

## CONVERSOR CC-CC ELEVADOR DE TENSÃO COM GANHO QUADRÁTICO

ZITO PALHANO DA FONSECA<sup>1</sup> e FERNANDO RADECK<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dr. em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, UEPG, Ponta Grossa-PR, [zpfonseca@uepg.br](mailto:zpfonseca@uepg.br);

<sup>2</sup>Mestrando em Computação Aplicada a Agricultura, UEPG, Ponta Grossa-PR, [fer.radeck@gmail.com](mailto:fer.radeck@gmail.com);

Apresentado no  
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC  
4 a 6 de outubro de 2022

**RESUMO:** Ao se utilizar energias renováveis provenientes de painéis fotovoltaicos, geralmente a tensão gerada possui valores baixos, assim se fazendo necessário a utilização de um estágio para elevar esta tensão a níveis que através da conexão deste estágio elevador de tensão a um estágio inversor, assim podendo ser conectado a rede elétrica ou a equipamentos que utilizam corrente alternada. Este trabalho apresenta um conversor CC-CC elevador de tensão com ganho estático quadrático, operando em MCC (Modo de Condução Contínua), objetivando com um menor número de componentes e sem transformador elevar o ganho estático do conversor. O artigo apresenta resultados de simulação numérica para um conversor operando com 37,5 V de tensão de entrada, 400 V de tensão de saída, frequência de comutação de 50 kHz e potência nominal de 400 W.

**PALAVRAS-CHAVE:** Conversor CC-CC, elevador de tensão, elevado ganho, conversor não isolado

### STEP-UP VOLTAGE DC-DC CONVERTER WITH QUADRATIC GAIN

**ABSTRACT:** Using renewable energy from photovoltaic panels, generally the voltage generated has low values, thus making it necessary to use a stage to raise this voltage to levels that through the connection of this voltage booster stage to an inverter stage, thus being able to be connected to the electrical network or equipment that uses alternating current. This work presents a voltage-boosting DC-DC converter with quadratic static gain, operating in CCM (Continuous Conduction Mode), aiming to increase the static gain of the converter with a smaller number of components and without a transformer. The article presents numerical simulation results for a converter operating with 37.5 V of input voltage, 400 V of output voltage, switching frequency of 50 kHz and rated power of 400 W.

**KEYWORDS:** DC-DC converter, step-up voltage, high gain, non-isolated converter.

### INTRODUÇÃO

Para a aplicação de sistemas de energia renovável, como célula a combustível e célula fotovoltaica, são necessários conversores CC-CC com alto ganho de tensão. Muitos trabalhos de pesquisa relatam sobre os conversores com alto ganho de tensão [Schmitz, 2020; Fonseca, 2021; Tang, 2014; Vázquez, 2015].

Conversores em cascata podem aumentar o ganho de tensão dos conversores estáticos [Matsuo, 1976], porém, aumenta o custo e afeta a eficiência dos conversores. Os conversores elevadores de tensão quadráticos podem aumentar o ganho utilizando apenas um interruptor eletrônico, porém, pode apresentar sobretensões de tensão ou corrente quando o ganho de tensão é alto.

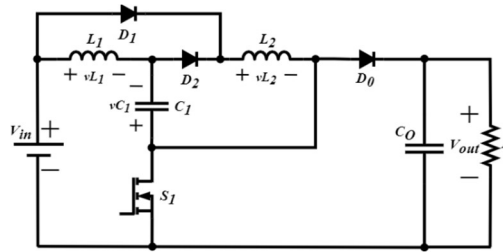
O objetivo geral deste trabalho é apresentar um conversor CC-CC de elevado ganho de tensão, aplicando o conceito de ganho quadrático, utilizando apenas um interruptor eletrônico e com reduzido valor de capacitâncias, deste modo podendo-se utilizar capacitores não polarizados que contribuem para a elevação da vida útil do sistema eletrônico. O conversor proposto tem a vantagem de possuir um único interruptor controlado, o que reduz a complexidade do sistema de controle e o custo de implementação.

