

Modelagem, Desenvolvimento e Simulação Computacional dos Conversores Buck e Boost em Python

Arthur Land Oliveira
oliveira.arthur@unemat.br

2025/2

Conteúdo

1	Introdução	3
2	Fundamentação Teórica	3
2.1	Funcionamento Geral de Conversores CC-CC	3
3	Modelagem Matemática do Conversor Boost	3
3.1	Análise por Intervalos de Comutação	4
3.2	Derivação da Relação Estática $V_{\text{out}}(D)$	4
3.3	Dimensionamento do Indutor	5
3.4	Dimensionamento do Capacitor	5
3.5	Equações Diferenciais do Boost	5
4	Modelagem Matemática do Conversor Buck	6
4.1	Intervalo ON	6
4.2	Intervalo OFF	6
4.3	Relação Estática	6
4.4	Equações Diferenciais do Buck	6
5	Desenvolvimento Computacional	6
5.1	Código do Conversor Boost	7
5.2	Código do Conversor Buck	7
6	Resultados e Discussão	7
6.1	Boost	7
6.2	Buck	7
7	Conclusão	8
8	Referências	8

1 Introdução

Os conversores CC-CC formam uma classe essencial de dispositivos na eletrônica de potência moderna, permitindo a adequação de níveis de tensão contínua para diferentes aplicações industriais, automotivas e embarcadas. Entre os conversores mais utilizados estão o **Boost** (elevador) e o **Buck** (redutor), amplamente aplicados em fontes chaveadas, carregadores e sistemas baseados em fontes renováveis.

Este relatório apresenta a modelagem matemática completa, o desenvolvimento computacional e a simulação numérica dos conversores Buck e Boost utilizando Python. Os dois códigos desenvolvidos foram utilizados como base para a análise e reescritos em detalhes ao longo deste relatório.

Os arquivos utilizados foram:

- Conversor Boost: `boost arthur.py`
- Conversor Buck: `buck arthur.py`

2 Fundamentação Teórica

2.1 Funcionamento Geral de Conversores CC-CC

Conversores chaveados utilizam comutação em alta frequência, juntamente com elementos reativos (indutor e capacitor), para moldar a energia da fonte e fornecer uma saída contínua. A operação consiste na alternância periódica entre estados ON (chave fechada) e OFF (chave aberta), criando formas de onda descontínuas que são filtradas pelo conjunto LC.

Entre as vantagens:

- Alta eficiência (80–98%);
- Volume reduzido dos elementos reativos devido à alta frequência de chaveamento;
- Controle simples via PWM;
- Fácil integração em sistemas digitais.

3 Modelagem Matemática do Conversor Boost

O conversor Boost pode elevar a tensão de entrada utilizando o armazenamento e a transferência de energia no indutor.

3.1 Análise por Intervalos de Comutação

O período de comutação T_s é dividido em dois intervalos:

Intervalo ON (chave fechada)

- O MOSFET conduz;
- O indutor recebe energia da fonte;
- O capacitor alimenta a carga sozinho.

A tensão no indutor é:

$$v_L = V_{\text{in}}. \quad (1)$$

A variação de corrente no indutor é:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{\text{in}}}{L}. \quad (2)$$

Intervalo OFF (chave aberta)

- O MOSFET não conduz;
- O indutor fornece energia à carga e ao capacitor.

$$v_L = V_{\text{in}} - V_{\text{out}}. \quad (3)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{\text{in}} - V_{\text{out}}}{L}. \quad (4)$$

3.2 Derivação da Relação Estática $V_{\text{out}}(D)$

Em regime permanente, o **valor médio da tensão no indutor** deve ser zero:

$$V_{\text{in}}DT_s + (V_{\text{in}} - V_{\text{out}})(1 - D)T_s = 0. \quad (5)$$

Dividindo por T_s e reorganizando:

$$V_{\text{in}} - V_{\text{out}}(1 - D) = 0, \quad (6)$$

$$V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}}}{1 - D}. \quad (7)$$

Logo:

$$D = \frac{V_{\text{out}} - V_{\text{in}}}{V_{\text{out}}} \quad (8)$$

Esta é a equação usada no código.

