

DESENVOLVIMENTO DE UM CONVERSOR CC-CC BOOST-FORWARD INTEGRADO PARA APLICAÇÕES COM ELEVADO GANHO DE TENSÃO

PABLO F. S. COSTA, JULIAN C. GIACOMINI, ANTÔNIO M. S. S. ANDRADE, LUCIANO SCHUCH, MÁRIO L. S. MARTINS

Grupo de Eletrônica de Potência e Controle – GEPOC - Universidade Federal de Santa Maria

CEP: 97105-900, Santa Maria, RS, BRASIL

*E-mails: pablofscosta@gmail.com, julian.c.giacomini@gmail.com,
antonio.m.spencer@gmail.com, schuch.prof@gmail.com, mariolsm@gmail.com*

Abstract— This paper presents a topology of an integrated DC-DC converter for high voltage gain applications. The topology proposed combines the Boost and Forward converters employing only an active switch, which results in a DC-DC converter with a high voltage gain and that has the characteristics of both converters. The main equations are obtained from the analysis of the converter waveforms. A brief comparison with the classical topologies of DC-DC converters is also performed. Finally, some experimental results show the performance of the proposed converter.

Keywords— Boost-Forward, High voltage gain, DC-DC converter, Converter integration.

Resumo— Este artigo apresenta uma topologia de conversor CC-CC integrado para aplicações que exigem um elevado ganho de tensão. A topologia proposta integra os conversores Boost e Forward empregando um único interruptor ativo, resultando em um conversor CC-CC com elevado ganho de tensão e que combina as características de ambos os conversores. Uma análise da topologia e de suas etapas de operação é apresentada de modo a obter suas principais equações de projeto. Uma comparação com os conversores CC-CC clássicos também é realizada. Por fim, resultados experimentais demonstram o desempenho do conversor proposto.

Palavras-chave— Boost-Forward, Elevado ganho de tensão, Conversor CC-CC, Integração de conversores.

1 Introdução

O interesse em conversores CC-CC com elevado ganho de tensão tem aumentado significativamente nos últimos anos. (Tofoli et al, 2015). Usualmente, esses conversores são utilizados como uma interface entre a fonte de alimentação de baixa tensão e as cargas de saída, as quais necessitam de uma tensão mais elevada para sua operação. Sistemas de geração fotovoltaica (FV), veículos elétricos, geração distribuída, células a combustível, fontes de alimentação ininterrupta, entre outros, são exemplos destes sistemas (Hu et al, 2016). Nessas aplicações, os conversores CC-CC elevadores de tensão podem ser isolados ou não isolados. Contudo, é de extrema importância que tais conversores apresentem um elevado rendimento (Brito et al, 2012).

Dentre os conversores CC-CC clássicos não isolados elevadores de tensão se destaca o conversor Boost. Isto se deve porque este conversor apresenta uma estrutura simples, elevado ganho de tensão e reduzida ondulação de corrente na entrada operando em modo de condução contínua (Cabral et al, 2013). No entanto, para aumentar seu ganho de tensão, a razão cíclica também deve aumentar. Por consequência, a elevação da razão cíclica no conversor tende a aumentar os esforços nos componentes semicondutores, prejudicando o rendimento. Sendo assim, existe uma restrição para o ganho de tensão do conversor Boost para que seu rendimento seja preservado.

Por outro lado, os conversores CC-CC isolados permitem elevar o ganho de tensão através de transformadores ou indutores acoplados, como é o caso dos conversores clássicos Cúk, Flyback, Forward, Zeta e SEPIC (Dreher et al, 2012). Dentre estes conversores, os considerados mais simples são os conversores Flyback e Forward. Com relação ao conversor Flyback, à medida que se eleva a razão de transformação do indutor acoplado, o rendimento tende a diminuir (Cha et al, 2015). Além disso, cabe salientar que a corrente de saída do conversor Flyback é descontínua, o que aumenta a capacitância de saída. Este inconveniente não é verificado no conversor Forward, pois o filtro de saída é constituído por um indutor e um capacitor, resultando em uma corrente de saída com uma ondulação reduzida com relação ao conversor Flyback. Tais características são atrativas, como por exemplo, em aplicações de carga de baterias (Shafiei et al, 2016), micro-inversores (Abramovitz et al, 2016), entre outras. Contudo, o ganho de tensão do conversor Forward é restringido pela sua razão cíclica de operação, a qual é limitada em até 0,5 para permitir a desmagnetização do transformador (considerando que o enrolamento de desmagnetização possui o mesmo número de espiras do enrolamento primário).

