

Romário Jonas de Oliveira Veloso

Relatório da 1ª prática

Recife - PE

2024

Romário Jonas de Oliveira Veloso

Relatório da 1ª prática

Relatório Técnico para a disciplina Circuitos
Elétricos 2A, período 2024.1.

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Centro de Tecnologia e Geociências (CTG)

Departamento de Eletrônica e Sistemas (DES)

Recife - PE

2024

1 Introdução

Este relatório explora a implementação e análise de um conversor Buck utilizando simulação computacional, conforme discutido na prática de laboratório (LUIZ, 2023). Especificamente, abordamos uma versão simplificada do conversor, que é fundamental na conversão de tensão contínua de um nível superior para um inferior, operando por meio de técnicas de chaveamento. O estudo foi baseado em conceitos teóricos solidificados por Ahmed (AHMED, 2000) e Boylestad e Nashelsky (BOYLESTAD; NASHELSKY, 1999), cujos textos fundamentam a eletrônica de potência e a teoria de circuitos.

O objetivo principal deste trabalho é familiarizar com ferramentas de álgebra simbólica e cálculo numérico aplicadas à análise de circuitos eletrônicos complexos. A simulação foi realizada utilizando a linguagem Python, com o auxílio das bibliotecas SymPy, para resolução de equações, e Matplotlib, para a visualização dos resultados.

2 Objetivo Geral

Desenvolver a aplicação de ferramentas computacionais avançadas para a modelagem, simulação e análise de conversores Buck, visando aprofundar a compreensão teórica e prática dos sistemas de eletrônica de potência.

3 Objetivos Específicos

- **Aplicar técnicas de álgebra simbólica para modelar o conversor Buck:** Utilizar o SymPy para formular e resolver as equações que descrevem o comportamento do conversor em diferentes condições de operação.
- **Analisar a resposta do sistema em diferentes configurações de chaveamento:** Explorar como a variação no ciclo de trabalho afeta a tensão de saída e a eficiência do conversor.
- **Validar a teoria por meio de simulações computacionais:** Comparar os resultados da simulação com as previsões teóricas para verificar a precisão das modelagens e o entendimento do funcionamento do conversor.

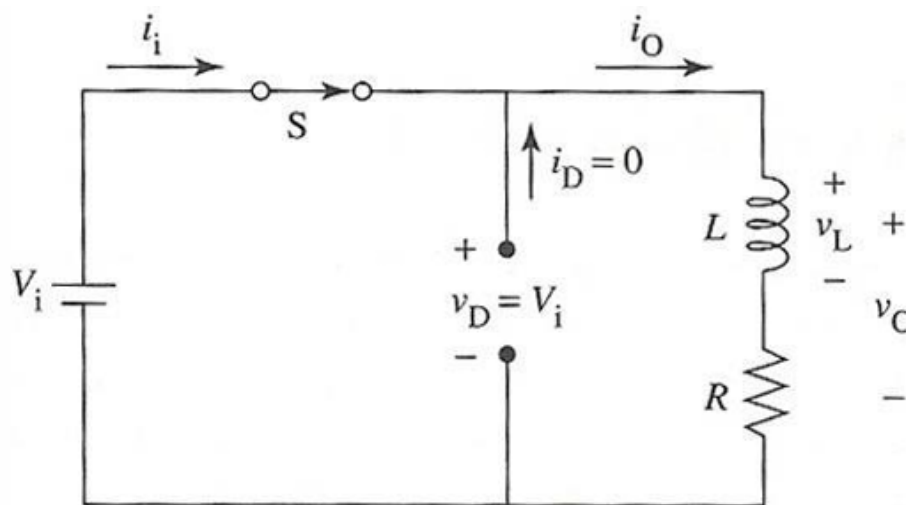
- **Visualizar os resultados para facilitar a interpretação:** Usar a biblioteca Matplotlib para criar representações gráficas que ilustram claramente a variação da tensão de saída em relação ao ciclo de trabalho e outras variáveis operacionais.

Com os objetivos definidos, procedemos com a descrição das metodologias empregadas para realizar as análises e simulações desejadas. Esta seção detalhará os processos adotados, enfatizando a interação entre teoria e prática no ambiente de simulação computacional. A seleção e aplicação correta das ferramentas de software são cruciais para assegurar a integridade e a relevância dos resultados obtidos.

