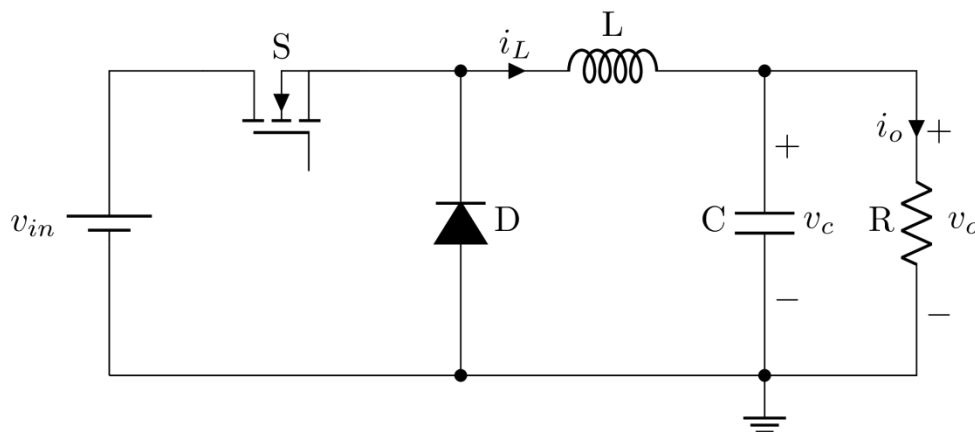


Figura 1. Circuito Buck padrão.

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:

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

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

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

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.

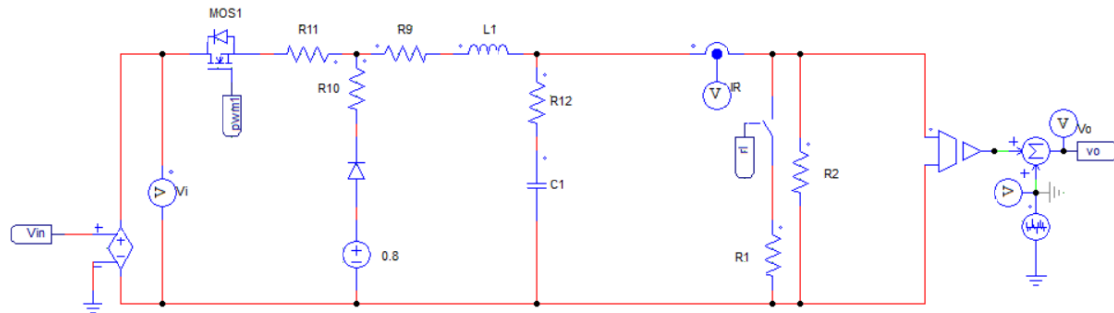


Figura 2. Circuito Buck utilizado.

Matematicamente falando, $R9$, $R10$ e $R11$ representam as não idealidades presentes no circuito e possuem, portanto, magnitudes negligenciáveis. Já $R1 = 3\ \Omega$, de acordo com a LTK e $R2 = 3\ \Omega$, que é um valor arbitrariamente escolhido. A capacitância de $C1$ é de $100\ \mu F$ enquanto que $L1 = 100\ \mu H$. 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).

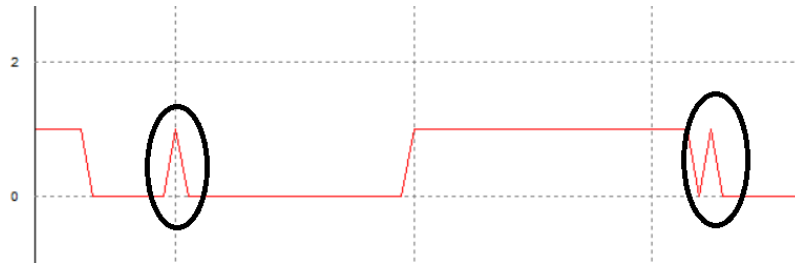


Figura 3. Representação de Picos Falsos.

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.

Frequência (Hz)	SNR(%) Sem Filtro	SNR (%) Com Filtro	Diferença (%)
80	19.5	-	+81,5
800	2.5	13	10.7
1k	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.

Frequência (Hz)	RUÍDO Sem Filtro	Ruído (V) Com Filtro	Diferença (V)
80	3.9	-	+16.1
800	0.5	2.64	2.14
1k	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.