

# Conversores CC: Buck-Boost, Cúk e SEPIC

Batista, H.O.B.<sup>1</sup>, Alves, W. F. O.<sup>2</sup>, Gomes, T.R.A.G.<sup>3</sup>.

Matriculas: 96704<sup>1</sup>, 96708<sup>2</sup>, 86305<sup>3</sup>

Departamento de Engenharia Elétrica,

Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG.

e-mails: hiago.batista@ufv.br<sup>1</sup>, werikson.alves@ufv.br<sup>2</sup>, thiago.ridogério@ufv.br<sup>3</sup>

**Resumo**—Este artigo faz o estudo sobre conversores C.C., os quais convertem a saída em um novo nível C.C. Neste trabalho, serão abordados 3 modelos diferentes de conversores, como possíveis soluções para alimentar uma carga, sendo eles: Buck-Boost, Cúk e SEPIC. Em seguida, serão realizados teste e simulações para a obtenção dos valores dos elementos passivos para cada modelo de conversor. Ao final, será feito uma análise comparativa entre os diferentes modelos a fim de estabelecer as vantagens e desvantagens entre eles, além de uma comparação quantitativa entre os conversores levando em consideração volume e custo dos elementos passivos.

**Palavra Chave**— Conversor CC/CC, Buck-Boost, Cúk e SEPIC.

**Abstract**—This article portrays the study of DC/DC converters, which convert DC energy into DC, with a certain output gain. In this work, 3 different models of converters will be approached, as possible solutions to supply a load, namely: Buck-Boost, Cúk and SEPIC. Then, tests and simulations will be carried out to obtain the values of the passive elements for each converter model. At the end, a comparative analysis will be made between the different models in order to establish the advantages and disadvantages between them, as well as a quantitative comparison between the converters taking into account the volume and cost of the passive elements.

**Keywords**— DC/DC Converter, Buck-Boost, Cúk, SEPIC.

## I. INTRODUÇÃO

A eletrônica de potência é apenas um de diversos ramos da engenharia elétrica que tem causado impactos significativos na sociedade com o desenvolvimento de suas tecnologias. Hoje ela já faz parte do cotidiano de tal forma que, muitas vezes sua presença não é notada, seja em aplicações de baixa potência como smartphones, notebooks ou de altas potência como indústrias. [Bottarelli et al., 2006]

Todos os dispositivos disponíveis, principalmente aqueles que requerem uma bateria para funcionar, necessitam de uma tensão de saída regulada [Gaboriault and Notman, 2004]. Nos casos dos aparelhos quem trabalham em regime contínuo, esse controle de tensão são feitos através de chaves reguladores chamados de conversores CC-CC ou simplesmente conversores CC.

Neste trabalho serão avaliados três tipologias de conversores CC distintas: Buck-Boost, Cúk e SEPIC. O primeiro é empregado para gerenciar o fluxo de energia entre uma fonte de tensão e uma carga que possua característica de fonte de tensão. Esse fluxo de energia não ocorre de forma direta e por isso o processo pode ser dividido em dois estágio: no primeiro estágio a fonte de tensão alimenta um elemento passivo armazenador de energia, mais comumente um indutor, e depois de carregado, no segundo estágio, a fonte de tensão é desconectada através de uma chave e o elemento passivo alimenta a carga. O conversor Cúk pode ser interpretado como uma associação entre os conversores

Buck e Boost e assim como os conversores Buck-Boost também realizam a transferência entre uma fonte e uma carga, porém aqui a fonte é de corrente e a carga possui característica de fonte de corrente. O funcionamento dos conversores Cúk também pode ser dividido em dois estágios: No primeiro a fonte de corrente transfere sua energia a um elemento passivo, sendo o mais utilizado o capacitor, e depois do capacitor carregado, a fonte de corrente é desconectada através de um chaveamento e o capacitor transfere sua energia armazenada para carga. Por fim, o terceiro conversor CC pode ser utilizado tanto para elevar quanto para abaixar a tensão média de saída em relação a tensão média de entrada. Foi, inicialmente proposto em 1977 para trabalhar com alta tensão e seu funcionamento é semelhante ao conversor CC Cúk. [Martins and Barbi, 2006]

## II. OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho são calcular os valores dos elementos passivos para os três diferentes tipos de conversores e simular as formas de ondas mais importantes. E ao final, fazer uma análise comparativa entre os diferentes modelos a fim de estabelecer as vantagens e desvantagens entre eles, além de uma comparação quantitativa entre os conversores levando em consideração volume e custo dos elementos passivos.

