

Estudo, Controle e Simulação de um Conversor Buck para Veículos Aéreos não Tripulados (VANT's)

1st Matheus Erick Silva Ferreira
Departamento de Engenharia e Tecnologia
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Mossoró, Brasil
matheus.ferreira@alunos.ufersa.edu.br

2nd Bruno Emmanuel de Oliveira Barros Luna
Departamento de Engenharia e Tecnologia
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Mossoró, Brasil
bruno.luna@ufersa.edu.br

Resumo — Os dispositivos eletrônicos têm sido amplamente utilizados ao longo dos últimos anos, devido suas aplicações estarem presentes nos mais diversos setores e áreas de atividades. Nesse contexto, o veículo aéreo não tripulado (VANT) mais conhecido como drone, surge como uma aplicação multiuso intercalando desde a indústria ao uso pessoal. Apesar de muito usado, este aparelho apresenta uma limitação em relação ao seu tempo de voo, que na maioria dos casos é insuficiente para suprir as suas necessidades de operação. Assim a eletrônica de potência surge como um forte aliado para a solução deste problema, já que se baseia na utilização de dispositivos, para realizar o controle do fluxo de energia e a conversão de formas de onda de tensões e correntes entre fontes e cargas. Este trabalho apresenta o projeto de um conversor do tipo Buck com controlador de tensão PI (proporcional-integral) operando no modo de condução contínua, para auxiliar, ou substituir a bateria do VANT a fim de tornar o tempo de voo mais longo. Os ensaios realizados demonstram que o projeto do conversor foi bem-sucedido, já que obteve variações mínimas entre os valores calculados e simulados, além de desempenho satisfatório para o controle de tensão de saída, o qual apresenta erro médio nulo para os parâmetros estipulados.

Palavras-chave — buck, controle, modo de condução contínua, Matlab-Simulink.

I. INTRODUÇÃO

A eletrônica de potência tem alçado um importante lugar dentro da tecnologia moderna, sendo utilizada numa vasta gama de equipamentos de baixa, média e alta potência, que incluem em si as mais diversas funções, tais como, o controle de calor, o controle de iluminação, acionamentos elétricos, fontes de alimentação em corrente contínua e alternada, etc.

De acordo com [1], como resultado dessa vasta utilização torna-se difícil mensurar os limites para as aplicações da eletrônica de potência, em especial as tendências atuais do desenvolvimento dos dispositivos de potência e dos microprocessadores.

Dentre as diversas utilizações de equipamentos que contém circuitos eletrônicos, os veículos aéreos não tripulados (VANT's) tem ganhado bastante notoriedade devido a sua versatilidade e por seu uso abranger as mais diversas áreas e atividades. De acordo com [2], o problema desses dispositivos é o grande gasto de energia durante a sua operação, o que ocasiona um baixo tempo de autonomia. Esse problema não pode ser resolvido apenas adicionando uma maior quantidade de baterias a bordo da aeronave, já que quanto mais massa esta carrega, maior se configura o gasto

energético com os motores para mantê-la no ar. Nesse contexto, as topologias dos conversores de potência, a exemplo do conversor Buck, surgem como uma opção viável para tentar resolver esse problema, utilizando-se de um sistema de alimentação de VANT's por fio, como observado no modelo da Figura 1. O aparato consiste num sistema que mantém a aeronave alimentada de energia durante o voo, algo que não só prolonga a autonomia do equipamento, como permite que ele se mantenha no ar por períodos indefinidos. Esse sistema, consiste numa estação base de energia terrestre, na qual o cabo conectado a ela realiza a alimentação do VANT.



Fig. 1. VANT alimentado por fio. Fonte: [3]

Uma aplicação direta desse modelo de VANT, consiste na rede não terrestre (RNT), que segundo [4] refere-se a segmentos de redes que operam por meio de um veículo aéreo/espacial para comunicação, como demonstrado na Figura 2. Além dessa, podem ser citadas outras aplicações, que segundo [2] envolvem as atividades de sensoriamento remoto, mapeamento de áreas agrícolas e a manutenção de equipamentos elétricos.

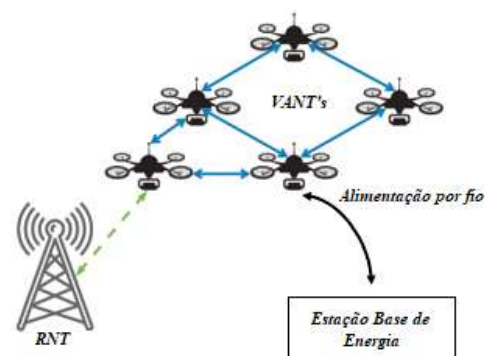


Fig. 2. Rede não terrestre com VANT's. Fonte: Adaptado de [5]

O presente trabalho tem por objetivo, realizar a análise, seleção de parâmetros, controle e simulação de um conversor Buck de 100 Watts de potência, operando no modo de condução contínua. O conversor projetado será analisado no ambiente do Software Matlab-Simulink®, com o intuito de aplicá-lo aos veículos aéreos não tripulados (VANT's).

II. CONVERSOR BUCK

Dentre as mais diversas topologias de conversores encontradas na eletrônica de potência, o conversor Buck apresenta como principal característica diminuir a tensão de sua entrada, em detrimento de sua saída.

Constituído por uma fonte de tensão V_s , uma chave controlada S, um indutor L, um diodo D, um capacitor C e uma carga resistiva R, como demonstrado na Figura 3. Essa topologia permite que seja obtido, partindo-se de uma fonte de tensão invariável e contínua na entrada, uma saída de tensão neste caso variável e também contínua.