Deste modo, este artigo propõe uma topologia de conversor CC-CC com um elevado ganho de tensão empregando uma técnica de integração de conversores estáticos (Andrade et al, 2013). Neste caso, objetiva-se agregar as vantagens do conversor Boost e do conver-

por Forward, ao mesmo tempo em que se deseja superar as desvantagens associadas à redução da razão cíclica, aos esforços nos semicondutores e a limitação da desmagnetização do transformador.

Portanto, este artigo encontra-se subdividido em três seções principais. Na Seção 2, a topologia do conversor proposto é apresentada juntamente com suas principais formas de onda, onde podem ser obtidas as equações dinâmicas dos elementos armazenadores de energia. Em seguida, na Seção 3 a análise em regime permanente é realizada de modo a verificar o ganho estático do conversor e as equações de projeto dos elementos passivos. Ainda nesta seção, uma análise dos esforços de tensão e corrente nos semicondutores é realizada a partir da comparação com as topologias clássicas Boost e Forward. Por fim, resultados experimentais são mostrados na Seção 4 para verificar o funcionamento do conversor proposto.

2 Princípio de Operação

A topologia do conversor Boost-Forward proposto é apresentada na Figura 1. Como o próprio nome sugere, esta topologia integra os conversores CC-CC Boost e Forward empregando apenas um interruptor ativo, resultando em uma conexão série na saída. Ou seja, a tensão de saída do conversor (V_o) é a soma das tensões de saída V_b e V_f . Além disso, o transformador é compartilhado por ambos os conversores, uma vez que o conversor Boost utiliza a indutância de magnetização do transformador como elemento armazenador de energia.

O conversor Boost-Forward integrado é do tipo elevador de tensão e possui as características necessárias para as aplicações mencionadas anteriormente, evidenciando-se ainda as seguintes vantagens: 1) elevado ganho de tensão, sendo que a tensão de saída (V_o) é igual à soma da tensão de saída do conversor Boost (V_b) e do conversor Forward (V_f); 2) redução dos esforços de tensão nos semicondutores, podendo ser empregados diodos e mosfet's com menores perdas, o que aumenta o rendimento do conversor; 3) a desmagnetização do transformador é dada pela diferença de tensão ($V_i - V_b$), o que possibilita a operação com uma razão cíclica de até 100%.

Toda a análise do conversor proposto será realizada admitindo-se as seguintes considerações:

- As etapas de operação apresentadas e o respectivo equacionamento serão feitos considerando-se a operação do conversor com componentes ideais;

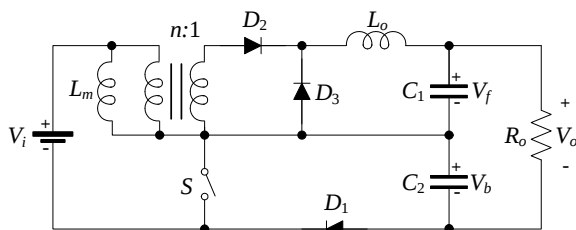


Figura 1. Conversor Boost-Forward proposto.

- As capacitâncias C_1 e C_2 são suficientemente grandes de tal forma que as tensões V_f e V_b são consideradas constantes (reduzida ondulação);

- A razão de transformação do transformador é dada por: $n = N_1/N_2$;

- O conversor opera em regime permanente e em modo de condução contínua (MCC).

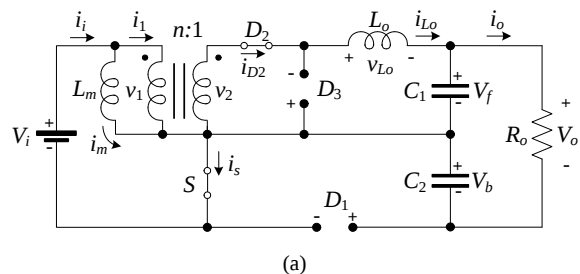
Etapa 1 ($0 - DT_s$) – (Figura 2(a)): Durante esta etapa de operação, o interruptor S entra em condução. Com isso, a tensão aplicada ao primário do transformador é igual à tensão de entrada ($v_1 = V_i$), o que acaba por polarizar diretamente o diodo D_2 . Os diodos D_3 e D_1 são mantidos bloqueados, pois a tensão aplicada sobre eles é igual à tensão do secundário ($-v_2$) e à tensão de saída do capacitor C_2 ($-V_b$), respectivamente. Nesta etapa de operação, ocorre o armazenamento de energia tanto no indutor de saída (L_o) quanto no indutor acoplado (L_m), uma vez que a tensão aplicada sobre eles é positiva. As correntes em L_m e L_o são definidas pelas equações (1) e (2), respectivamente:

$$i_m(t) = \frac{V_i}{L_m}t + I_{m,min} \quad (1)$$

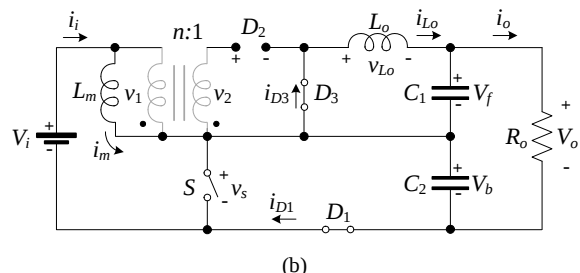
$$i_{L_o}(t) = \frac{V_i - V_f}{L_o}t + I_{L_o,min} \quad (2)$$

A corrente que circula pelo interruptor (i_s) é igual a corrente de entrada ($i_i = i_s$), que é a soma da corrente do primário (i_1) com a corrente de magnetização (i_m). Além disso, enquanto C_1 é carregado, C_2 fornece energia para a carga.

Etapa 2 ($DT_s - T_s$) – (Figura 2(b)): Na segunda etapa de operação, o interruptor S é bloqueado. Com isso, a tensão aplicada ao primário do transformador possui polaridade negativa, uma vez que $v_1 = V_i - V_b$ e $V_b > V_i$. Logo, durante esta etapa, a desmagnetiza-



(a)



(b)

Figura 2. Etapas de operação. (a) Etapa 1. (b) Etapa 2.

ção do transformador ocorre com uma tensão sempre maior ou igual à tensão de entrada, o que possibilita a operação com razões cíclicas superiores a 0,5. Como a tensão no secundário também apresenta polaridade invertida com relação à primeira etapa, o diodo D_2 é bloqueado e o diodo D_3 entra em condução de modo a propiciar a roda livre para a corrente no indutor L_o .

A corrente armazenada no indutor L_m é transferida para a saída do conversor, pois o diodo D_1 entra em condução. Portanto, nesta etapa não ocorre transferência de energia para o secundário do transformador ($i_1 = 0$), mas somente a descarga da energia armazenada no indutor L_m . Desta forma, as equações (3) e (4) definem as correntes em L_m e L_o , respectivamente:

$$i_m(t) = \frac{V_i - V_b}{L_m}(t - DT_s) + I_{m,máx} \quad (3)$$

$$i_{Lo}(t) = -\frac{V_f}{L_o}(t - DT_s) + I_{Lo,máx} \quad (4)$$

A corrente no diodo D_1 é igual à corrente de entrada (i_i), enquanto que a corrente no diodo D_3 é igual à corrente no indutor L_o . Ainda nesta etapa, o capacitor C_2 recebe energia da entrada e o capacitor C_1 entrega energia para a carga. A ilustração das principais formas de onda do conversor durante as duas etapas