## III. METODOLOGIA

Neste trabalho serão analisados três opções de conversores, como opções para alimentar uma carga, através da tensão da rede, sendo ela um refletor de Led SMD Sover Flood Light de 500 W, por meio de análise teóricas e do simulador *PLECS*. Os parâmetros comuns utilizados nas simulações são apresentados na Tabela (I).

Tabela I: Configurações iniciais gerais

Variável	$V_s (V_{rms})$	$P_o (W)$	$V_o (V)$	$f_s (Hz)$	$f_{chav} (kHz)$
Valor	127	500	48	60	15

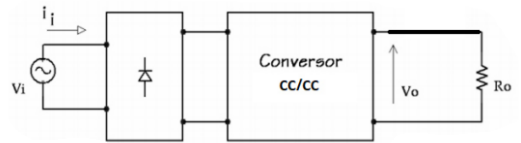


Figura 1: Modelo de conversor CC/CC.

### A. Estágio de Retificação

O modelo base dos circuitos utilizados é apresentado na Figura (1). Como pode ser observado, a alimentação do circuito ocorre através da tensão da rede elétrica, sendo assim um sinal alternado e os conversores são CC/CC.

Com isto, foi utilizado um retificador monofásico em ponte com o objetivo de transforma-lo em um sinal contínuo, porém este sinal possui um ripple muito alto e para evitar isto foi utilizado um capacitor ( $C_{Ret}$ ) de forma a diminuir essa variação. O valor deste capacitor pode ser obtido por meio da equação apresentada na Tabela (II).

Após isto, é possível determinar a tensão de entrada retificada ( $V_{Ret}$ ) que chega na entrada do conversor, a corrente na carga ( $I_a$ ) e a resistência da carga ( $R_o$ ), além disto, dado  $V_{Ret}$  e  $V_a$  pode-se determinar o *Duty cycle* ( $k$ ) e como esses conversores se tratam de conversores ideais, é possível determinar a corrente de entrada ( $I_{Ret}$ ). As equações de todos estes parâmetros são apresentadas na Tabela (II).

Tabela II: Equações gerais [RASHID, 2014].

$C_{Ret}$	$V_{Ret}$	$I_{Ret}$	$I_a$	$R$	$k$
$\frac{P_{in}}{f(V_{Retmax}^2 - V_{Cmin}^2)}$	$\frac{V_{Retmax} + V_{Cmin}}{2}$	$\frac{V_a I_a}{V_{Ret}}$	$\frac{P_o}{V_o}$	$\frac{V_o}{I_o}$	$\frac{V_a}{V_a - V_{Ret}}$

Os circuitos que serão apresentados a seguir são compostos por indutores, capacitores, resistência, MOSFET (buck-boost) e IGBT (Cúk e SEPIC). Nos diagramas dos circuitos, o MOSFET e o IGBT atuam como uma chave controlada, com uma determinada frequência de chaveamento ( $f_{chav}$ ) e o diodo ( $D_m$ ) atua como uma chave não controlada.

### B. Estágio de conversão

Como dito anteriormente, existem três opções para realizar a conversão CC/CC, buck-boost, Cúk e SEPIC.

1) *Buck-Boost*: O primeiro modelo a ser estudado é o Regulador buck-boost cujo diagrama é apresentado na Figura (2). Um ponto importante sobre essa tipologia é que seu sinal de saída possui sentido contrário ( $V_a = -V_o$ ) devido a disposição do diodo  $D_m$ , conforme pode ser observado na Figura (2).

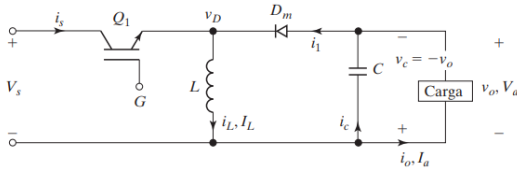


Figura 2: Regulador Buck-Boost.

[RASHID, 2014]

Ao energizar o circuito, podemos separar o circuito em dois modos de operação, os quais são apresentados na Figura (3). Logo, em regime permanente, durante o Modo 1 a corrente flui através do indutor ( $L$ ) carregando-o e o diodo  $D_m$  não permite a passagem de corrente da fonte em direção a carga. Enquanto isto  $C_2$  é descarregado ao transferir energia para a carga, mantendo-a energizada. Já durante o Modo 2, a energia armazenada em  $L$  é transferida para a carga, enquanto isto, o capacitor é carregado.

