

## Projeto, dimensionamento e implementação de um conversor CC-CC Forward

### Design, dimensioning and implementation of a CC-CC Forward converter

#### RESUMO

Este artigo apresenta os resultados do desenvolvimento de um conversor CC-CC elevador do tipo Forward com tensão de valor intermediário na saída. Este conversor possui como características: operação em alta frequência, isolamento galvânica, múltiplas saídas, corrente de saída com baixa ondulação e valores intermediários de tensão de saída. É apresentada uma introdução sobre os conversores CC-CC, em seguida é realizada a análise da topologia e de suas etapas de operação, de forma a obter suas equações de projeto. Posteriormente é realizada a simulação numérica, e por fim a implementação e testes experimentais do conversor para comprovação de desempenho.

**PALAVRAS-CHAVE:** Eletrônica de potência. Conversores de corrente elétrica. Circuitos eletrônicos.

#### ABSTRACT

This article presents the results of the development of a forward type DC-DC converter with intermediate voltage at the output. This converter features: high frequency operation, galvanic isolation, multiple outputs, output current with low ripple and intermediate output voltage values. An introduction to the CC-DC converters is presented, then the topology and its stages of operation are analyzed, in order to obtain its design equations. Subsequently, numerical simulation is carried out, and finally the implementation and experimental tests of the converter to prove performance.

**KEYWORDS:** Power electronics. Electric current converters. Electronic circuits.

Igor Marson Granado  
[igormgranado@gmail.com](mailto:igormgranado@gmail.com)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Paulo Junior Silva Costa  
[paulojcosta@utfpr.edu.br](mailto:paulojcosta@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

**Recebido:** 19 ago. 2020.

**Aprovado:** 01 out. 2020.

**Direito autorial:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



## INTRODUÇÃO

Os conversores eletrônicos CC-CC, os quais são amplamente empregados em fontes chaveadas, geração fotovoltaica, fontes de alimentação ininterrupta, microeletrônica entre outras mais, podem ser divididos em não isolados e isolados. Os conversores não isolados são os que não possuem isolamento galvânico entre a entrada e saída do conversor, as topologias mais comuns são os conversores: Buck, Boost, Cúk e Buck-Boost (BARBI, MARTINS, 2000).

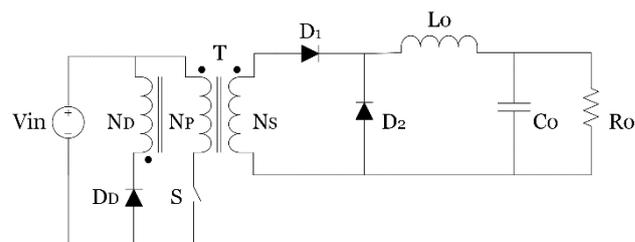
Os conversores isolados são os que possuem isolação entre a entrada e saída, esta isolação é feita por intermédio da incorporação de um transformador ao conversor, desta forma o transformador irá operar na frequência de comutação do conversor e o volume do transformador será menor. Pela escolha correta da relação de espiras é possível evitar que os semicondutores sejam subdimensionados e superdimensionados, ocasionando maior eficiência e redução de custos (Erickson, 2013). Utilizam-se conversores isolados quando são desejadas múltiplas saídas que podem ser obtidos de maneira simples apenas se adicionando múltiplos enrolamentos do lado secundário. As topologias mais comuns são os conversores: Flyback, Forward, Half Bridge, Full Bridge e Push Pull (BARBI, 2007).

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um conversor elevador isolado com saída de tensão com valores intermediários. Dentre os conversores isolados um dos que mais se destaca é o Forward, por ter menor quantidade de componentes e por possuir fonte de corrente na saída proporcionando uma corrente com baixa ondulação.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O conversor Forward é oriundo do conversor Buck, e por isto possui as características de fonte de tensão em sua entrada e fonte de corrente em sua saída. No entanto, o conversor Forward possui um transformador em sua estrutura, o qual confere-lhe a capacidade de prover isolação galvânica entre o estágio de entrada e saída do conversor, o que também possibilita a obtenção de múltiplas tensões de saída. O referido conversor também pode operar como elevador ou abaixador de tensão, isto em virtude da relação de transformação escolhida. A figura (1) apresenta a topologia deste conversor.