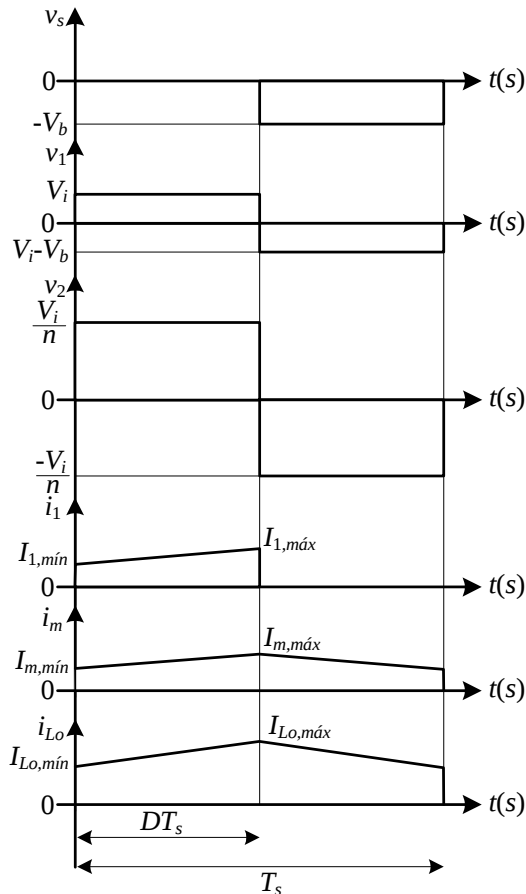


Figura 3. Formas de onda do conversor Boost-Forward.

de operação está representada na Figura 3.

3 Análise em regime permanente

Nesta seção é efetuada a análise em regime permanente do conversor proposto, possibilitando a obtenção do ganho estático de tensão. Além disso, as equações de projeto dos elementos passivos são obtidas. Uma análise dos esforços de tensão e corrente nos semicondutores também é realizada.

3.1 Ganho estático

A obtenção do ganho estático do conversor Boost-Forward operando em MCC pode ser realizada a partir da análise do balanço de energia nos indutores L_m e L_o . Inicialmente, considerando o balanço volt-segundo no indutor L_m em regime permanente, a tensão média sobre o mesmo deve ser nula:

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{DT_s} V_i dt + \frac{1}{T_s} \int_{DT_s}^{T_s} (V_i - V_b) dt = 0. \quad (5)$$

Logo, rearranjando (5) chega-se ao ganho estático clássico associado ao conversor Boost:

$$V_b = \frac{V_i}{1-D}. \quad (6)$$

Da mesma forma, considerando o balanço volt-segundo no indutor L_o , tem-se que:

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{DT_s} \left(\frac{V_i}{n} - V_f \right) dt - \frac{1}{T_s} \int_{DT_s}^{T_s} V_f dt = 0. \quad (7)$$

Que resulta na equação clássica do ganho estático associado ao conversor Forward:

$$V_f = \frac{DV_i}{n}. \quad (8)$$

Como a tensão total de saída do conversor é a soma das tensões V_b e V_f , o ganho estático global pode ser encontrado combinando (6) e (8):

$$M = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-D} + \frac{D}{n} = \frac{D(1-D) + n}{n(1-D)}. \quad (9)$$

A partir de (9), percebe-se que o conversor Boost-Forward apresenta um ganho estático com característica quadrática. Para melhor ilustrar, a Figura 4 mostra o ganho estático do conversor em função da razão cíclica considerando diferentes razões de transformação. Como esperado, percebe-se que à medida que a razão cíclica aumenta, o ganho estático também aumenta. Similarmente, quanto menor a razão de

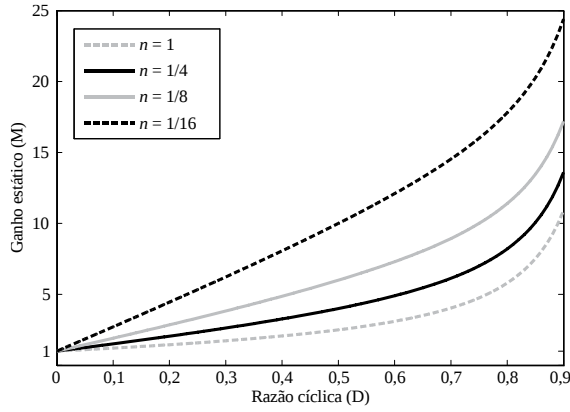


Figura 4. Ganho estático do Boost-Forward em função da razão cíclica para diferentes razões de transformação.

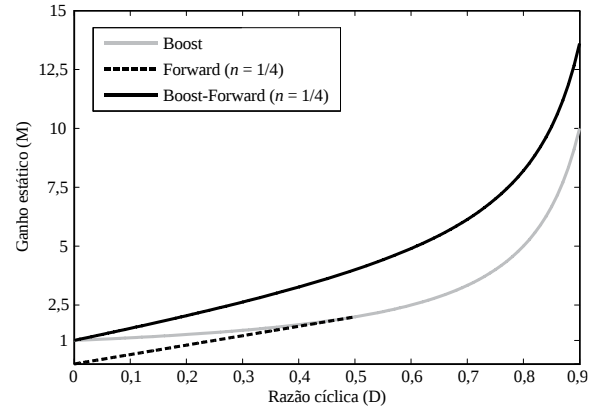


Figura 5. Comparação do ganho estático do conversor Boost-Forward em relação aos conversores Boost e Forward.