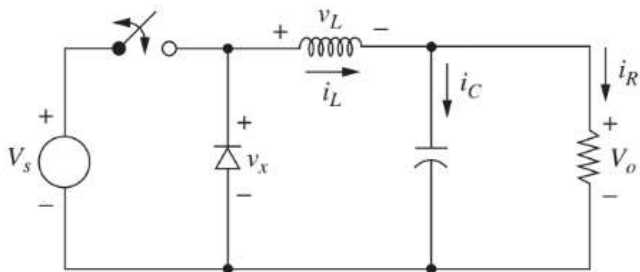


Fig. 3. Conversor Buck. Fonte: [6]

O princípio norteador de funcionamento dos conversores chaveados, segundo [7] é a utilização do componente principal controlado que podem ser, transistores (TJBs, MOSFETs, IGBTs), tiristores, entre outros. Tal componente eletrônico objetiva no conversor sua regulação durante o chaveamento. Em linhas gerais, a tensão de saída é determinada em decorrência do período em que a chave permanece fechada, o que corresponde a sua razão cíclica (*duty cycle*).

De forma simplificada o conversor Buck opera em dois estados definidos pelo seu chaveamento, durante o período em que a chave está fechada ou conduzindo o diodo polariza-se reversamente, pois a tensão no seu cátodo é maior que em seu ânodo. Nessa etapa a fonte de tensão fornece energia, tanto para o indutor quanto para a carga e o indutor passa a armazenar energia, enquanto sua corrente tende a crescer.

Quando a chave está aberta ou bloqueada, não há mais circulação de corrente indo diretamente da fonte de tensão para o circuito. O diodo entra em condução e fornece um caminho, para a passagem da corrente no indutor que entrega a energia anteriormente armazenada ao capacitor.

III. MODOS DE CONDUÇÃO

O conversor Buck pode operar em três modos de condução, são eles: o modo de condução contínua (MCC), o modo de condução descontínua (MCD) e o modo de condução crítica (MCCr). Segundo [8] essas condições são determinadas de acordo com o valor do indutor empregado

na topologia, mantendo-se a frequência de chaveamento e os demais parâmetros de entrada e saída.

No MCC o conversor Buck apresenta como característica do seu funcionamento, o fato de o indutor nunca descarregar sua energia por completo e, portanto, sua corrente se manter sempre maior que zero. Neste modo, existe um valor de indutância mínima necessária para a manutenção do modo de condução contínua, a qual é dada por,

$$L_{min} = \frac{(1 - D)R}{2f} \quad (1)$$

No MCD o conversor Buck apresenta como característica do seu funcionamento, o fato de o indutor se descarregar por completo antes do final do ciclo, ou seja, a corrente no indutor será igual a zero num intervalo de tempo $t_{off} - t_o$.

O MCCr de acordo com [9] é o limiar entre os modos de condução contínua e descontínua, nesse modo de condução o indutor tende a se descarregar por completo exatamente no instante de encerramento do chaveamento, ou seja, no instante $t = T_s$ como demonstrado na Figura 4.

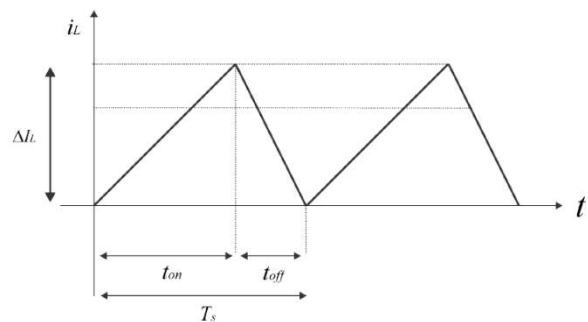


Fig. 4. Forma de onda do MCCr. Fonte: [9]

Como mencionado anteriormente, o valor do indutor é determinante para que o conversor trabalhe em um dos três modos de condução, por isso é necessário determinar a equação que define esse valor e que fará, com que ele opere em MCCr.

Considerando que para a condução no modo crítico, a corrente média no indutor é representada por,

$$I_L = \frac{\Delta i_L}{2} \quad (2)$$

O valor para a indutância crítica é descrito como,

$$L_c = \frac{(V_s - V_o)DT}{2I_L} \quad (3)$$

IV. EQUAÇÕES NO MODO DE CONDUÇÃO CONTÍNUA

O modo de condução adotado para o conversor Buck foi o MCC, isso é explicado devido ao fato de que a potência de saída do VANT é bastante elevada e, portanto, os demais modos de condução MCD e MCCr não conseguem ser

aplicados ao projeto. Na Figura 5, é demonstrado o circuito equivalente com a chave fechada.

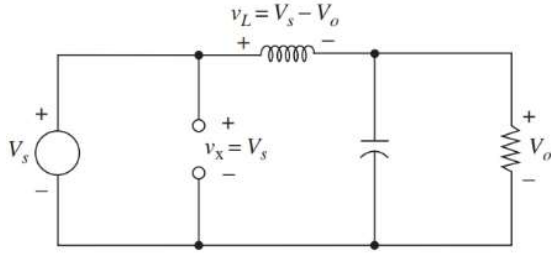


Fig. 5. Circuito equivalente para chave fechada. Fonte: [6]

Quando a chave é fechada, a tensão no indutor é equivalente a,

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (4)$$

A taxa de variação na corrente do indutor é constante, o que indica um aumento em sua corrente. Assim, a Equação (4) pode ser reescrita como,

$$\begin{aligned} \frac{\Delta i_L}{\Delta t} &= \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_s - V_o}{L} \\ \Delta i_{L(fechada)} &= \left(\frac{V_s - V_o}{L} \right) DT \end{aligned} \quad (5)$$

Na Figura 6, é demonstrado o circuito equivalente do conversor Buck quando a chave está aberta.

