

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO
FACULDADE DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

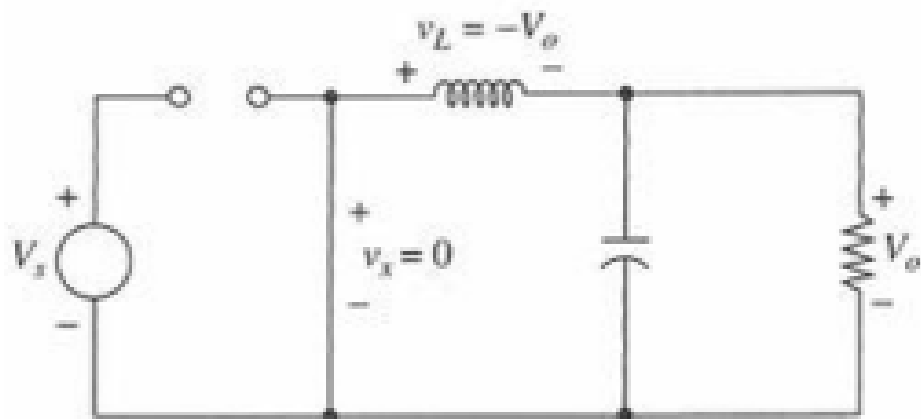
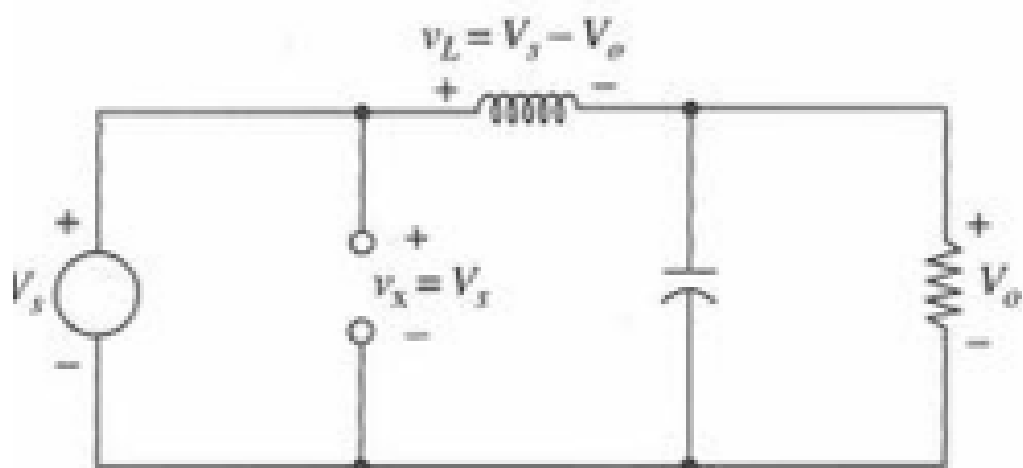
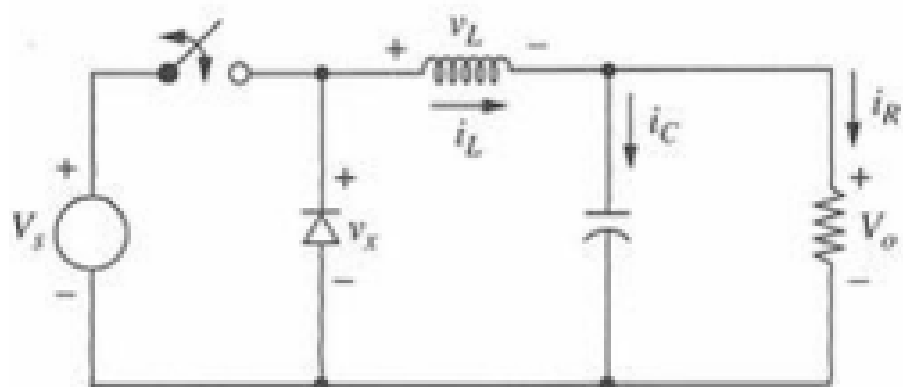
AMANDA JACOBS TAVARES