4 Metodologia

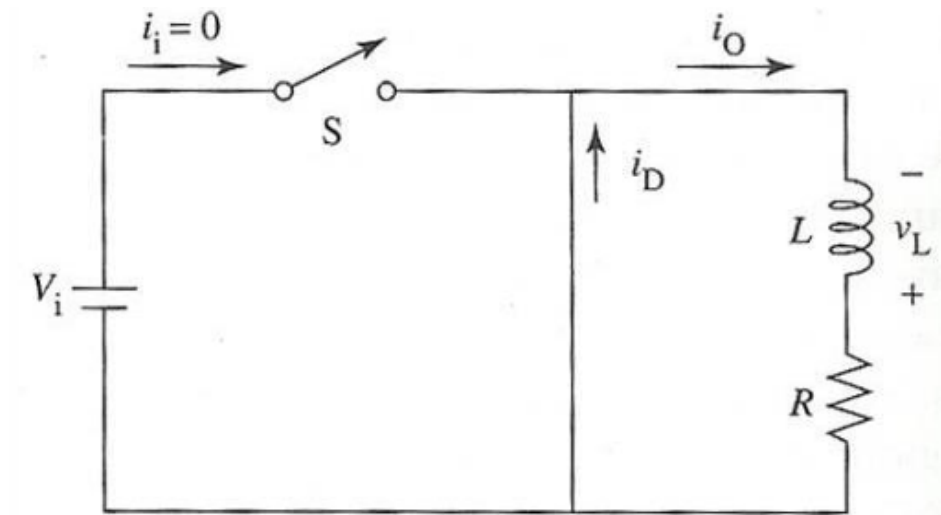
4.1 Parte 1: Conversor de Tensão do Tipo Buck

Nesta parte do estudo, examinamos o funcionamento de um conversor Buck simplificado. O conversor Buck é um dispositivo utilizado para reduzir a tensão de entrada para uma tensão de saída mais baixa através de um processo de chaveamento. A configuração típica consiste em uma chave, um diodo, um indutor e um capacitor, como ilustrado nas figuras abaixo.



Fonte: (AHMED, 2000).

Figura 1 – Diagrama do circuito do conversor Buck com a chave fechada.



Fonte: (AHMED, 2000).

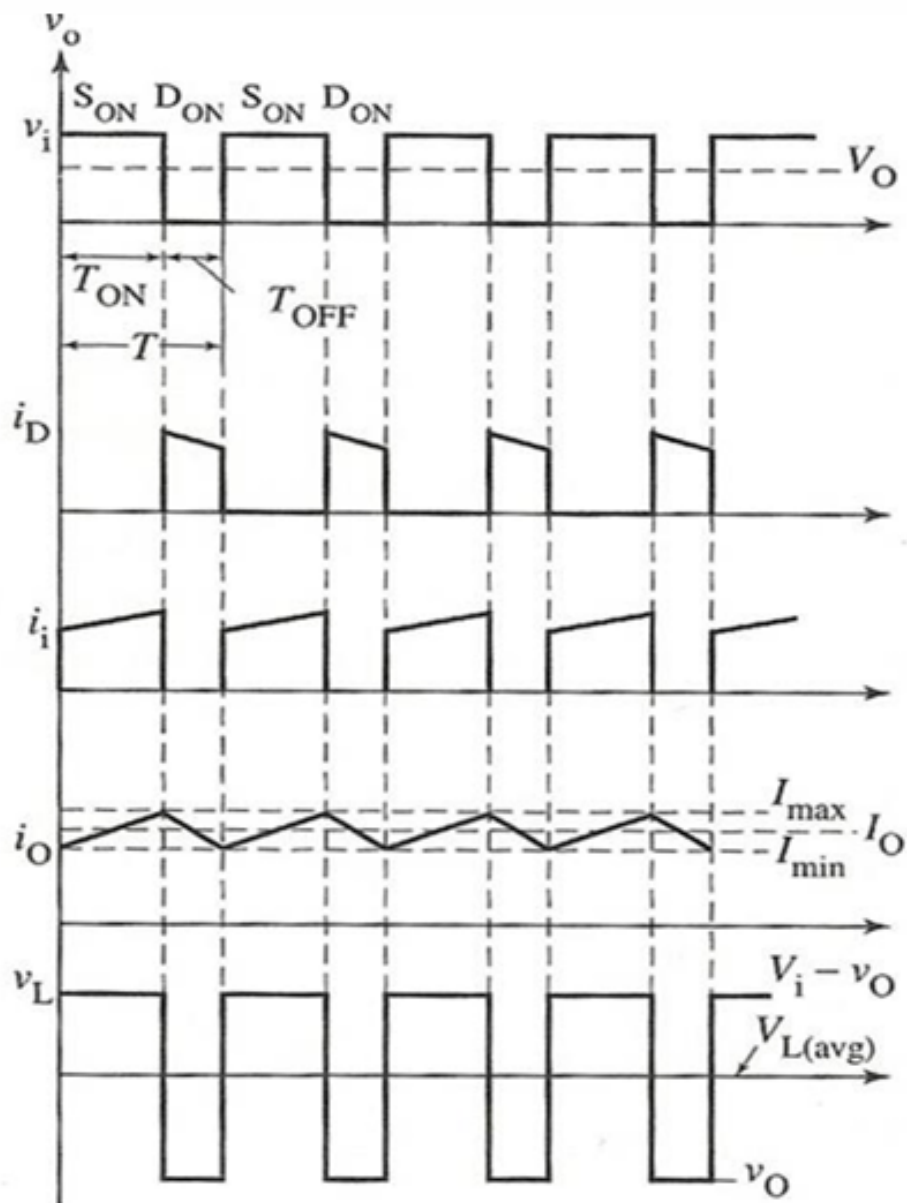
Figura 2 – Diagrama do circuito do conversor Buck com a chave aberta.