transformação, maior será o ganho estático para um mesmo valor de razão cíclica. Além disso, evidencia-se inclusive que o conversor Boost-Forward é um conversor do tipo elevador de tensão. Isto se explica pelo fato de que a tensão de saída da parcela Boost (V_b) será sempre maior que a tensão de entrada (V_i). Logo, implica também que a tensão de saída total (V_o) sempre será maior que a tensão de entrada, independentemente do valor de n .

Na Figura 5 encontra-se uma comparação gráfica dos ganhos estáticos dos conversores convencionais Boost e Forward com relação ao conversor Boost-Forward. Neste caso, as curvas foram traçadas para $n = 1/4$ e considerando que o conversor Forward convencional possui o mesmo número de espiras para os enrolamentos primário e terciário, tendo, como consequência, a limitação da razão cíclica em 0,5. É possível verificar na Figura 5 que o ganho estático do conversor integrado é maior do que os ganhos estáticos dos conversores convencionais para toda a faixa de razão cíclica e considerando o mesmo n .

3.2 Metodologia de Projeto

Os indutores e capacitores do conversor CC-CC Boost-Forward podem ser projetados de acordo com as suas respectivas ondulações de corrente e tensão. Desta forma, considerando a expressão (1) que descreve a corrente na primeira etapa no indutor L_m , tem-se em $t = DT_s$ o seguinte:

$$I_{m,máx} = \frac{V_i}{L_m} DT_s + I_{m,mín} . \quad (10)$$

A partir de (10) e definindo a ondulação de corrente em L_m como sendo $I_{m,máx} - I_{m,mín}$, resulta na seguinte equação de projeto:

$$L_m = \frac{DV_i}{f_s \Delta i_m} . \quad (11)$$

Similarmente para o indutor L_o , em $t = DT_s$ obtém-se a corrente máxima empregando a expressão (2):

$$I_{Lo,máx} = \frac{V_i - V_f}{L_o} DT_s + I_{Lo,mín} . \quad (12)$$

Rearranjando (12) obtém-se o seguinte:

$$L_o = \frac{D \left(\frac{V_i}{n} - V_f \right)}{f_s \Delta i_o} . \quad (13)$$

Substituindo (8) em (13) chega-se a equação de projeto para o indutor L_o :

$$L_o = \frac{DV_i(1-D)}{f_s \Delta i_o n} . \quad (14)$$

Nota-se que (11) e (14) são idênticas às equações de projeto para os indutores dos conversores Boost e Forward, respectivamente. O mesmo se aplica para C_1 e C_2 , os quais podem ser projetados a partir das equações clássicas (Kazimierczuk, 2008):

$$C_1 = \frac{DV_i(1-D)}{8f_s^2 \Delta V_1 L_o n} \quad (15)$$

$$C_2 = \frac{I_o D}{f_s \Delta V_2} . \quad (16)$$

3.3 Esforços de corrente e tensão

A análise dos esforços de tensão e corrente permite a escolha dos dispositivos semicondutores do conversor proposto. Logo, nesta subseção são apresentadas as equações que definem o valor máximo da tensão de bloqueio e o valor máximo da corrente nos semicondutores do conversor.

Nesta topologia, o interruptor S deve bloquear a tensão V_b do conversor integrado, desta forma, a tensão sobre a chave é dada por.

$$V_{s,m\acute{a}x} = V_b. \quad (17)$$

Com relação aos níveis de corrente suportados pelo interruptor S , pode-se comprovar que o valor máximo de corrente é dado por (18):

$$I_{s,m\acute{a}x} = \frac{I_o(1-D+n)}{n(1-D)} + \frac{V_i D}{2f_s} \left(\frac{1}{L_m} + \frac{(1-D)}{L_o n^2} \right). \quad (18)$$