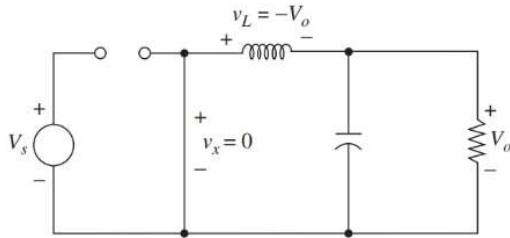


Fig. 6. Circuito equivalente para chave aberta. Fonte: [6]

Nessa condição, a tensão no indutor é dada por,

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{V_o}{L} \quad (6)$$

Diferentemente da chave no estado fechado, a taxa de variação passa a ser uma constante negativa, logo a variação na corrente é dada por,

$$\begin{aligned} \frac{\Delta i_L}{\Delta t} &= \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = -\frac{V_o}{L} \\ \Delta i_{L(aberta)} &= \left(-\frac{V_o}{L} \right) (1-D)T \end{aligned} \quad (7)$$

O funcionamento estável do conversor, exige que a corrente inicial e final no indutor após a finalização do ciclo de chaveamento sejam iguais. Assim,

$$V_o = V_s D \quad (8)$$

Dada a variação das correntes do indutor, os valores máximo e mínimos da sua corrente são calculados como,

$$\begin{aligned} I_{max} &= I_L + \frac{\Delta i_L}{2} \\ I_{min} &= I_L - \frac{\Delta i_L}{2} \end{aligned} \quad (9)$$

Em termos de potência, detalha-se que a que é absorvida pela carga deve ser a mesma fornecida pela fonte. Nesse caso,

$$P_o = \frac{V_o^2}{R} \quad (10)$$

Por fim, a relação entre a ondulação de tensão na saída e o capacitor é dada por,

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1-D}{8LCf^2} \quad (11)$$

Na Figura 7, são evidenciadas as formas de onda para o conversor Buck.

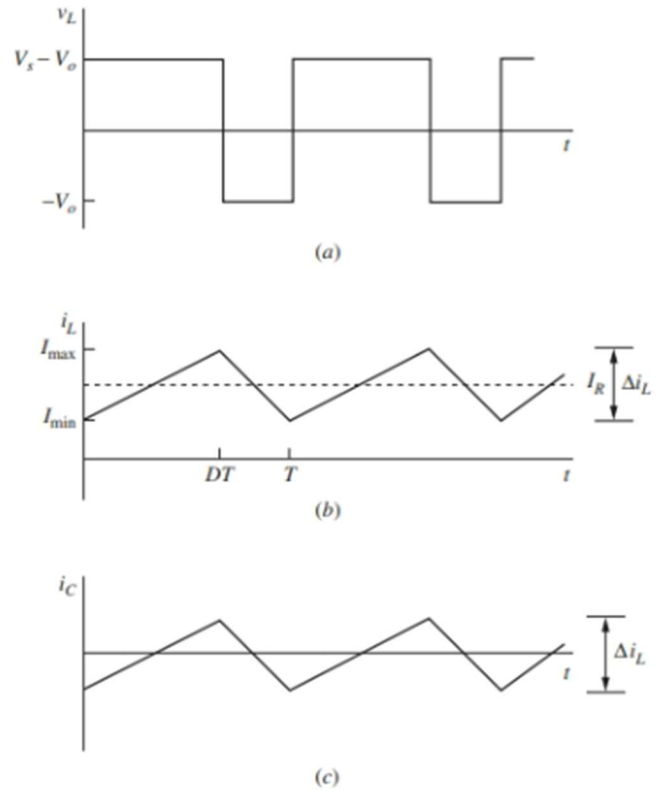


Fig. 7. Formas de onda do conversor Buck (a) tensão no indutor, (b) corrente no indutor e (c) corrente no capacitor. Fonte: [6]

V. METODOLOGIA DE CONTROLE

Os sistemas de controle são referidos como um conjunto de equipamentos e dispositivos que tem por função principal, gerenciar o comportamento de máquinas ou outros sistemas físicos. De acordo com [8], diversos métodos analógicos e digitais existem para melhorar o desempenho das malhas em que determinado sistema está inserido.

Segundo [12] o controlador PI é um compensador de atraso, possuindo um zero em $s = -1/T_i$, e um polo em $s = 0$. Admitindo como características gerais ganho infinito em frequência nula e, portanto, melhorando a condição em regime permanente. A lei de controle aplicada ao conversor PI, é descrita por,

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right) \quad (12)$$

Onde $e(t)$ é o sinal de erro e os parâmetros K e T_i são o ganho proporcional e o tempo integral, respectivamente.

Os controladores em geral são compostos por três parâmetros principais, são eles: proporcional, integral e derivativo os quais são ajustados a fim de otimizar o sistema. A partir deles, são formulados todos os principais controladores, tais como:

- Controlador Proporcional (P): Apresenta somente ação proporcional;
- Controlador Proporcional e Integral (PI): Apresenta ação proporcional e integral;
- Controlador Proporcional e Derivativo (PD): Apresenta ação proporcional e derivativa;
- Controlador Proporcional, Integral e Derivativo (PID): Apresenta ação proporcional, integral e derivativa.

A ação proporcional é gerada ao sinal de erro em função do tempo. Onde Segundo [11], o controlador proporcional pode ser entendido como uma espécie de amplificador com ganho ajustável, de forma que quanto maior a proporção do erro do processo, maior será a ação de controle gerada.

Na ação integral a atuação baseia-se na ideia de confirmar, que a saída do processo esteja com o valor determinado como sendo o *set-point*. Por fim, a principal função da ação derivativa é melhorar a estabilidade do sistema em malha fechada [11]. Portanto, pode-se dizer então que ela tem característica antecipativa, ou preditiva, e objetiva fazer com que o sistema reaja de forma mais rápida.

A. Função de Transferência

Segundo [12] a função de transferência é representada pela relação entre a saída e a entrada de um sistema no domínio do tempo e da frequência, admitindo-se que todas as condições iniciais são nulas. A função de transferência normalmente é aplicada na análise de circuitos eletrônicos analógicos de entrada e saída única, processamento de sinais, teoria da comunicação, teoria de controle e análise de circuitos.