- **Modo de Operação da Chave Fechada:** Quando a chave está fechada, o circuito força o diodo a operar em polarização reversa, o que efetivamente impede a passagem de corrente através dele.
- **Modo de Operação da Chave Aberta:** Com a chave aberta, o modo de operação do diodo muda para polarização direta, assumindo que a corrente no indutor é suficientemente alta. Esta condição depende dos valores iniciais e das características do circuito.

A simulação deste circuito foi realizada usando Python com a biblioteca SymPy para modelar e resolver as equações relacionadas ao estado do conversor sob diferentes condições de chaveamento.

4.2 Parte 2: Análise no Tempo

Nesta seção, abordamos a dinâmica temporal do conversor Buck. Utilizamos transformadas de Laplace para modelar a resposta do circuito ao longo do tempo e, posteriormente, aplicamos a transformada inversa de Laplace para retornar ao domínio do tempo.



Fonte: (AHMED, 2000).

Figura 3 – Representação gráfica da continuidade da corrente no indutor.

Devido à continuidade da corrente no indutor, temos que:

$$\lim_{t \rightarrow t_1^-} v_{Rf}(t) = \lim_{t \rightarrow t_1^+} v_{Ra}(t) = V_1$$

onde o primeiro limite é pela esquerda, e o segundo, pela direita. De forma similar,

$$\lim_{t \rightarrow t_2^-} v_{Ra}(t) = \lim_{t \rightarrow t_2^+} v_{Rf}(t) = V_2$$

Observe que as expressões determinadas na seção anterior para $v_{Rf}(t)$ e $v_{Ra}(t)$ assumem que $t_0 = 0$, de modo que você deve considerar que $t_1 = kT$, $t_2 = (1 - k)T$ e $t_{1+} = t_{2+} = 0$. Observe ainda que a corrente inicial do indutor no caso da chave fechada é $\frac{V_0}{R}$, enquanto que, quando a chave abre, é $\frac{V_1}{R}$.

4.3 Parte 3: Análise em Regime Permanente

Finalmente, a análise em regime permanente foca no comportamento do conversor Buck quando operado sob condições estacionárias.

- **Série de Taylor e Limites:** Utilizamos séries de Taylor para simplificar as expressões de tensão e corrente, aplicando limites para calcular pequenas variações na saída quando o período de chaveamento se aproxima de zero.
- **Determinação de Parâmetros Ótimos:** Com base nos resultados das séries de Taylor e os limites calculados, identificamos os valores ideais para os componentes do circuito, como a indutância, para garantir a eficiência máxima e minimizar as perdas.

Esta análise permite compreender melhor o desempenho do conversor sob uma operação prolongada e fornece diretrizes para o design e otimização de conversores Buck em aplicações de eletrônica de potência.

5 Resultados

5.1 Definição das Equações

As equações são derivadas para o conversor buck durante os estados de chave aberta e fechada, utilizando o método simbólico em Python com as bibliotecas Sympy, Numpy e Matplotlib.