3.3 Dimensionamento do Indutor

O ripple de corrente é:

$$\Delta i_L = \frac{V_{\text{in}} D T_s}{L}. \quad (9)$$

Isolando L :

$$L = \frac{V_{\text{in}} D}{f_s \Delta i_L} \quad (10)$$

No código, o ripple é expresso como fração:

$$\Delta i_L = V I l \cdot I_{\text{in}}. \quad (11)$$

3.4 Dimensionamento do Capacitor

A variação de carga no capacitor é:

$$\Delta Q = I_{\text{out}} D T_s. \quad (12)$$

Como $\Delta Q = C \Delta v_o$, então:

$$C = \frac{I_{\text{out}} D}{f_s \Delta v_o}. \quad (13)$$

No código:

$$\Delta v_o = V V l \cdot V_{\text{out}}. \quad (14)$$

3.5 Equações Diferenciais do Boost

Indutor:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{v_L}{L}. \quad (15)$$

Capacitor:

$$C \frac{dv_o}{dt} = i_L - \frac{v_o}{R}. \quad (16)$$

Discretização por Euler:

$$i_L(k+1) = i_L(k) + \frac{v_L(k)}{L} dt, \quad (17)$$

$$v_o(k+1) = v_o(k) + \frac{i_L(k) - v_o(k)/R}{C} dt. \quad (18)$$

4 Modelagem Matemática do Conversor Buck

4.1 Intervalo ON

$$v_L = V_{\text{in}} - V_{\text{out}}. \quad (19)$$

4.2 Intervalo OFF

$$v_L = -V_{\text{out}}. \quad (20)$$

4.3 Relação Estática

Aplicando balanço de volt-segundo:

$$(V_{\text{in}} - V_{\text{out}})D - V_{\text{out}}(1 - D) = 0, \quad (21)$$

resultando em:

$$\boxed{V_{\text{out}} = DV_{\text{in}}} \quad (22)$$

4.4 Equações Diferenciais do Buck

Indutor:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{v_L}{L}. \quad (23)$$

Capacitor:

$$C \frac{dv_o}{dt} = i_L - \frac{v_o}{R}. \quad (24)$$

5 Desenvolvimento Computacional

Os modelos foram implementados em Python, utilizando integração numérica explícita (Euler). A separação entre estados ON e OFF foi definida via operação de módulo no período de chaveamento.

5.1 Código do Conversor Boost

boost arthur.py

5.2 Código do Conversor Buck

buck arthur.py

6 Resultados e Discussão

6.1 Boost

Os resultados mostram que a tensão converge para aproximadamente 250 V, com ripple coerente com o dimensionamento do capacitor. O duty cycle de aproximadamente 60% está de acordo com a teoria. Assim como mostra a figura 1.

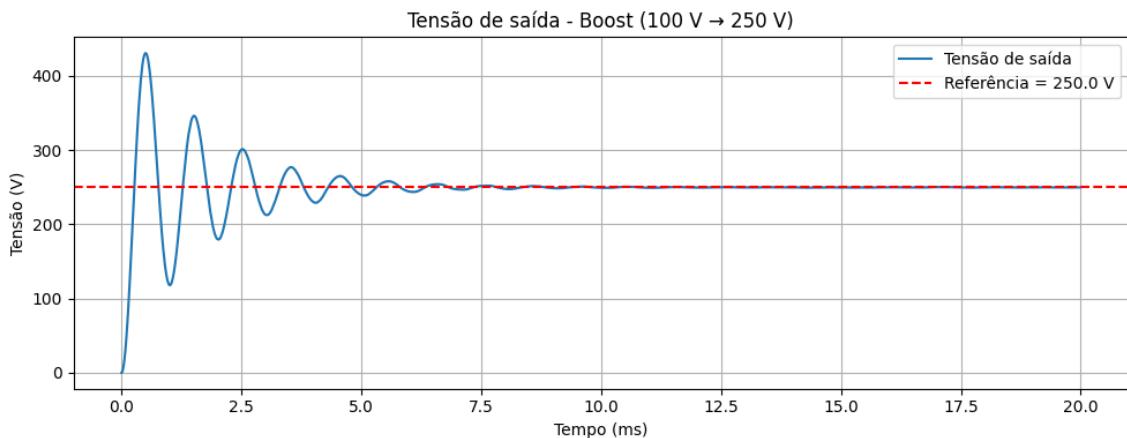


Figura 1: Tensão de saída - Boost

6.2 Buck

A tensão converge para cerca de 18 V, conforme previsto pela relação $V_{\text{out}} = DV_{\text{in}}$. A ondulação observada é compatível com o valor de 56 μF do capacitor utilizado. Assim como mostra a figura 2.



Figura 2: Tensão de saída - Buck

7 Conclusão

Foi demonstrado que os conversores Buck e Boost podem ser modelados matematicamente com precisão utilizando equações diferenciais simples e simulados numericamente com o método de Euler. Os resultados obtidos validam tanto a modelagem quanto o dimensionamento dos componentes.

O estudo serve como base para aplicações futuras envolvendo controle PWM, malhas de realimentação e implementação experimental em bancada.

8 Referências

- ERICKSON, R.; MAKSIMOVIC, D. *Fundamentals of Power Electronics*.
- MOHAN, N.; UNDULY, T.; ROBBINS, W. *Power Electronics*.
- HART, D. *Power Electronics*.
- Arquivos utilizados: `/mnt/data/boost arthur.py`, `/mnt/data/buck arthur.py`.