Para a obtenção da função de transferência do conversor Buck, utilizou-se das regras de sintonia de Ziegler-Nichols que consiste na aplicação de um degrau ao sistema, com o intuito de analisar o comportamento da tensão de saída como demonstrado na Figura 8.

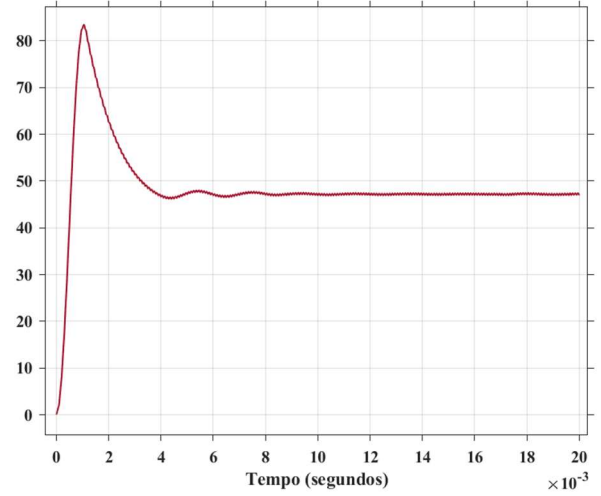


Fig. 8. Resposta ao degrau do sistema. Fonte: [Autor]

Através da análise da Figura 8, é perceptível que o sistema apresenta uma resposta transitória de segunda ordem. Essa resposta apresenta parâmetros conhecidos, os quais podem ser vistos na Figura 9.

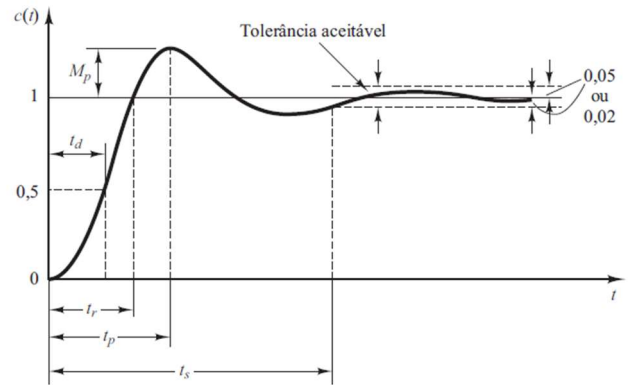


Fig. 9. Curva de resposta ao degrau unitário. Fonte: [12]

Todos esses parâmetros, podem ser retirados da resposta da tensão de saída do conversor Buck, porém para simplificar a análise e posteriormente encontrar a função de transferência, foi preferível utilizar apenas o máximo sobressinal e o tempo de acomodação. O M_p (máximo sobressinal) é descrito por,

$$M_p = e^{-(\zeta/\sqrt{1-\zeta^2})\pi} \quad (13)$$

E o valor de t_s (tempo de acomodação), é dado por,

$$\begin{aligned} (\%2) \quad t_s &= \frac{4}{\zeta \omega_n} \\ (\%5) \quad t_s &= \frac{3}{\zeta \omega_n} \end{aligned} \quad (14)$$

Os demais parâmetros, relacionados na Figura 9, são:

- t_p (tempo de pico);
- t_r (tempo de subida);
- t_d (tempo de atraso).

Uma característica peculiar dos sistemas de segunda ordem, é segundo [12], que o comportamento dinâmico destes pode ser descrito em termos de ζ e ω_n , que são o coeficiente de amortecimento do sistema e a frequência natural não amortecida, respectivamente. Estes parâmetros estão inseridos diretamente, nas Equações (13) e (14).

O valor encontrado para o máximo sobressinal do sistema foi de 43,37% o qual pode ser relacionado através da Figura 10 com o coeficiente de amortecimento do sistema. Sendo assim, o valor encontrado para $\zeta = 0,25$.

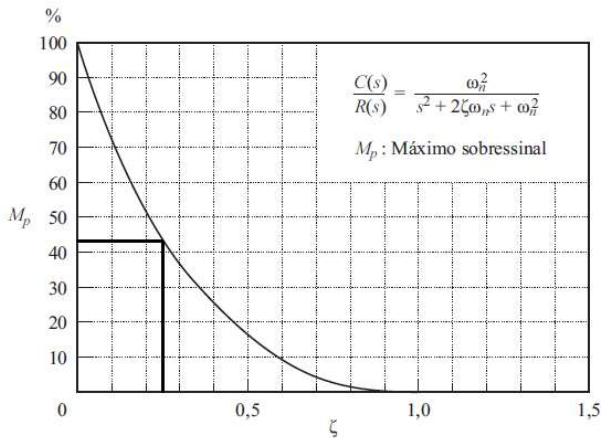


Fig. 10. Curva de M_p versus ζ . Fonte: Adaptado de [12]

O valor do tempo de acomodação foi de 5 ms adotando um critério de análise para 5% e, portanto, o valor de $\omega_n = 2400$ rad/s. Logo, de posse do valor calculado dos parâmetros é possível determinar a função de transferência que é representada por,

$$\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (15)$$

Assim, a função de transferência que será utilizada para o controle da tensão de saída do conversor Buck, é descrita como,

$$\frac{5,76 \cdot 10^6}{s^2 + 2,88 \cdot 10^6 s + 5,76 \cdot 10^6} \quad (16)$$

B. Técnicas de Controle Clássico Aplicada aos Conversores

A metodologia de controle clássico realizado através de uma função de transferência, com aplicação direta a conversores, consiste basicamente na realimentação do sinal de saída do sistema. Logo, a malha de controle é composta por um somador, que utiliza uma tensão de referência para fazer a comparação entre a tensão de saída do conversor e do circuito controlador como evidenciado na Figura 11.