5.1.1 Definição de Variáveis

As variáveis utilizadas nas equações são definidas como:

- V_{cc} : Tensão de entrada
- s : Variável complexa da transformada de Laplace
- L : Indutância
- I_{of} : Corrente de offset inicial quando a chave está fechada
- I : Corrente no indutor
- R : Resistência
- V_{do} : Queda de tensão diodo
- I_{oa} : Corrente de offset inicial quando a chave está aberta
- V_{ra} : Tensão no resistor com chave aberta
- V_{fr} : Tensão no resistor com chave fechada
- t : Tempo
- k : Fração do período em que a chave está fechada
- T : Período total de comutação
- V_0, V_1 : Tensões intermediárias
- DV : Variação de tensão devido ao chaveamento

5.1.2 Equações do Estado

$$-ILs - IR + IofL + \frac{Vcc}{s} = 0 \quad (1) \quad (5.1)$$

Esta equação representa o circuito com a chave aberta.

$$-ILs - IR + IoaL - \frac{Vdo}{s} = 0 \quad (2) \quad (5.2)$$

Esta equação representa o circuito com a chave fechada.

5.2 Soluções das Equações

Com base nas equações do estado, as correntes nos circuitos são calculadas como:

$$I = \frac{IofLs + Vcc}{s(Ls + R)} \quad (3) \quad (5.3)$$

Corrente no circuito com chave fechada.

$$I = \frac{IoaLs - Vdo}{s(Ls + R)} \quad (4) \quad (5.4)$$

Corrente no circuito com chave aberta.

5.3 Análise no Domínio do Tempo

Aplicando a transformada inversa de Laplace para converter as soluções no domínio de frequência para o domínio do tempo, obtemos as tensões nos resistores:

$$V(t) = \left(IofR + Vcce^{\frac{Rt}{L}} - Vcc \right) e^{-\frac{Rt}{L}} \quad (5) \quad (5.5)$$

$$V(t) = \left(IoaR - Vdoe^{\frac{Rt}{L}} + Vdo \right) e^{-\frac{Rt}{L}} \quad (6) \quad (5.6)$$

Realizamos substituições específicas nos modelos matemáticos desenvolvidos para calcular as tensões V_1 e V_2 , que são cruciais para entender o comportamento do conversor Buck sob diferentes condições de chaveamento. As substituições são feitas para incorporar os efeitos do tempo e das condições iniciais de corrente nos resultados.

5.4 Definição de V_1

A tensão V_1 é definida substituindo o tempo t por kT (onde k é a fração do período em que a chave está fechada) e a corrente inicial I_{of} (corrente de offset quando a chave está fechada) por $\frac{V_0}{R}$, em que V_0 é a tensão inicial no indutor. As substituições resultam na seguinte expressão para V_1 :

$$V_1 = \left(V_0 + V_{cc} \exp\left(\frac{RTk}{L}\right) - V_{cc} \right) \exp\left(-\frac{RTk}{L}\right) \quad (5.7)$$

5.5 Definição de V_2

De forma similar, V_2 é calculada ao substituir t por $(1-k)T$ (onde k é a fração do período em que a chave está aberta) e a corrente inicial I_{oa} (corrente de offset quando a chave está aberta) por $\frac{V_1}{R}$. As substituições proporcionam a seguinte expressão para V_2 :

$$V_2 = \left(-V_{do} \exp\left(\frac{RT(1-k)}{L}\right) + V_{do} + \left(V_0 + V_{cc} \exp\left(\frac{RTk}{L}\right) - V_{cc} \right) \right) \times \exp\left(-\frac{RTk}{L}\right) \exp\left(-\frac{RT(1-k)}{L}\right) \quad (5.8)$$

Estas equações são vitais para a análise subsequente em regime permanente e para entender a dinâmica do circuito sob diferentes condições de operação. Elas ajudam a prever o comportamento do circuito durante os períodos de chaveamento e a avaliar a eficácia do design em termos de resposta transitória e estabilidade.