Para a simulação foi considerada uma ondulação ( $rp$ ) de tensão e corrente ( $\Delta V_C$  e  $\Delta I_L$ ) causada pela influências do capacitor e indutor nos sinais de corrente e da tensão na carga. Por meio dos parâmetros da Tabela (I) e das equações apresentadas na Tabela (II) e (III) é possível determinar os valores dos elementos passivos, sendo eles o valor da capacitância e da indutância.

2) *Cúk*: O segundo modelo a ser estudado é o regulador Cúk cujo circuito é apresentado na Figura 4. Este modelo também possui sua saída invertida, assim como o conversor *buck-boost*. Outro ponto importante é que esta tipologia possui dois capacitores e dois indutores, tendo assim quatro estágios.

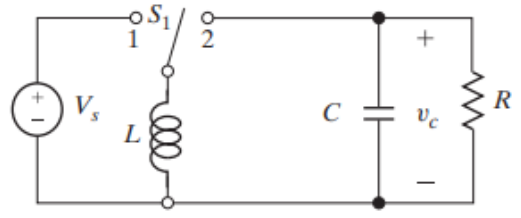


Figura 3: Estágios do Regulador Buck-Boost.

[RASHID, 2014]

Tabela III: Parâmetros para buck-boost. [RASHID, 2014]

$\Delta I_L$	$\Delta V_C$	$C$	$L$
$ rp \times I_a $	$ rp \times V_a $	$\frac{k \times I_a}{\Delta V \times f_{chav}}$	$\frac{k \times V_{Ret}}{\Delta I \times f_{chav}}$

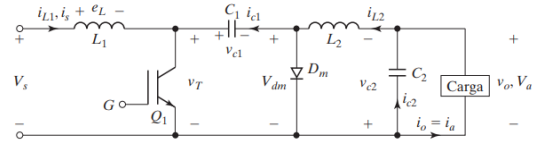


Figura 4: Regulador Cúk.

[RASHID, 2014]

Durante o funcionamento esse circuito pode ser dividido em dois modos de operação, como pode ser visto na Figura (5). Em regime permanente, no modo 1, a corrente da fonte flui apenas por ( $L_1$ ) carregando-o, enquanto isto  $C_1$  polariza reversamente o diodo  $D_m$  não permitindo a passagem da corrente da fonte, além disto o capacitor  $C_1$  é descarregado sobre o circuito composto pelo restante dos componentes ( $L_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  e carga). No modo 2, o  $D_m$  é polarizado diretamente, e desta forma o capacitor  $C_1$  é carregado através de  $L_1$ ,  $D_m$  e a fonte. Enquanto isto,  $L_2$  libera sua energia armazenada encima da carga. [RASHID, 2014]

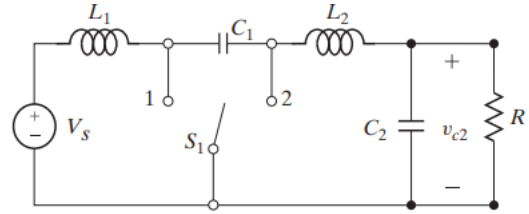


Figura 5: Modos de operação do Regulador Cúk.

[RASHID, 2014]

De outra forma, o circuito também pode ser dividido em quatro estágios, devido aos elementos armazenadores de energia, sendo que as etapas 1 e 2 atuam no regime transitório e as etapas 3 e 4 atuam em regime permanente. Considerando o circuito inicialmente desenergizado, os estágios são:

- 1) **Chave no modo 1:**  $L_1$  é carregado, enquanto a carga permanece desenergizada;
- 2) **Chave no modo 2:**  $L_1$  descarrega ao transferir energia para  $C_1$  carregando-o, enquanto a carga permanece desenergizada;
- 3) **Chave no modo 1:**  $L_1$  é carregado, enquanto  $C_1$  descarrega ao transferir energia para  $C_2$  e  $L_2$  carregando-os e a carga é energizada;

- 4) **Chave no modo 2:**  $L_1$  descarrega ao transferir energia para  $C_1$  carregando-o, enquanto  $C_2$  e  $L_2$  descarregam-se ao transferir energia para a carga.

Para esta simulação foi considerada uma ondulação ( $rp$ ) de tensão e corrente ( $\Delta V_1$ ,  $\Delta I_1$ ,  $\Delta V_2$  e  $\Delta I_2$ ) causada pela influências dos elementos armazenadores de energia. Por meio dos parâmetros da Tabela (I) e das equações apresentadas na Tabela (II) e (IV) é possível determinar os valores dos elementos passivos, sendo eles os valores das capacitâncias e das indutâncias.