Figura 1 – Topologia Conversor CC-CC Forward com enrolamento de Desmagnetização.



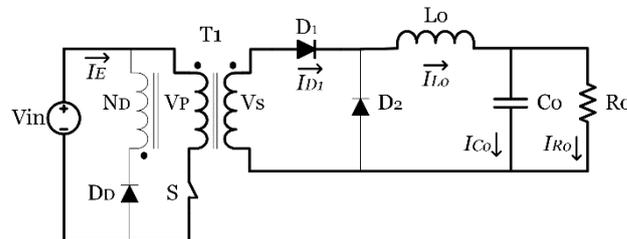
Fonte: Autoria própria.

a) Etapas de operação

No modo de condução contínua a análise deste conversor pode ser feita em três etapas. Para a descrição das etapas admite-se que os componentes são ideais e que o conversor opera em regime permanente.

A primeira etapa de operação corresponde a magnetização do transformador  $T_1$ , inicia-se em  $t_0$  e termina em  $ton$ . Em  $t_0$  o interruptor  $S$  entra em condução e há circulação de corrente no enrolamento primário de  $T_1$ , esta corrente transforma-se em energia magnética que induz uma força eletromotriz no enrolamento secundário de  $T_1$ , esta indução permite a circulação de corrente no enrolamento secundário através do diodo  $D_1$  e do indutor  $L_o$ , a corrente em  $D_1$  e  $L_o$  crescem linearmente e atingem seu pico em  $ton$  quando  $S$  será bloqueada. Nesta etapa os diodos  $D_D$  e  $D_2$  estão polarizados reversamente com tensões no valor de  $-V_{in}$  e  $-V_s$ . O circuito referente a primeira etapa é apresentado a seguir.

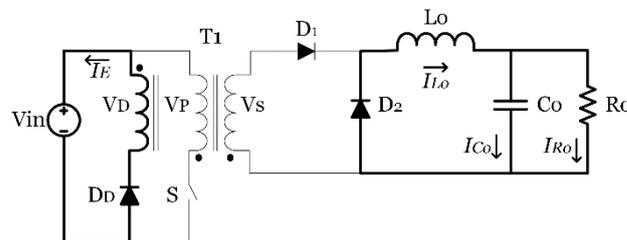
Figura 2 – Primeira etapa de operação.



Fonte: Autoria própria.

A segunda etapa corresponde a desmagnetização do transformador  $T_1$ , está inicia-se em  $ton$  e termina em  $ta$ . Em  $ton$  o interruptor  $S$  encontra-se bloqueado. A energia armazenada no transformador  $T_1$  é transferida para a fonte  $V_{in}$  através do diodo  $D_D$  e do enrolamento de desmagnetização  $N_D$ . O diodo  $D_2$  entra em condução, a corrente em  $D_2$  e  $L_o$  decresce linearmente até  $ta$ .  $D_1$  apresenta-se polarizado reversamente e com a tensão de  $-V_s$ . Durante esta etapa o indutor  $L_o$  fornece energia para o capacitor  $C_o$  e para a carga  $R_o$ . Durante esta etapa a tensão sobre o interruptor é igual a  $(V_{in} + V_s \frac{N_p}{N_s})$ . A figura (3) representa a segunda etapa de operação.

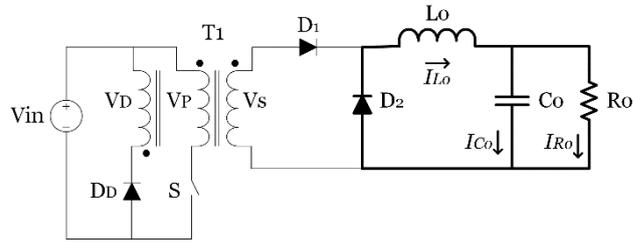
Figura 3 – Segunda etapa de operação.



Fonte: Autoria própria.

A terceira etapa começa em  $ta$  e termina em  $tof$ . Durante esta etapa o interruptor encontra-se bloqueado e os diodos  $D_D$  e  $D_1$  estão polarizados reversamente. A corrente no indutor  $L_o$  e no diodo  $D_2$  decresce linearmente, esta corrente é fornecida ao capacitor  $C_o$  e a carga  $R_o$ . Na figura a seguir podem ser melhor observados estes aspectos.