### MATERIAL E MÉTODOS

A Figura 1 apresenta a topologia proposta, esta estrutura possui características de funcionamento que elevam o ganho estático do conversor em comparação a um conversor *Boost* convencional, podendo assim operar com tensões de saída mais elevadas. Normalmente em um conversor *Boost* clássico não se

utilizam os componentes  $L_2$ ,  $C_1$  e  $D_1$ . Entretanto ao comparar o conversor proposto a um conversor *Boost voltage lift* convencional o conversor proposto apresenta um maior ganho estático mesmo utilizando o mesmo número de componentes.

Figura 1. Topologia proposta.



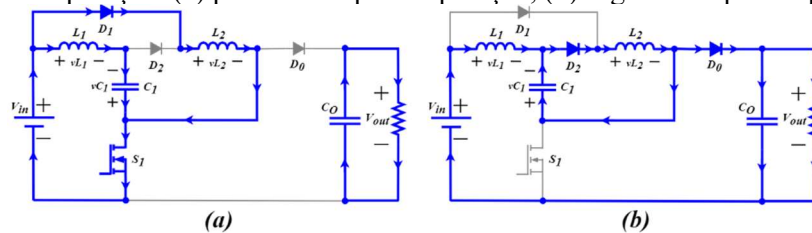
**Primeira etapa de operação ( $t_0 - t_1$ ):** Na primeira etapa o interruptor  $S_1$  e o diodo  $D_1$  conduzem e as correntes dos indutores  $L_1$  e  $L_2$  crescem linearmente, nesta etapa o capacitor  $C_1$  armazena energia. Os diodos  $D_2$  e  $D_0$  estão bloqueados, com isto, a carga é alimentada pelo capacitor de saída  $C_0$ . A primeira etapa de operação é apresentada na Figura 2a. As tensões nos indutores  $L_1$  e  $L_2$  nesta etapa são expressas pela equação 1.

$$V_{L1} = V_{in} + V_{C1}; V_{L2} = V_{in} \quad (1)$$

**Segunda etapa de operação ( $t_1 - t_2$ ):** A segunda etapa de operação ocorre quando o interruptor  $S_1$  é comandado a bloquear, os diodos  $D_0$  e  $D_2$  entram em condução enquanto o diodo  $D_1$  está bloqueado. Durante esta etapa as correntes dos indutores  $L_1$  e  $L_2$  decrescem linearmente. O circuito equivalente desta etapa é apresentado na Figura 2b. As tensões nos indutores  $L_1$  e  $L_2$  nesta etapa são expressas pela equação 2.

$$V_{L1} = V_{in} + V_{C1} - V_{out}; V_{L2} = -V_{C1} \quad (2)$$

Figura 2. Etapas de operação: (a) primeira etapa de operação, (b) segunda etapa de operação.



## MODELO MATEMÁTICO DO CONVERSOR

Considerando a análise do conversor no modo de condução contínuo, para a análise do conversor foram assumidas as seguintes considerações:

- O conversor opera em regime permanente;
- Os capacitores  $C_0$  e  $C_1$  são suficientemente grandes para que as tensões sejam consideradas constantes;
- As tensões de entrada  $V_{in}$  e saída  $V_{out}$  são constantes;

## Ganho Estático do Conversor

A definição do ganho estático é realizada a partir das equações nos indutores, onde pode-se escrever que o valor médio das tensões em  $L_1$  e  $L_2$  é nulo, uma vez que o conversor opera em regime permanente. O ganho estático de tensão do conversor é obtido aplicando o balanço volts-segundos nos indutores  $L_1$  e  $L_2$ , o qual é zero em um período de comutação. Desta forma obtêm-se as equações 3 e 4.

$$V_{in}D + (V_{in} + V_{C1} - V_{out})(1 - D) = 0 \quad (3)$$

$$V_{in}D - V_{C1}(1 - D) = 0 \quad (4)$$

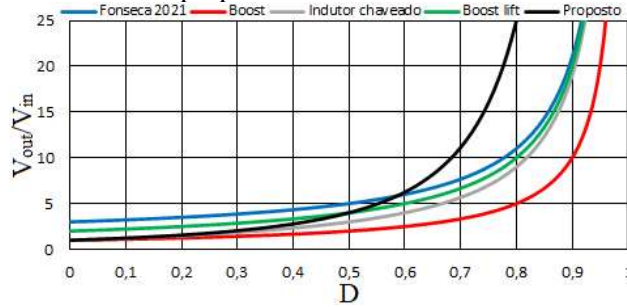
Resolvendo as equações (3) e (4) para  $V_{out}/V_{in}$ , obtêm-se o ganho estático e a tensão sobre o capacitor  $C_1$ .