Apesar do conversor Buck poder atuar nos três modos de condução, de acordo com [8] o controlador de tensão não é

influenciado por estas mudanças, o que implica dizer que não há a necessidade de projetá-lo especificamente para a operação em cada um dos modos de condução.

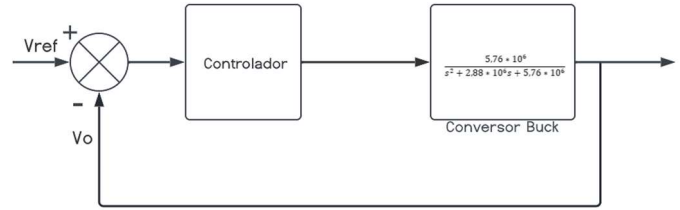


Fig. 11. Malha de controle básica. Fonte: [Autor]

VI. PROJETO DO CONVERSOR BUCK

A. Parâmetros do Projeto

Para o desenvolvimento do projeto do conversor Buck, foram utilizados como base os parâmetros demonstrados na Tabela I. Os valores de tensão de entrada e saída bem como da potência de saída, foram especificados a partir do modelo DJI TRELLO que opera em condições similares.

Além disso, a frequência de operação foi assim determinada, a fim de evitar ruídos de áudio durante a operação [6]. Ainda segundo [6] o valor utilizado para a indutância do indutor, deve ser acrescido de 25%, para que sejam mantidos bons padrões de projeto.

Tabela I. Parâmetros de projeto. Fonte: [Autor]

Parâmetros do Conversor Buck	
Tensão de Entrada	400 V
Tensão de Saída	48 V
Frequência de Chaveamento	10 kHz
Potência de Saída	100 W
Oscilação da Tensão de Saída	1%

De posse das Equações (1), (5), (8), (9), (10) e (11) descritas no item IV deste artigo, é possível determinar o valor dos componentes do conversor Buck, que farão com que ele opere de acordo com as características desejadas. A Tabela II, apresenta os valores calculados para os componentes do conversor Buck.

Tabela II. Valores calculados. Fonte: [Autor]

Valores Calculados dos Componentes	
Razão cíclica de Trabalho	0,12
Carga equivalente	23 Ω
Indutância	1,25 mH
Capacitância	88 μ F
Variação de corrente no indutor	3,38 A
Corrente máxima no indutor	3,77 A
Corrente mínima no indutor	0,4 A

B. Resistência do Capacitor

Outro parâmetro determinante para a construção do circuito do conversor Buck é o capacitor. Onde, de acordo com [6], um capacitor real pode ser modelado como uma

capacitância com uma resistência em série (RES) e uma indutância em série (LES), cuja relação é dada por,

$$\Delta V_{o,RES} = \Delta i_C r_C = \Delta i_L r_C \quad (17)$$

Assim, o valor encontrado para a resistência em série do capacitor foi de $0,14 \Omega$. O valor de capacitância que atende diretamente o valor de RES encontrado é $470 \mu F$, consequentemente adotado para o projeto do conversor Buck.

Por fim, utilizando-se de valores comerciais para o projeto, os componentes finais adotados para o conversor Buck, são:

- Carga Equivalente: 24Ω ;
- Capacitor: $470 \mu F$;
- Indutor: $1,25 mH$.

Na Figura 12, é demonstrado a implementação do conversor Buck no Matlab-Simulink®.

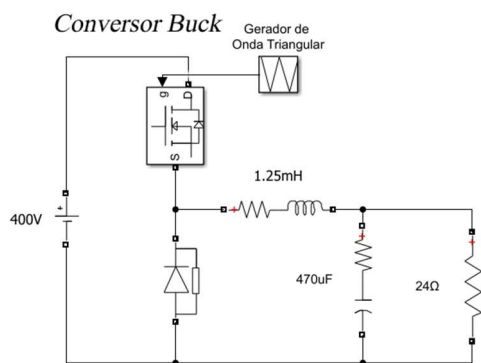


Fig. 12. Implementação do conversor Buck. Fonte: [Autor]

VII. PROJETO DO CONTROLADOR DE TENSÃO

De posse da função de transferência encontrada na Equação (16), é possível determinar os ganhos associados ao controlador fazendo a realimentação do sistema em malha fechada. Para tanto foi adotado um controlador PI (proporcional – integral), que de acordo com [8] possui grande simplicidade e consegue obter bons resultados, já que possui erro nulo de regime permanente e alta velocidade de resposta.

Os ganhos do sistema, foram determinados através de uma das ferramentas do Matlab, conhecida como *PID tuning tool* que permite ao usuário o ajuste automatizado dos controladores em suas diversas formas. A interface principal da ferramenta pode ser vista na Figura 13.

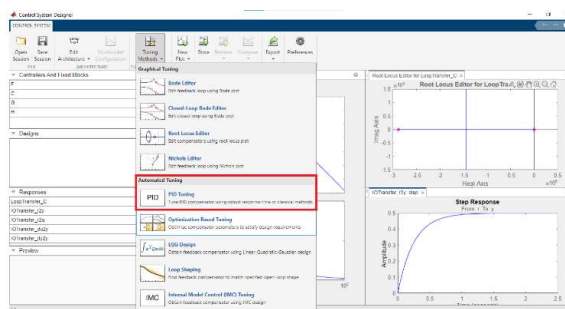


Fig. 13. Interface do *PID tuning tool*. Fonte: [Autor]

A Tabela III, apresenta o valor dos ganhos encontrados para o sistema. A Figura 14, apresenta em destaque o controle de tensão aplicado ao conversor Buck.