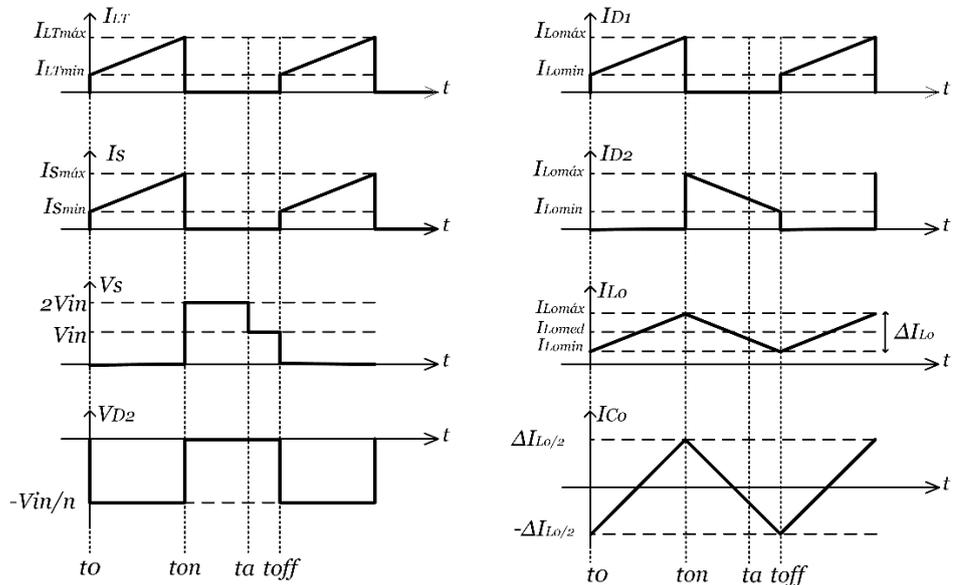
Figura 3 – Terceira etapa de operação.



Fonte: Autoria própria.

Após a terceira etapa o interruptor irá conduzir e o conversor voltará a primeira etapa novamente. Para uma melhor compreensão do conversor estão dispostas a seguir as principais formas de ondas ideais de tensão e corrente.

Figura 4 – Formas de onda do conversor Forward.



Fonte: Autoria própria.

b) Ganho estático

O ganho estático representa a relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada. Para o conversor CC-CC Forward, o ganho estático é demonstrado pela expressão (1).

$$\frac{V_o}{V_{in}} = D \frac{N_s}{N_p} \tag{1}$$

Onde:

- $V_o$ : valor médio da tensão de saída;
- $V_{in}$ : valor médio da tensão de entrada;
- $D$ : razão cíclica;
- $N_p$ : número de espiras do enrolamento primário;
- $N_s$ : número de espiras do enrolamento secundário.

A razão cíclica é definida pela expressão (2).

$$D = \frac{ton}{Ts} \quad (2)$$

Onde:

- $ton$ : tempo de condução do interruptor;
- $Ts$ : período de chaveamento.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

O circuito utilizado para as simulações numéricas no software PSIM foi o de um conversor Forward com duas saídas. As simulações foram realizadas a partir das especificações de projeto presentes na tabela (1).

Tabela 1 – Especificações de projeto.

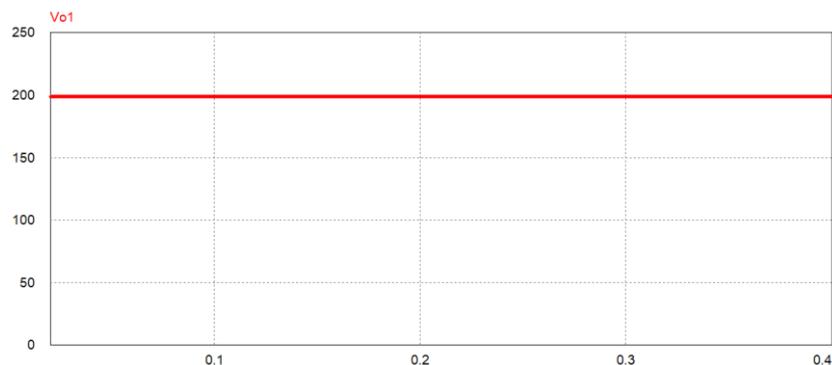
Especificações	Valores de projeto
Tensão de entrada - $V_{in}$	12V
Tensão de saída - $V_o$	200V
Potência de saída - $P_o$	250W
Quantidade de saídas (secundários)	2
Tensão de saída total - $V_{ot}$	400V
Potência de saída total - $P_{ot}$	500W
Frequência de comutação - $f_s$	100kHz
Razão cíclica - $D$	0,4
Ondulação de corrente no indutor - $\Delta I_L$	30%
Ondulação da tensão de saída - $\Delta V_o$	1%