$$M = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{(1-D)^2}; V_{C1} = \frac{V_{in}D}{(1-D)} \quad (5)$$

O conversor proposto pode operar com  $n$  células *voltage lift*, assim como é apresentado na Figura 3. Desta forma aumentando seu ganho estático.

A Figura 3 apresenta o ganho estático do conversor proposto para diferentes valores de razão cíclica e comparasse com os ganhos dos conversores *Boost*, *Boost Voltage Lift*, *Boost* com indutor chaveado e proposto por Fonseca, 2021. Observa-se que o ganho estático do conversor proposto é maior do que o ganho dos conversores comparados para valores de razão cíclica acima de 0,6.

Figura 3. Ganho estático do conversor proposto.



### Projeto dos Indutores do Conversor

Os indutores são dimensionados pelo critério de ondulação de corrente. Analisando-se a primeira etapa de operação, obtêm-se:

$$L_1 = \frac{V_{in}D}{\Delta i_{L_1} f_s (1-D)}; L_2 = \frac{V_{in}D}{\Delta i_{L_2} f_s} \quad (6)$$

Onde:

$\Delta i_{L_1}$  = Ondulação de corrente sobre o indutor  $L_1$ ;  $\Delta i_{L_2}$  = Ondulação de corrente sobre o indutor  $L_2$ ;  $f_s$  = frequência de chaveamento.

### Projeto dos Capacitores do Conversor

O capacitor de saída é dimensionado pelo critério de ondulação de tensão. Ao se analisar uma das etapas de operação, encontra-se a seguinte equação de projeto:

$$C_0 = \frac{V_{out}D}{R\Delta v_{out}f_s} \quad (7)$$

Onde:

$\Delta v_{vout}$  = Ondulação de tensão de saída  $V_{out}$ ;  $R$  = Resistencia de saída (carga);  $D$  = Razão cíclica.

Através da primeira etapa de operação verifica-se que a corrente que flui pelo capacitor  $C_1$  é a corrente do indutor  $L_1$ , assim encontra-se a equação de projeto do capacitor  $C_1$ .

$$C_1 = \frac{V_{out}D}{R(1-D)\Delta v_{C1}f_s} \quad (8)$$

Onde:

$\Delta v_{C1}$  = Ondulação de tensão sobre o capacitor  $C_1$ ;

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O conversor foi projetado para operar com as especificações de projeto apresentadas na Tabela 1. Observa-se que para atender as especificações de projeto, o conversor deverá operar com um ganho igual a 10,666. Aplicando-se as especificações de projeto nas equações de projeto do conversor, apresenta-se na Tabela 2 os valores dos componentes armazenadores de energia. O conversor deve operar com um valor nominal da razão cíclica igual a 0,6938.

A Figura 4a apresenta as formas de onda da tensão de entrada e de saída do conversor, sendo o valor médio da tensão de saída igual a 400 (V). Na Figura 4b pode-se observar a corrente de entrada e de saída do conversor, onde verifica-se que a corrente média de saída é de 1(A) e a corrente de entrada apresenta característica pulsada. Portanto, o conversor processa uma potência igual a 400 (W).