Tabela III. Ganhos do controlador PI. Fonte: [Autor]

Ganhos do Controlador PI	
K_p	$11,67$
K_i	$0,1$

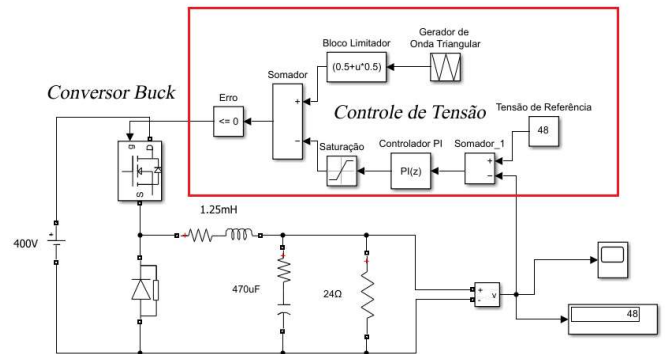


Fig. 14. Controlador PI. Fonte: [Autor]

O controle funciona com base numa tensão de referência especificada, a qual é comparada com a tensão de saída do sistema. Esse sinal, é enviado ao controlador PI que por sua vez passa por um bloco de saturação, o qual produz um sinal de saída que é o valor do sinal de entrada, limitado aos valores de saturação superior e inferior (-1 a 1), sendo esse sinal enviado a um somador. Do outro lado, é aplicado um gerador de onda triangular, com $10 kHz$ de frequência, o qual é enviado a um bloco limitador e passa diretamente ao somador, cujo sinal é enviado ao bloco comparador que realiza a atenuação do erro do sistema, esse sinal gera o pulso necessário para a ativação do chaveamento do conversor.

VIII. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item serão apresentados os resultados obtidos através da simulação do conversor Buck, em conjunto com o controlador de tensão.

A. Formas de Onda

A fim de verificar a eficiência do projeto do conversor Buck controlado, foi desenvolvido o modelo completo de simulação no Matlab-Simulink®. A simulação foi operada sob plenas condições de carga, modo de condução contínua e controle em malha fechada.

Após a simulação os resultados obtidos para as formas de onda da tensão e corrente no indutor, podem ser vistos através da Figura 15. O destaque dado a esse componente, deve-se ao fato de ele ser primordial para que o conversor opere no modo de condução contínua. Outro detalhe que pode ser observado, diz respeito a variação da corrente no indutor que parte de $0,4 A$ à aproximadamente $3,70 A$, esse fato pode ser explicado devido ao ciclo de chaveamento que faz com que o indutor armazene energia com a chave fechada, e posteriormente libere essa energia quando a chave é aberta.

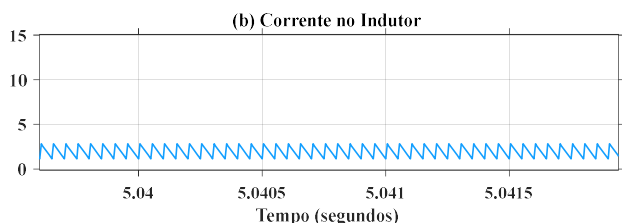
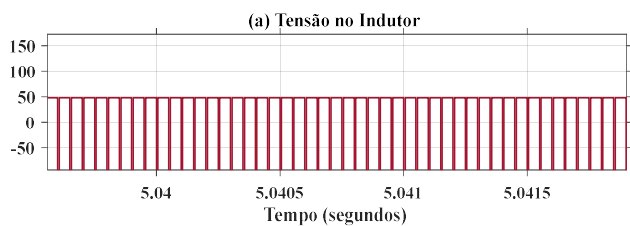


Fig. 15. Forma de onda – (a) tensão no indutor, (b) corrente no indutor. Fonte: [Autor]

Além disso, a ondulação da tensão na saída do conversor é demonstrada na Figura 16. Nota-se que existe uma variação mais evidente, em torno dos valores de tensão de saída do sistema não controlado (azul). Em contrapartida, é possível perceber que após o controle do sistema a tensão manteve-se estável (vermelho), apresentando mínimas variações, o que se configura como um bom resultado.

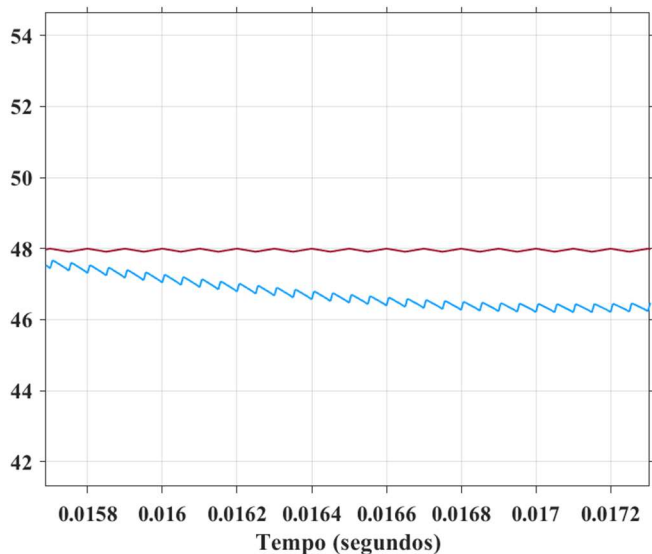


Fig. 16. Forma de onda – tensão de saída. Fonte: [Autor]

Percebe-se que ambos os parâmetros, respondem corretamente as formas de onda explícitas na literatura, mantendo também os valores de simulação bem próximos dos valores calculados e mostrados nas Tabelas I e II. O que constata de uma forma geral, a eficiência da simulação e o bom funcionamento do conversor Buck.