Fonte: Autoria própria.

A partir da expressão (1) e das especificações de projeto chegou-se à relação de transformação no valor de 16,667 para cada saída (secundário).

A figura (4) apresenta a forma de onda da tensão na saída do primeiro secundário, observa-se que o valor de tensão em regime permanente é de 199V. Salienta-se que ambas as tensões de saída dos secundários possuem valores iguais.

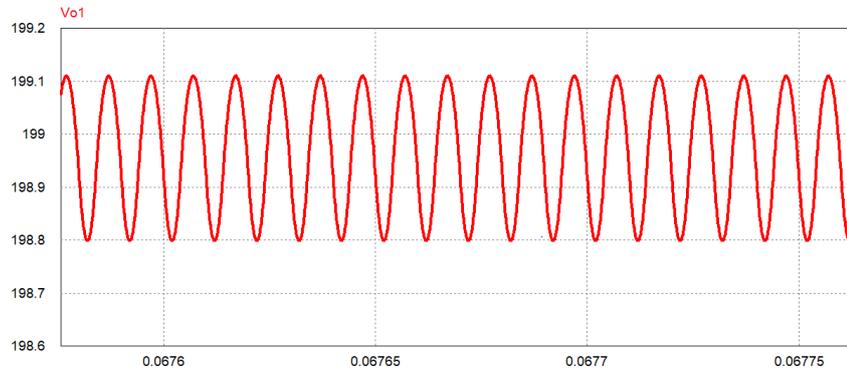
Figura 4 – Tensão de saída do primeiro secundário.



Fonte: Autoria própria.

A figura (5) apresenta um detalhe da ondulação da tensão de saída do primeiro secundário, nota-se uma ondulação de aproximadamente 0,3V.

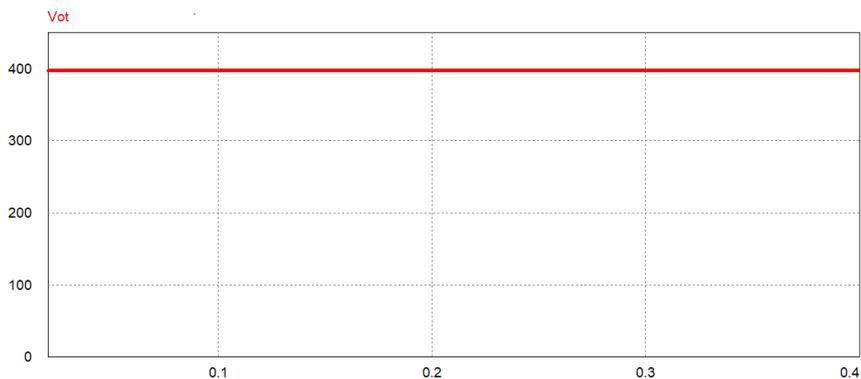
Figura 5 – Detalhe de ondulação de saída do primeiro secundário.



Fonte: Autoria própria.

A soma das tensões de saída dos dois secundários é apresentada na figura (6). Observa-se que a tensão em regime permanente é de 398V.