Tabela IV: Parâmetros para Cúk. [RASHID, 2014]

$n$	$\Delta I_n$	$\Delta V_n$	$L_n$	$C_n$
1	$ I_{Ret}rp $	$ V_{Ret}rp $	$\frac{k \times V_{Ret}}{\Delta I_{L_1} \times f_{chav}}$	$\frac{I_{Ret}(1-k)}{\Delta V_{C_1} \times f_{chav}}$
2	$ I_a rp $	$ V_a rp $	$\frac{k \times V_{Ret}}{\Delta I_{L_2} \times f_{chav}}$	$\frac{k \times V_{Ret}}{\Delta V_{C_2} \times L_2 \times 8 \times f_{chav}^2}$

3) **SEPIC:** O ultimo conversor a ser analisado é a tipologia SEPIC, o qual é representado na Figura (6) e é muito semelhante ao conversor Cúk. Contudo este modelo possui duas variações as quais permitem uma saída invertida ou não, desta forma foi adotada a saída não invertida para o projeto. De forma geral, o circuito é muito parecido com a tipologia anterior, havendo apenas a alteração da posição de dois componentes, sendo eles o diodo  $D_m$  e o indutor  $L_2$ .

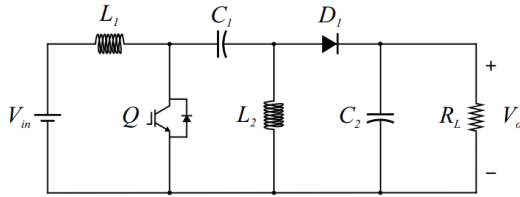


Figura 6: Regulador SEPIC. [Sousa, 2019]

Este modelo também possui dois modos de operação os quais podem ser vistos na Figura (7). Em regime permanente, durante o modo 1, o circuito pode ser "dividido" em duas partes, na qual, na primeira a corrente flui por  $L_1$ , carregando-o, enquanto o capacitor  $C_1$  e o indutor  $L_2$  são descarregados, e na segunda parte a carga é alimentada pela transferência da energia armazenada em  $C_2$ . Já durante o modo 2,  $L_1$  é descarregado ao liberar sua energia armazenada em  $C_1$ ,  $L_2$  e  $C_2$  e assim carregando-os, além disso, nesse modo de operação a carga também é alimentada pela fonte de tensão.

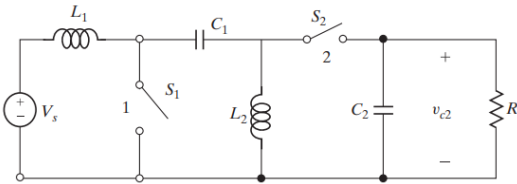


Figura 7: Estágios do Regulador SEPIC. [RASHID, 2014]

Devido a grande semelhança dos modelos cúk e SEPIC as equações do modelo anterior também são validas para este modelo. Logo, para esta simulação foi considerada uma ondulação ( $rp$ ) de tensão e corrente ( $\Delta V_1$ ,  $\Delta I_1$ ,  $\Delta V_2$  e  $\Delta I_2$ ) causada pela influências dos elementos armazenadores de energia. Portanto, utilizando novamente os parâmetros da Tabela (I) e das equações apresentadas na Tabela (II) e (IV) determina-se os valores

dos elementos passivos, para este modelo, sendo estes os valores das capacitâncias e das indutâncias.

#### IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Primeiramente, será definido quais as características que queremos para o projeto de um conversor. Essas características estão expostas de acordo com a Tabela V.

Tabela V: Parâmetros do Conversor Retificador

Tensão de Entrada Retificada ( $V_{in}$ )	$175 \pm 4,5 \text{ V}$
Tensão de Saída ( $V_o$ )	$48 \pm 2,4 \text{ V}$
Potência (P)	500 W
Resistência da Carga (R)	$4,608 \Omega$
Frequência de Chaveamento (f)	15 kHz

Além disso, como a etapa de retificação é a mesma para todos os conversores, a capacitância do filtro capacitivo será dada pela equação  $C_{Ret}$  da Tabela II, e será considerada uma eficiência de  $\eta = 0.81$ , portanto o seu valor é:

$$C_f = 1636 \mu F$$

##### A. Buck-Boost

Portanto, para esta simulação, utilizaremos as Equações da Tabela (III) para determinar os componentes passivos. Sendo assim, foi obtido a Tabela VI que mostra os valores dos componentes passivos do Buck-Boost.