5.6 Análise em Regime Permanente e Valores de Indutância

Na análise em regime permanente, consideramos a variação de tensão e corrente ao longo do tempo e calculamos os limites quando o tempo tende a zero para determinar as condições iniciais e as variações de tensão. As séries de Taylor são aplicadas para simplificar a expressão das variações.

$$\lim_{T \rightarrow 0} (V_{cc} \cdot k + V_{do} \cdot k - V_{do}) = 0 \quad (5.9)$$

Os valores de indutância são calculados com base nas condições de chaveamento e resistência do circuito, fornecendo:

$$L = 1000RTk(1 - k) \quad (5.10)$$

5.7 Resultados da Simulação Python

Após realizar as simulações utilizando o Python, obtivemos os seguintes valores para a indutância, tensão inicial V_0 e variação de tensão ΔV , com base nas diferentes configurações de resistência R e frequência de chaveamento F_{eq} . A tabela a seguir resume esses resultados, apresentando-os de maneira clara e concisa para facilitar a análise:

R (ohm)	F_{eq} (kHz)	L (H)	V_0	ΔV
5	10	0.125	2.4975	0.0050
5	50	0.025	2.4975	0.0050
1	10	0.025	2.4975	0.0050
1	50	0.005	2.4975	0.0050

Tabela 1 – Resultados da Simulação do Conversor Buck para diferentes valores de R e F_{eq}

Esses resultados são essenciais para compreender a influência da frequência de chaveamento e da resistência na indutância requerida do conversor. A análise indica que aumentos na frequência de chaveamento diminuem a indutância necessária, mantendo a variação de tensão ΔV estável. Este entendimento foi validado através de simulações no LTspice ([ANALOG DEVICES](#), [Acessado em 2023](#)), uma ferramenta fundamental para o design otimizado de conversores Buck em contextos que demandam alta eficiência.

A seguir, apresentaremos detalhes e visualizações destas simulações, demonstrando como os resultados corroboram com os parâmetros projetados.

5.8 Simulações no LTspice

Cada configuração de indutância foi testada sob diferentes condições de resistência e frequência de chaveamento para observar o comportamento do conversor Buck. Os resultados ajudam a entender como ajustes nos parâmetros afetam a performance do circuito. Além disso, através dos cursores disponíveis nos gráficos, é possível visualizar diretamente os valores correspondentes a V_0 e ΔV , facilitando a análise precisa dos efeitos de cada configuração.

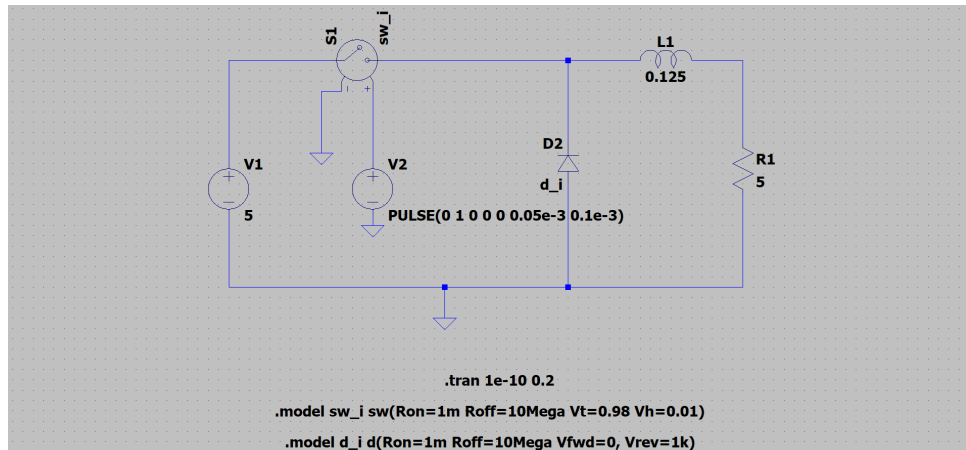


Figura 4 – Diagrama do circuito utilizado nas simulações do LTspice.

5.8.1 Resultados para as Indutâncias Calculadas

Cada configuração de indutância foi testada sob diferentes condições de resistência e frequência de chaveamento para observar o comportamento do conversor Buck. Os resultados ajudam a entender como ajustes nos parâmetros afetam a performance do circuito.