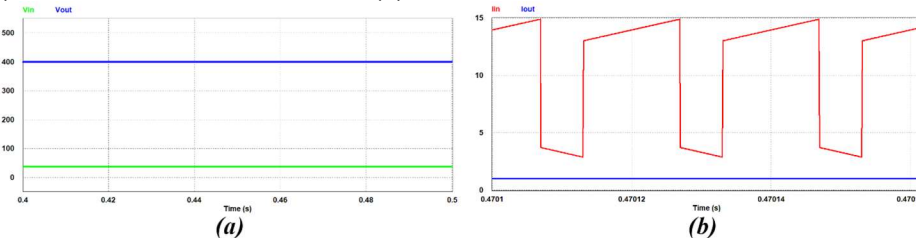
Tabela 1. Especificações de projeto

Especificações	Valor
Tensão de entrada ( $V_{in}$ )	37,5V
Tensão de saída ( $V_{out}$ )	400V
Potência de saída ( $P_{out}$ )	400W
Frequência de chaveamento ( $f_s$ )	50kHz
Ondulação de tensão no capacitor $C_1$ ( $\Delta v_{C1}$ )	5%
Ondulação de tensão no capacitor $C_0$ ( $\Delta v_{out}$ )	5%
Ondulação de corrente no indutor $L_1$ ( $\Delta i_{L1}$ )	25%
Ondulação de corrente no indutor $L_2$ ( $\Delta i_{L2}$ )	5%

Tabela 2. Componentes

Componente	Valor
Indutor $L_1$	2mH
Indutor $L_2$	1mH
Capacitor $C_1$	10 $\mu$ F
Capacitor $C_0$	10 $\mu$ F
Carga (R)	400 $\Omega$

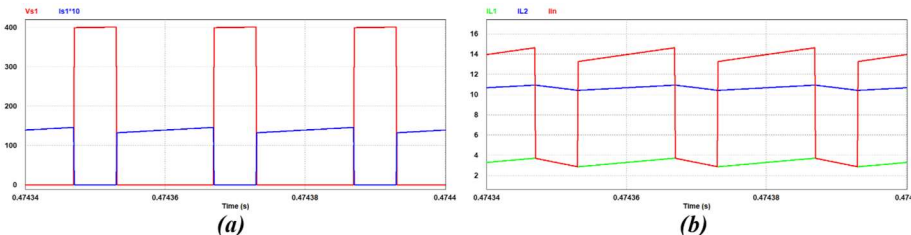
Figura 4. (a) Tensão de entrada e de saída, (b) Corrente de entrada e de saída.



A Figura 5a apresenta a tensão e corrente sobre o interruptor  $S_1$ , observa-se que a tensão máxima sobre o interruptor é menor que a tensão de saída. Na Figura 5b pode-se observar a corrente de entrada e a corrente sobre os indutores  $L_1$  e  $L_2$ .

A Figura 6a apresenta as correntes sobre o interruptor  $S_1$  e diodos  $D_1$ ,  $D_2$  e  $D_3$ , observa-se que as correntes sobre os diodos apresentam valores distintos, uma vez que as correntes se dividem durante a primeira etapa de operação. Na Figura 6b pode-se observar as tensões sobre o interruptor  $S_1$ , diodos  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  e tensão de entrada  $V_{in}$ .

Figura 5. (a) Correntes sobre o interruptor  $S_1$  e diodos  $D_1$ ,  $D_2$  e  $D_3$ , (b) Corrente de entrada e sobre os indutores  $L_1$  e  $L_2$ .



A Figura 7a apresenta as tensões sobre  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  e tensão de entrada  $V_{in}$ , pode-se observar que a tensão nos indutores e capacitores possuem valores iguais a tensão de entrada. Na Figura 7b pode-se observar as correntes nos capacitores  $C_1$  e  $C_2$ , através desta figura pode-se verificar que a corrente sobre estes capacitores chaveados apresentam característica de carga parcial.

Na Tabela 3 apresenta-se uma análise comparativa do conversor proposto com outros dois conversores de elevado ganho e com o conversor *Boost* convencional. Todos os conversores têm as características comuns de serem do tipo *Boost*. Quando comparado aos conversores da Tabela 3, observa-se que o conversor proposto apresenta um maior número de componentes. Porém, este pode operar com ganhos estáticos mais elevados.

Figura 6. (a) Correntes sobre o interruptor  $S_1$  e diodos  $D_1$ ,  $D_2$  e  $D_3$ , (b) Corrente de entrada e sobre os indutores  $L_1$  e  $L_2$ .