B. Controlador PI

Os ganhos adotados para o sistema de controle, foram aqueles encontrados através da ferramenta *PID tuning tool* do Matlab e descritos no item VII deste artigo, esses valores fizeram com que o controlador PI, garantisse uma maior estabilidade ao sistema. Através de um *script* básico em Matlab (Figura 17), é possível encontrar a resposta ao degrau

(Figura 18), o diagrama de Bode (Figura 19) e o lugar geométrico das raízes (Figura 20) do sistema controlado e em malha fechada.

```

clc
clear
s = tf('s');
A = 5.76e6;
B = 2.88e6;
%Ganhos do sistema.
kp = 11.67;
ki = 0.1;
kd = 0;
%Função de transferência da planta.
Ps = A/(s^2+B*s+A);
%Função de transferência do controlador.
Gc = pid(kp,ki,kd);
%Função de transferência do controle em malha fechada.
Psc = feedback(Ps*Gc,1,-1);
%Gráficos de (Resposta ao Degrau, Diagrama de Bode e LGR).
figure(1); step(Psc);
figure(2); bode(Psc);
figure(3); rlocus(Psc);

```

Fig. 17. Script em Matlab. Fonte: [Autor]

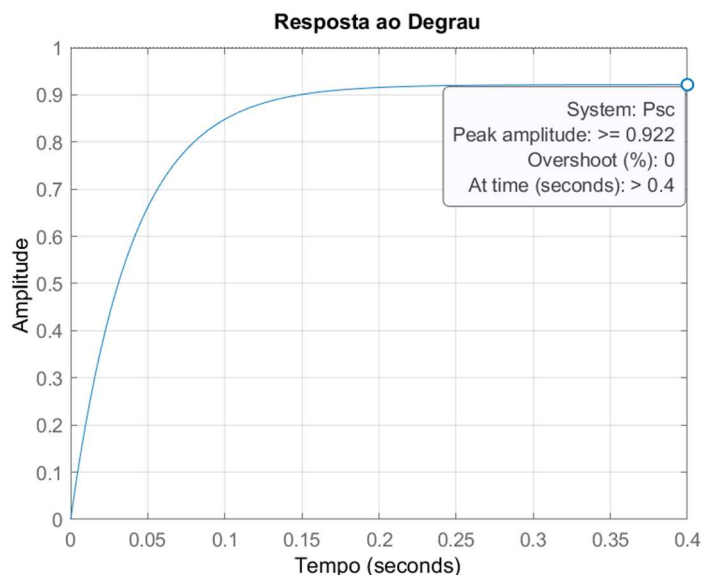


Fig. 18. Resposta ao degrau do sistema. Fonte: [Autor]

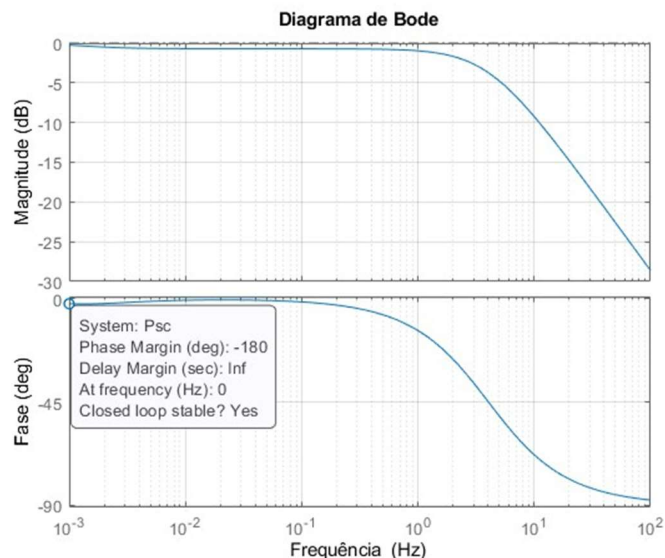


Fig. 19. Diagrama de bode do sistema. Fonte: [Autor]

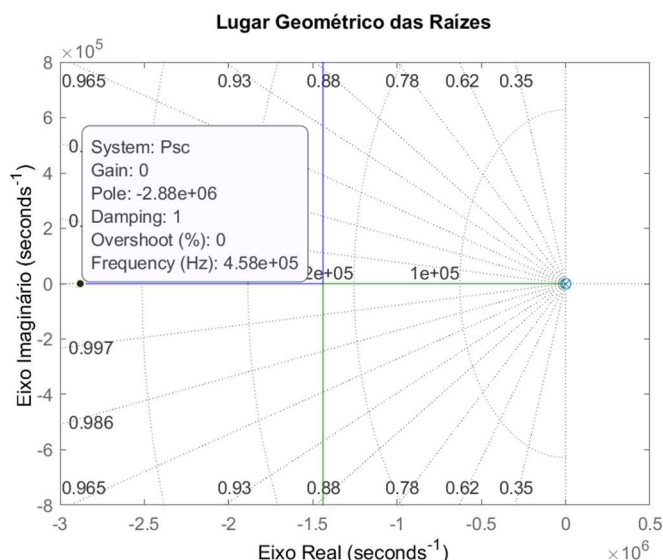


Fig. 20. Lugar geométrico das raízes. Fonte: [Autor]

Através da resposta em degrau, nota-se que o *overshoot* apresentado pelo sistema está em 0%, e a margem de fase encontrada no diagrama de bode é de -180° . Essas características demonstram que o sistema é estável, apesar de apresentar um erro em regime permanente de 0,8% o que é considerado um valor aceitável. Além disso, a margem de fase se encontra no limiar desejado e o tempo para alcançar o regime permanente é baixo, o que indica que o sistema terá uma resposta rápida de atuação.

A análise do lugar geométrico das raízes, indica que os polos em malha fechada do sistema situam-se no semiplano esquerdo de s . O que é evidenciado na resposta de um sistema subamortecido, já que o coeficiente de amortecimento do sistema varia de 0 a 1, sendo especificamente 0,25 para este sistema.

C. Variação na Carga

Uma análise importante para a aplicação direta onde o sistema será empregado, é a verificação da variação de carga, uma vez em que, os VANT's podem sofrer essa mudança e é necessário avaliar como o sistema irá se comportar quando submetido a essas alterações.