ELETRÔNICA DE POTÊNCIA - CONVERSOR BUCK

UNEMAT – Campus de Sinop

2025/2

1 INTRODUÇÃO



2 METODOLOGIA DA SIMULAÇÃO

A simulação foi implementada em Python utilizando três módulos principais:

- **numpy** – para manipulação numérica e criação dos vetores de tempo,
- **matplotlib.pyplot** – para construção dos gráficos das grandezas,

```
#IMPORTANDO AS BIBLIOTECAS
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
```

PARÂMETROS UTILIZADOS

```
#Parâmetros
Vin = 50      #tensão de entrada (V)
Vout = 20     #tensão desejada na saída
L = 1.2e-3    #indutância do indutor (H) = 1,2 mH
R = 4.0       #resistência de carga ( $\Omega$ )
C = 15.63e-6  #capacitância do capacitor de saída (F)
Fs = 20e3     #frequência de chaveamento (Hz)
Ts = 1 / Fs   #período de chaveamento (s)
```

Projeto conversor buck

① Parâmetros

- Tensão de entrada

$$V_{in} = 50 \text{ V}$$

- Tensão de saída

$$V_{out} = 20 \text{ V}$$

- Potência máxima de saída

$$P_{out} = 100 \text{ W}$$

- Frequência de comutação

$$f_s = 20 \text{ kHz}$$

- Ondulação de corrente no indutor

$$\Delta I_L = 10\%$$

- Ondulação de corrente no capacitor

$$\Delta V_C = 1\%$$

Onde definimos os parâmetros iniciais.

$F_s = 20\text{e}3$ define a frequência de chaveamento em 20 kHz. Produz um período $T_s = 1 / F_s = 50 \text{ us}$. Dentro desse período, teremos 40 % ON e 60 % OFF.

A frequência de 20 kHz foi escolhida porque fica acima da faixa audível, evitando ruídos, e ao mesmo tempo mantém perdas moderadas nos componentes. Também permite usar um indutor de tamanho adequado e simplifica os cálculos do projeto. Por isso, é um valor padrão que é amplamente utilizado em conversores Buck básicos.

② Cálculo dos valores nominais

• Duty cycle:

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{20}{50} = 0,4$$

• Corrente de saída:

$$I_o = \frac{P_{out}}{V_{out}} = \frac{100}{20} = 5A$$

• Resistência da carga:

$$R_o = \frac{V_{out}^2}{P_{out}} = \frac{20^2}{100} = 4\Omega$$

Calculamos o I, R e o Duty cycle:

$I = 5A$

$R = 4\text{ ohms}$ Calcula-se R para que a potência máxima de 100W seja atingida em 20V

$D = 0,4$

③ Projeto do indutor

$$L_o = \frac{(V_{in} - V_{out}) \cdot D}{f_s \cdot \Delta I_o} = \frac{(50 - 20) \cdot 0,4}{20 \cdot 10^3 \cdot (0,10 \cdot 5A)} = 1,2 \text{ mH}$$

④ Projeto do capacitor

$$C_o = \frac{\Delta V_o}{B \cdot f_s \cdot \Delta V_o} = \frac{0,10 \cdot 5}{8 \cdot (2\pi \cdot 10^3) \cdot (0,01 \cdot 20)} = 15,63 \mu F$$

Calculamos L e C

$L = 1.2e-3$ (corresponde ao valor do indutor calculado para que o ripple da corrente fosse de 10% da corrente da saída)

O ripple da corrente foi definido em 10% porque é uma escolha segura e conservadora, amplamente aceita em projetos de conversores buck, garantindo operação contínua, baixa ondulação e melhor desempenho em carga sensível.

$C = 15.63e-6$ (corresponde ao valor do capacitor calculado para que o ripple da tensão fosse de 1% da tensão de saída)

O ripple de tensão é normalmente escolhido como 1% da tensão de saída porque esse é um padrão de qualidade adotado em projetos de fontes chaveadas.