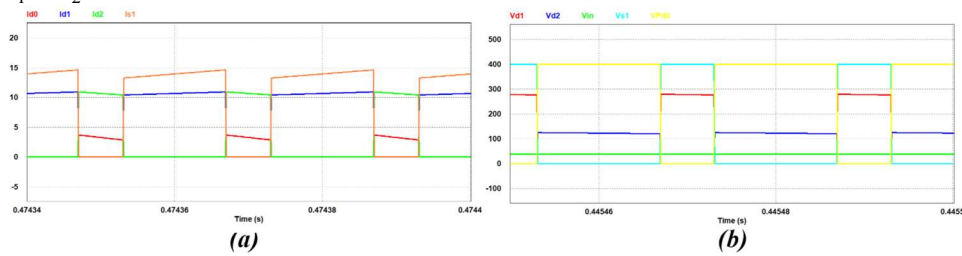


Figura 7. (a) Tensão de entrada  $V_{in}$ , tensão sobre  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $C_1$  e  $C_2$ , (b) Corrente sobre os capacitores  $C_1$  e  $C_2$ .

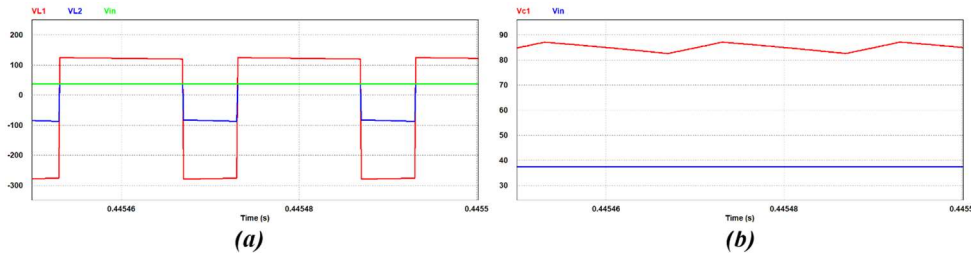


Tabela 3. Análise comparativa

Característica	<i>Boost</i>	Indutor Chaveado	<i>Boost Voltage Lift</i>	Fonseca, 2021	Proposto
<b>Ganho estático</b>	$\frac{1}{1-D}$	$\frac{1+D}{1-D}$	$\frac{2}{1-D}$	$\frac{3-D}{1-D}$	$\frac{1}{(1-D)^2}$
<b>Máxima Tensão nos interruptores</b>	$\frac{V_{in}}{1-D}$	$\frac{V_{in}}{1-D}$	$\frac{2V_{in}}{1-D}$	$\frac{2V_{in}}{1-D}$	$\frac{V_{in}}{(1-D)^2}$
<b>interruptor</b>	1	2	1	1	1
<b>Capacitores</b>	1	1	2	3	2
<b>Indutores</b>	1	2	2	2	2
<b>Diodos</b>	1	1	3	4	3
<b>Corrente de entrada</b>	Continua	Pulsada	Pulsada	Pulsada	Pulsada

## CONCLUSÃO

O trabalho propõe um conversor CC-CC quadrático de elevado ganho estático. Apresenta-se a análise estática do conversor, as equações de projeto dos elementos armazenadores de energia e resultados de simulação numérica. Os resultados de simulação numérica mostram que o conversor pode operar com elevado ganho de tensão. A solução apresentada tem a vantagem possuir elevado ganho estático, máxima tensão sobre o interruptor menor que a tensão de saída e um único interruptor controlado. Como desvantagem, tem-se uma corrente pulsa de entrada.

## REFERÊNCIAS

- Schmitz, L., Martins, D.C., e Coelho, R.F. Comprehensive conception of high step-up dc-dc converters with coupled inductor and voltage multipliers techniques. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, (2020)
- Tang, Y., Wang, T., and Fu, D. Multicell switched-inductor/switched-capacitor combined active network converters. IEEE Transactions on Power Electronics, (2014).
- Vázquez, N., Medina, F., Hernandez, C., Arau, J., e Vázquez, E. Double tapped-inductor boost converter. IET Power Electronics, 8(5), (2015).
- Matsuo, H, Harada, K. "The cascade connection of switching regulators," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 12, no. 2, pp. 192-198, Mar. 1976
- Fonseca, Z.P, Gules, R. CONVERSOR CC-CC BOOST COM CÉLULA LCL E CAPACITOR CHAVEADO, CONTECC 2021.