Para tanto, foram simulados valores inferiores e superiores a carga equivalente, calculada como ideal para o conversor (24Ω) em relação a tensão de saída estipulada em 48 V. Os resultados, são demonstrados na Tabela IV e na Figura 21, que apresentam os valores médios e a variação de tensão, bem como o erro apresentado pelo sistema após a simulação.

Tabela IV. Variações na carga. Fonte: [Autor]

Carga Equivalente	Tensão de Saída	Potência de Saída	Erro
15 Ω	47,73 V	153,6 W	0,56%
20 Ω	47,85 V	115,2 W	0,31%
24 Ω	48,00 V	≈ 100 W	0%
50 Ω	47,99 V	46,08 W	0,020%
100 Ω	47,98 V	23,04 W	0,042%

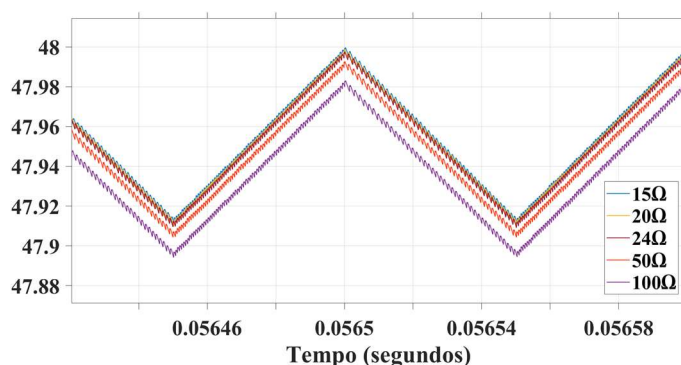


Fig. 21. Variação de Carga. Fonte: [Autor]

Valores extremos para a carga equivalente, acabam gerando distúrbios no sistema, uma vez em que, elevam ou diminuem a potência de saída demasiadamente, fazendo assim com que o erro do sistema aumente. Porém consegue-se manter a estabilidade, em potências variando próximo ao dobro de sua potência de saída. Por fim nota-se, que o controlador PI, consegue reagir bem a essas alterações de carga e garante a manutenção da tensão de saída nos 48 V desejados para o projeto. Esse fator, demonstra que o sistema tem uma boa resposta, e é aplicável ao problema proposto neste artigo.

IX. CONCLUSÃO

Ao longo deste artigo, foi abordado o estudo de funcionamento do conversor Buck, seu controle e simulação através do *Software* Matlab-Simulink®. As técnicas empregadas para a construção deste projeto, objetivaram sua utilização em dispositivos aéreos não tripulados (VANT's), a fim deste tornar-se uma solução viável para a resolução do problema do baixo tempo de autonomia destas aeronaves.

Primeiramente foram apresentados os elementos passivos que compõem o circuito do conversor e, em seguida, foi exposta a metodologia de controle a ser empregada. E logo após, a discussão sobre os parâmetros para a modelagem do conversor tipo Buck. Com os recursos e bibliotecas disponíveis no Matlab-Simulink®, foi desenvolvido um modelo de circuito para o conversor Buck em malha fechada a fim de satisfazer os parâmetros propostos, e analisou-se o desempenho do sistema a partir do modelo criado.

Após as simulações, a análise dos resultados obtidos demonstra a eficácia do projeto, ou seja, estão de acordo com as especificações definidas para o VANT. O controle de tensão, mostrou-se eficiente obtendo um *overshoot* de 0% e margem de fase de -180° , em contrapartida existe um erro de 0,8% em regime permanente, mas ainda assim, o sistema permanece estável. Além disso, o controle consegue ser mantido mesmo diante de variações na carga demonstrando um erro mínimo nos valores de tensão de saída, característica que é fundamental para a aplicabilidade deste sistema nos VANT's.

Perspectivas futuras para este trabalho englobam, a implementação do sistema simulado em uma placa de circuito impresso, com o intuito de observar o seu desempenho utilizando-se de componentes reais, e posteriormente, a comprovação técnica do projeto aplicando-o ao VANT.

REFERÊNCIAS

- [1] BASCOPÉ, G. V. T. Nova Família de Conversores CC-CC PWM não Isolados Utilizando Células de Comutação de Três Estados. Tese (Doutor em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
- [2] ANJOS, G. S. D. Estudo e Desenvolvimento da Aplicação de um Sistema Fotovoltaico em Drones. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- [3] DRONEIMAGES: Coloque suas ideias em prática. Disponível em: <<https://dronefilme.com.br/home>> Acesso em: 15 de Junho de 2022.
- [4] JÚNIOR, A. C. D. O. et al. Casos de Uso e Requisitos para as Redes 6G. Rev Brasil 6G, Minas Gerais, 2021.
- [5] EMADI, S. A.; MOHANNADI, A. A. Towards Enhancement of Network Communication Architectures and Routing Protocols for FANETs: a survey. Qatar University, Doha, 2020.
- [6] HART, D. W. Eletrônica de Potência: análise de projeto e circuitos. 1 ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2012.
- [7] FUSER, R. Projeto de Controladores Robustos Sujeito a Falhas no Atuador: uma aplicação ao conversor buck-boost. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Eletrônica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2014.
- [8] ROGGLIA, L. Estudo, Controle e Implementação do Conversor Boost PFC Operando no Modo de Condução Mista. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.
- [9] FERETTI, P. H. Conversor Buck-Boost Baseado na Célula de Comutação de Três Estados. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, 2017.
- [10] DEUS, F. R. A. D. Estudo Comparativo entre Técnicas de Controle Aplicadas em um Conversor Buck. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2018.
- [11] ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. PID controllers: theory, design, and tuning. [S.l.]: Isa Research Triangle Park, NC, 1995. v. 2. 3, 4, 5.
- [12] OGATA, K. Engenharia de Controle Moderno. 5 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.