LOOP DE INTERAÇÃO

```
# Loop de integração (Euler explícito)
for k in range(len(t) - 1):
    t_cycle = t[k] % Ts
    # Determinar ON ou OFF
    if t_cycle < D * Ts:
        vL = Vin - vout[k]  # ON: tensão no indutor
    else:
        vL = -vout[k]       # OFF: tensão no indutor

    # Atualizar corrente do indutor
    iL[k + 1] = iL[k] + (vL / L) * dt

    # Atualizar tensão do capacitor
    i_load = vout[k] / R
    vout[k + 1] = vout[k] + (iL[k] - i_load) / C * dt
```

Funcionamento do Loop Principal

1. Determinar ON/OFF

- $t_cycle = t[k] \% Ts$ calcula o tempo dentro do período (0 a 50 μs).
- Se $t_cycle < D * Ts \rightarrow$ **ON**; caso contrário \rightarrow **OFF**.
- ON = primeiros 20 μs ; OFF = próximos 30 μs .

2. Tensão no Indutor (v_L)

- **ON**: $v_L = V_{in} - v_{out}[k] \rightarrow$ indutor recebe energia \rightarrow corrente sobe.
- **OFF**: $v_L = -v_{out}[k] \rightarrow$ indutor descarrega no capacitor/carga \rightarrow corrente desce.

3. Atualizar corrente do indutor (Euler)

- Equação usada:
 $i_L[k+1] = i_L[k] + (v_L/L) * dt$

- v_L positivo \rightarrow corrente aumenta.
- v_L negativo \rightarrow corrente diminui.
- A forma final é um **triângulo típico de Buck**.

4. Atualizar tensão do capacitor

- Corrente da carga: $i_{load} = v_{out}[k] / R$.
- Corrente líquida no capacitor: $i_L[k] - i_{load}$.
- Atualização:
 $v_{out}[k+1] = v_{out}[k] + (i_L[k] - i_{load})/C * dt$.
- Se $i_L > i_{load} \rightarrow v_{out}$ sobe.
- Se $i_L < i_{load} \rightarrow v_{out}$ cai.

5. Papel do capacitor

- Suaviza a tensão de saída, evitando forma triangular.
- Reduz oscilação (overshoot e undershoot).
- Leva o sistema à estabilização com ripple pequeno.

3 RESULTADOS

```
# Plot dos resultados
plt.figure(figsize=(10, 4))
plt.plot(t * 1e3, vout, label='Tensão de Saída (vout)')
plt.axhline(Vout, color='red', linestyle='--', label=f'Média Teórica = {Vout:.1f} V')
plt.title('Resposta Transitória e Estabilização da Tensão de Saída (50 V → 20 V)')
plt.xlabel('Tempo (ms)')
plt.ylabel('Tensão (V)')
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.show()
```

plt.plot(t * 1e3, vout)

- **O que faz:** plota a tensão de saída no tempo.
- **Por que multiplicar por 1000:** converte segundos para **ms**, facilitando a leitura (0 a 5 ms).
- **Impacto:** mostra claramente o comportamento da tensão: sobe de 0 V, oscila e depois estabiliza.

plt.axhline(Voutmed, color='red', linestyle='--')

- **O que faz:** desenha uma linha horizontal vermelha.
- **Por que:** representa a **tensão média teórica** do buck.
- **Impacto:** permite ver se a simulação converge para o valor esperado.

plt.tight_layout()

- **O que faz:** ajusta margens automaticamente.
- **Por que:** evita textos cortados.
- **Impacto:** deixa o gráfico mais limpo.

4 ANÁLISE

A tensão do capacitor começa em 900V e vai descarregando. A corrente no indutor começa no zero e vai crescendo à medida que o capacitor descarrega. Após atingir o pico, a corrente começa a diminuir à medida que o indutor devolve energia ao circuito. Esse pico de corrente acontece exatamente no instante em que a tensão do capacitor chega a zero, pois, nesse momento, toda a energia que estava armazenada no capacitor já foi transferida para o indutor. Logo após esse ponto, o indutor começa a devolver energia ao circuito, o que faz a tensão do capacitor ficar ligeiramente negativa, atingindo aproximadamente -200 V . Esse comportamento ocorre porque, dentro do modelo matemático utilizado, o diodo não limita completamente a tensão, permitindo essa pequena inversão de polaridade. Em seguida, com o diodo conduzindo, o resistor passa a dissipar a energia remanescente e a tensão negativa vai diminuindo até se estabilizar novamente em zero, indicando que o sistema perdeu toda a energia armazenada e alcançou o estado final.