Tabela VI: Elementos passivos do buck-boost.

L	C
1,89 mH	31,1 $\mu F$

Verificamos assim, que a curva de tensão e corrente para este conversor está ilustrada na Figura 8.

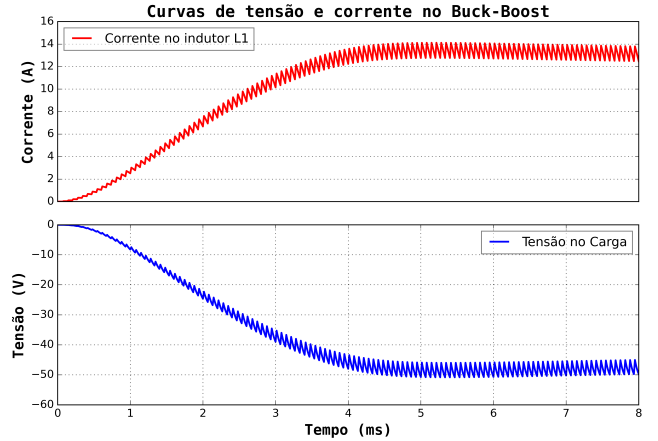


Figura 8: Corrente e Tensão no Buck-Boost. (Fonte: Próprio Autor)

##### B. Cúk

Agora, utilizando as equações da Tabela IV, foi calculado os valores dos elementos passivos conforme mostra a Tabela VII. Após esta etapa, foi simulado o conversor Cúk, e obtido as curvas de tensão na carga e no capacitor, e as curvas de corrente nos indutores, conforme ilustra a Figura 9.

Tabela VII: Elementos passivos do Cúk.

$L_1$	$L_2$	$C_1$	$C_2$
8,80 mH	2,41 mH	8,53 $\mu F$	31,25 $\mu F$

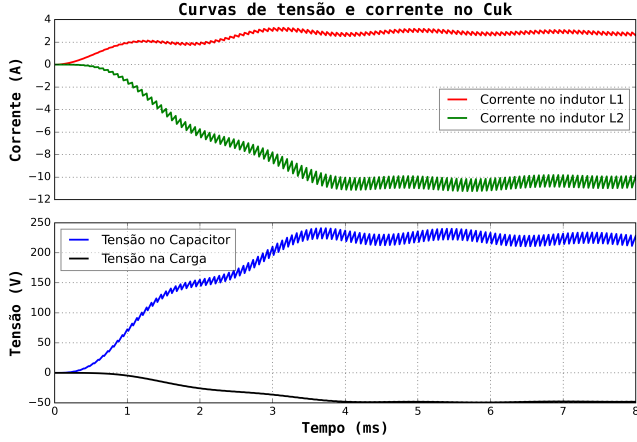


Figura 9: Corrente e Tensão no Cúk.  
(Fonte: Próprio Autor)

### C. SEPIC

Agora, apenas trocando o indutor  $L_2$  de posição com o diodo do conversor Cúk, obtemos o conversor SEPIC. Portanto os elementos passivos serão os mesmos do conversor Cúk conforme está descrito na Tabela VII. Por fim, está exposto na Figura 10 as curvas de tensão na carga e no capacitor, e a curvas de corrente nos indutores.

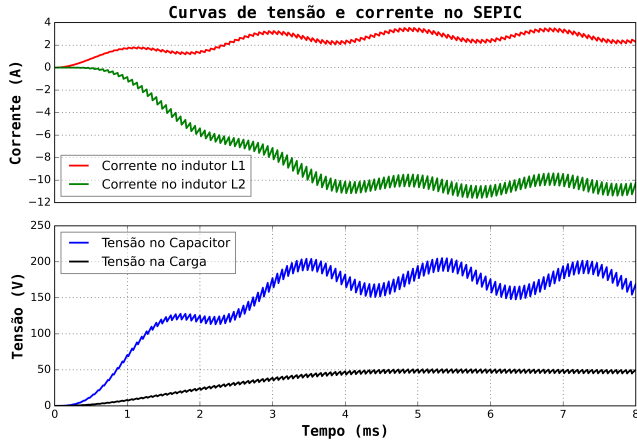


Figura 10: Corrente e Tensão no SEPIC.  
(Fonte: Próprio Autor)

### D. Comparação entre conversores

Diante dos resultados expostos, veja pela Figura 11, que a saída dos conversores Buck-Boost e Cúk apresentam tensão inversa, enquanto o SEPIC é não inversor.