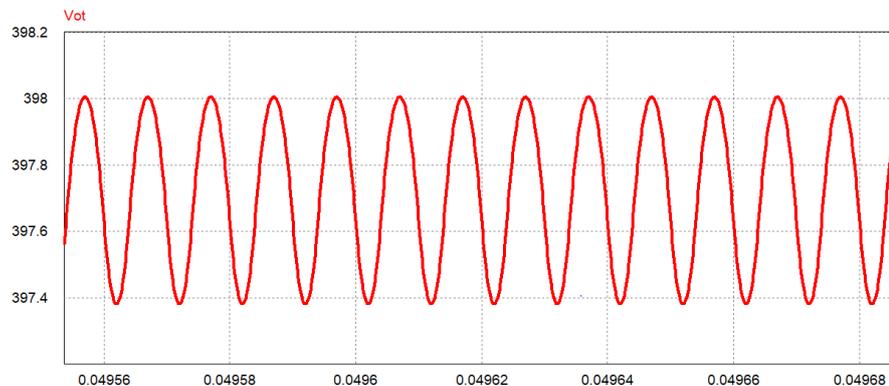
Figura 5 – Tensão de saída dos secundários somados.



Fonte: Autoria própria.

O detalhe de ondulação da tensão dos secundários somados é apresentado na figura (7), observa-se uma ondulação de 1V.

Figura 6 – Tensão de saída dos secundários somados.



Fonte: Autoria própria.

O conversor apresentou uma potência de saída de 493,52W e uma tensão de 398V chegando perto do valor esperado, apresentando um erro máximo de 1,3% entre o cálculo teórico e a simulação.

## CONCLUSÃO

O trabalho apresentou resultados teóricos e simulados do desenvolvimento de um conversor elevador isolado, o circuito proposto apresenta como características: alto rendimento e possibilidade de várias saídas (secundários), que combinados podem gerar valores intermediários de tensão e potência.

No decorrer do estudo do conversor Forward foi possível realizar o projeto deste, posteriormente realizou-se a simulação para verificação dos resultados e em seguida o dimensionamento dos componentes. A última etapa que diz respeito a implementação e implementação do conversor não foi possível devido a pandemia de COVID-19 pois houve suspensão das atividades presenciais na universidade e o acesso aos laboratórios foi vetado.

Mesmo sem realizar a implementação pode-se concluir que a partir dos resultados obtidos com a simulação as equações de projeto funcionam pois a pequena discrepância entre os valores teóricos e os simulados se devem aos modelos utilizados para os componentes por parte do software de simulação, desta maneira valida-se todas as etapas que foram concluídas durante o projeto do conversor Forward.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos órgãos de fomento: CAPES, CNPq e Fundação Araucária por propiciarem o desenvolvimento da ciência brasileira e conseqüentemente deste trabalho. Agradeço ao meu orientador Paulo Junior Silva Costa por me orientar de maneira correta e possibilitar a realização deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

BARBI, Ivo; MARTINS, Denizar Cruz. Conversores CC-CC básicos não isolados. Florianópolis: Edição dos autores, 2000.

BARBI, Ivo. Eletrônica de potência: Projeto de fontes chaveadas. Edição do autor, 2007.

BARBI, Ivo; FONT, Carlos Henrique Illa; ALVES, Ricardo Luis. Projeto físico de indutores e transformadores. Documento Interno (INEP-2002), 2002.

BARBI, I. Estudo do Circuito Grampeador para os Conversores Flyback e Forward e do Circuito Equivalente do Transformador de Três Enrolamentos. INEP, UFSC, relatório interno, 2007.

POMILIO, José Antenor. Eletrônica de potência. Publicação FEEC, v. 1, p. 98, 2014.

ERICKSON, Robert W.; MAKSIMOVIC, Dragan. Fundamentals of power electronics. Springer Science & Business Media, 2007.

VORPERIAN, V. Simplified analysis of PWM converters using the model of the PWM switch, Parts I (CCM) and II (DCM)[J]. Transactions on Aerospace and Electronics Systems, v. 26, n. 3, p. 21-48, 1990.

ANGÉLICO, Bruno A.; CAMPANHOL, Leonardo BG; DA SILVA, Sérgio A. Oliveira. Proportional–integral/proportional–integral–derivative tuning procedure of a single-phase shunt active power filter using Bode diagram. IET Power Electronics, v. 7, n. 10, p. 2647-2659, 2014.

BORGES, Arthur Jardim Nogueira et al. Conversor duplo Forward PWM a duas chaves principais e duas chaves auxiliares com comutação suave. 2006.

ANDRADE, Alexandre Motta de et al. Análise, desenvolvimento e projeto de um conversor duplo Forward on-off zcs para aplicação em fontes chaveadas isoladas. 2012.