5.8.1.1 Indutância L1 ($R = 5 \text{ ohm}$, $F_{eq} = 10 \text{ kHz}$): 0.125 H

A seguir, o gráfico mostra a resposta do circuito para a indutância L1 com $R = 5 \text{ ohm}$ e $F_{eq} = 10 \text{ kHz}$:

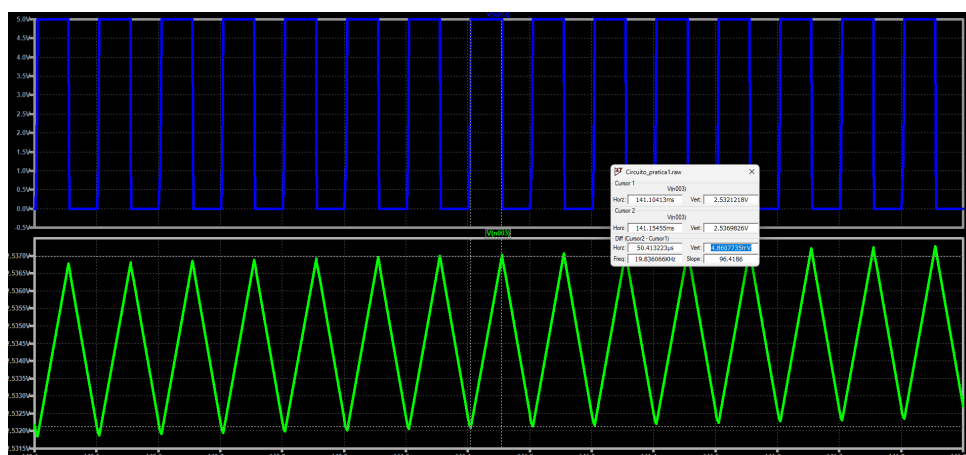


Figura 5 – Gráfico de resposta para L1 com $R = 5 \text{ ohm}$ e $F_{eq} = 10 \text{ kHz}$.

5.8.1.2 Indutância L2 ($R = 5 \text{ ohm}$, $F_{eq} = 50 \text{ kHz}$): 0.025 H

A seguir, o gráfico mostra a resposta do circuito para a indutância L2 com $R = 5 \text{ ohm}$ e $F_{eq} = 50 \text{ kHz}$:

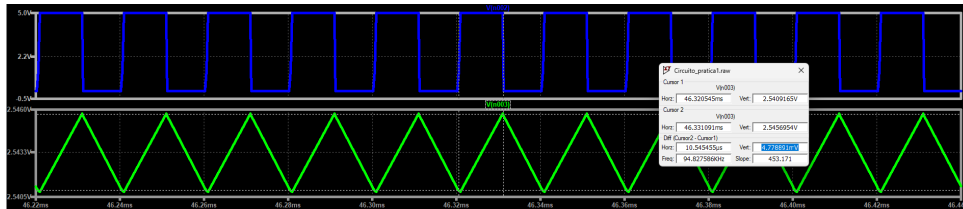


Figura 6 – Gráfico de resposta para L2 com $R = 5 \text{ ohm}$ e $F_{eq} = 50 \text{ kHz}$.

5.8.1.3 Indutância L3 ($R = 1 \text{ ohm}$, $F_{eq} = 10 \text{ kHz}$): 0.025 H

A seguir, o gráfico mostra a resposta do circuito para a indutância L3 com $R = 1 \text{ ohm}$ e $F_{eq} = 10 \text{ kHz}$:

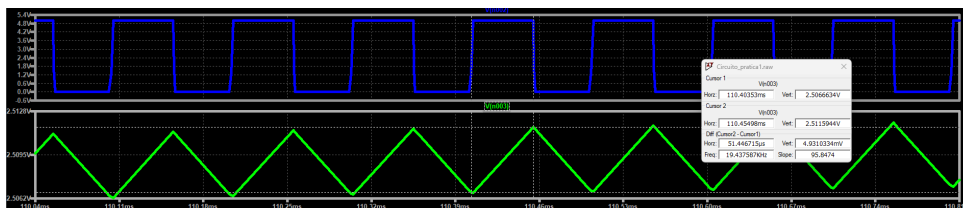


Figura 7 – Gráfico de resposta para L3 com $R = 1 \text{ ohm}$ e $F_{eq} = 10 \text{ kHz}$.