Outro fator importante que se destaca, é a forma de onda da tensão de saída (Figura 11). Perceba que a forma de onda do conversor Cúk é mais “fina” que as demais apresentando assim, menor oscilação.

Além dessas características já descritas, veja pela Tabela VIII, que o regulador Cúk foi o único que obteve uma variação menor que a estipulada ( $\pm 2,4$  V).

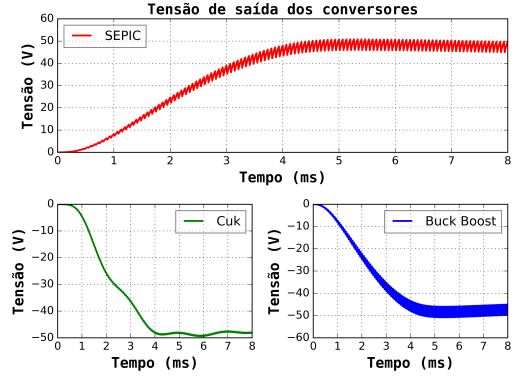


Figura 11: Forma de onda da tensão de saída dos conversores.  
(Fonte: Próprio Autor)

Tabela VIII: Tensão média de saída dos conversores

	Buck-Boost	Cúk	SEPIC
$V_{out}$	$-48,29 \pm 3,75$ V	$-47,53 \pm 2,33$ V	$48,30 \pm 3,76$ V

Agora, se tratando de volume e custo<sup>1</sup> perceba pela Tabela IX que o buck-boost se apresenta como conversor mais barato, e mais leve, pois possui menos elementos passivos; e o elemento que encarece o preço do regulador é o indutor.

Tabela IX: Preço dos elementos passivos dos conversores

	Investimento em Indutores	Investimento em Capacitores	Total
Buck-Boost	\$ 31,53	\$ 7,71	\$ 39,24
Cúk	\$ 186,99	\$ 13,02	\$ 200,01
SEPIC	\$ 186,99	\$ 13,02	\$ 200,01

## V. CONCLUSÕES

Por fim, observar-se que quando empregado na função de alimentação de uma carga de 500W, o conversor que forneceu uma melhor resposta foi o conversor Cúk, pois apresentou uma menor ondulação (ripple) e também foi o único que manteve sua variação de tensão dentro da margem de  $\pm 2,4$ V, apresentando uma variação de  $\pm 2,33$  V enquanto o Buck-boost apresentou uma variação de  $\pm 3,75$ V e o SEPIC uma variação de  $\pm 3,76$ V. Por outro lado, o Cúk, juntamente com o SEPIC são os conversores que possuem o custo de construção mais elevado, em torno de \$200,01. O conversor Buck-Boost possui um preço bem atraente de \$39,24, porém possui alta ondulação mas ainda assim, é possível melhorar a resposta do conversor utilizando elementos passivos de qualidade melhor, por exemplo materiais condutores e semicondutores mais puros.

## REFERÊNCIAS

[Bottarelli et al., 2006] Bottarelli, M. G. et al. (2006). Conversores cc-cc básicos não-isolados quadráticos de três níveis.

<sup>1</sup>Foi utilizado o modelo de indutor AGP4233-474 e o capacitores 2200  $\mu F$  / 200 V, 47  $\mu F$  / 100 V, 10  $\mu F$  / 250 V e 47  $\mu F$  / 100 V para fins de projeção de preço.

- [Gaboriault and Notman, 2004] Gaboriault, M. and Notman, A. (2004). A high efficiency, noninverting, buck-boost dc-dc converter. In *Nineteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC'04.*, volume 3, pages 1411–1415. IEEE.
- [Martins and Barbi, 2006] Martins, D. C. and Barbi, I. (2006). *Eletrônica de potência: Conversores CC-CC básicos não isolados*. Edição dos Autores.
- [RASHID, 2014] RASHID, M. H. (2014). *Eletrônica de potência: dispositivo, circuitos e aplicações*. 4<sup>a</sup> edição, ed.
- [Sousa, 2019] Sousa, S. M. (2019). *Controle de conversor cc/cc SEPIC em modo corrente aplicado ao inversor fotovoltaico trifásico conectado à rede elétrica*. PhD thesis, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de São João del Rei. Centro . . . .