5.8.1.4 Indutância L4 ($R = 1 \text{ ohm}$, $F_{eq} = 50 \text{ kHz}$): 0.005 H

A seguir, o gráfico mostra a resposta do circuito para a indutância L4 com $R = 1 \text{ ohm}$ e $F_{eq} = 50 \text{ kHz}$:

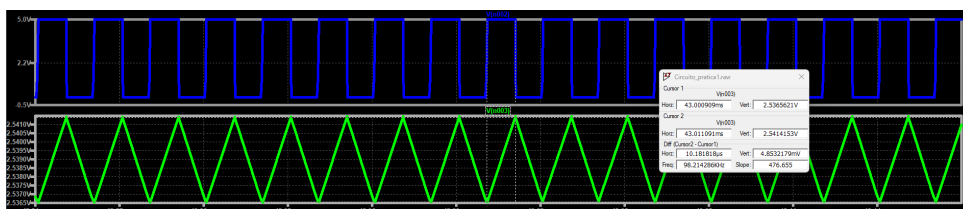


Figura 8 – Gráfico de resposta para L4 com $R = 1 \text{ ohm}$ e $F_{eq} = 50 \text{ kHz}$.

5.9 Comparação dos Resultados de Simulação

Os resultados obtidos das simulações no Python foram comparados com aqueles adquiridos no LTspice para os mesmos parâmetros de circuito. Esta comparação é crucial para validar os modelos de simulação e as previsões teóricas. A tabela a seguir inclui os resultados de ambas as simulações, destacando os valores de V_0 e ΔV obtidos no LTspice, que serão adicionados manualmente para uma análise completa.

R (ohm)	F_{eq} (kHz)	L (H)	V₀ Python (V)	V₀ LTSpice (V)	ΔV_{Python} (V)	ΔV_{LTSpice} (mV)
5	10	0.125	2.4975	2.5321	0.0050	4.8607
5	50	0.025	2.4975	2.5456	0.0050	4.7788
1	10	0.025	2.4975	2.5115	0.0050	4.9310
1	50	0.005	2.4975	2.5414	0.0050	4.8532

Tabela 2 – Comparação dos Resultados da Simulação do Conversor Buck para diferentes valores de R e F_{eq}, incluindo dados do Python e LTSpice.

Essa abordagem permite uma avaliação clara da consistência e da precisão dos métodos de simulação utilizados, ajudando a identificar qualquer discrepância entre os resultados teóricos e práticos e a ajustar os parâmetros do modelo conforme necessário.

6 Conclusão

Esta atividade pratica analisou o comportamento de um conversor Buck sob variadas condições de chaveamento e resistência, utilizando simulações no Python e no LTspice. Os resultados demonstraram que a indutância necessária para manter a eficiência do conversor diminui com o aumento da frequência de chaveamento, uma observação que está em linha com as previsões teóricas. Isso confirma que a capacidade do conversor para ajustar a tensão de saída de acordo com a demanda pode ser efetivamente controlada através da manipulação do ciclo de trabalho e da frequência (BOYLESTAD; NASHELSKY, 1999).

Os resultados experimentais confirmaram que as variações na indutância influenciam significativamente a operação do conversor. Foi observado que as indutâncias calculadas e os valores obtidos de V_0 e ΔV estavam de acordo com os modelos teóricos, validando assim os métodos de simulação usados. No entanto, foi notado que em frequências mais altas, os requisitos de indutância tornam-se mais críticos, o que pode demandar uma seleção mais precisa dos componentes para evitar a degradação do desempenho.

Assim, os valores de ΔV obtidos nas simulações LTspice foram consistentemente precisos, sugerindo que a simulação é uma ferramenta robusta para prever o comportamento em condições reais. Isso também indica que o modelo de simulação empregado é adequado para o design e análise de conversores Buck em aplicações práticas.

Por fim, os resultados deste estudo fornecem insights valiosos sobre como melhorias futuras podem ser implementadas, particularmente no que diz respeito à seleção de componentes e ao ajuste fino das configurações de chaveamento para maximizar a eficiência e a resposta do conversor em aplicações mais exigentes. A análise também revelou áreas onde o comportamento real pode desviar-se do esperado, orientando focos para investigações futuras e ajustes de design.

Referências

AHMED, A. *Eletrônica de Potência*. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2000. Citado na página 2.

ANALOG DEVICES. *LTspice*. Acessado em 2023. Software de simulação de circuitos eletrônicos. Disponível em: <<https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>>. Citado na página 10.

BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. *Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1999. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 14.

LUIZ, S. O. D. *Prática de Laboratório, 1a Prática de Laboratório*. 2023. Curso de EL216 - Circuitos 2, 2o semestre de 2023. Citado na página 2.