Com relação ao diodo D_1 , o mesmo deve ser capaz de suportar uma tensão reversa igual à tensão V_b :

$$V_{D1,m\acute{a}x} = V_b. \quad (19)$$

Ainda, o diodo D_1 deve suportar uma corrente máxima determinada por:

$$I_{D1,m\acute{a}x} = \frac{I_o}{(1-D)} + \frac{V_i D}{2f_s L_m}. \quad (20)$$

No caso do diodo D_2 , o seu valor máximo de tensão reversa é igual à diferença das tensões de V_b e V_i , refletida para o secundário do transformador:

$$V_{D2,m\acute{a}x} = \frac{V_b - V_i}{n} \quad (21)$$

O valor máximo da corrente para os diodos D_2 e D_3 obedece a seguinte expressão:

$$I_{D2,m\acute{a}x} = I_{D3,m\acute{a}x} = I_o + \frac{V_f(1-D)}{2f_s L_o}. \quad (22)$$

Para o diodo D_3 , o valor máximo da tensão reversa é igual à tensão de entrada refletida para o secundário do transformador:

$$V_{D3,m\acute{a}x} = \frac{V_i}{n}. \quad (23)$$

Por fim, a Tabela 1 mostra o comparativo dos esforços de tensão nos semicondutores das topologias

Tabela 1. Comparativo dos esforços nos semicondutores.

Grandeza	Boost	Forward	Boost-Forward
M	$\frac{1}{1-D}$	$\frac{D}{n}$	$nD + \frac{1}{1-D}$
$V_{s,m\acute{a}x}/V_i$	$\frac{1}{1-D}$	2	$\frac{1}{1-D}$
$V_{D1,m\acute{a}x}/V_i$	$\frac{1}{1-D}$	-	$\frac{1}{1-D}$
$V_{D2,m\acute{a}x}/V_i$	-	$\frac{1}{n}$	$\frac{D}{n(1-D)}$
$V_{D3,m\acute{a}x}/V_i$	-	$\frac{1}{n}$	$\frac{1}{n}$

Boost e Forward (mesmo nº de espiras no primário e no enrolamento de desmagnetização) em relação ao conversor proposto. Como se pode perceber, o interruptor S do conversor proposto possui menor esforço de tensão comparado aos outros conversores da tabela, visto que o mesmo apresenta maior ganho estático. O mesmo acontece com os diodos D_1 , D_2 e D_3 .

4 Resultados

De modo a validar o funcionamento do conversor proposto, esta seção apresenta alguns resultados experimentais. Os parâmetros utilizados encontram-se descritos na Tabela 2. De acordo com (9) e considerando a tensão de entrada (V_i) e a razão de transformação (n) adotadas na Tabela 2, tem-se uma razão cíclica de $D = 0,5$. Isto implica que $V_f = V_b = 60$ V de acordo com (6) e (8).

Na Figura 6 são mostradas as tensões V_b e V_f que compõem a tensão total de saída do conversor. A tensão e a corrente no interruptor são mostradas na Figura 7. Verifica-se que a tensão de bloqueio do interruptor é igual à tensão V_b . Na Figura 8 encontram-se representadas a tensão aplicada ao primário do transformador e a corrente de entrada do conversor. Observa-se que a desmagnetização do transformador é garantida, pois em ambas as etapas de operação a mesma tensão (em módulo) é aplicada ao primário sob uma razão cíclica de 0,5. Na Figura 9 são mostradas a tensão e a corrente no indutor L_o , onde se verifica a ondulação de corrente na saída do conversor. Por fim, a Figura 10 mostra o rendimento do conversor para diferentes tensões de entrada. A partir destes resultados, é possível verificar que o funcionamento do conversor Boost-Forward é condizente com a teoria apresentada no artigo.

5 Conclusão

Este artigo propôs uma topologia de conversor CC-CC que integra os conversores Boost e Forward com um único interruptor. Como principais características da topologia destacam-se: elevado ganho de tensão, reduzidos esforços de tensão nos semicondutores e a capacidade de operação com elevados valores de razão cíclica sem comprometer a desmagneti-

Tabela 2. Parâmetros do conversor implementado.

Símbolo	Descrição	Valor
P_o	Potência de saída	150 W
V_o	Tensão de saída	120 V
n	Razão de transformação	1/4
V_i	Tensão de entrada	30 V
L_m	Indutor magnetizante	0,75 mH
L_o	Indutor de saída	2,7 mH
C_1	Capacitor C_1	2,2 μ F
C_2	Capacitor C_2	9 μ F
f_s	Frequência de comutação	60 kHz
S	Interruptor	IRFP150N
D_1, D_2, D_3	Diodos	MBR40250TG

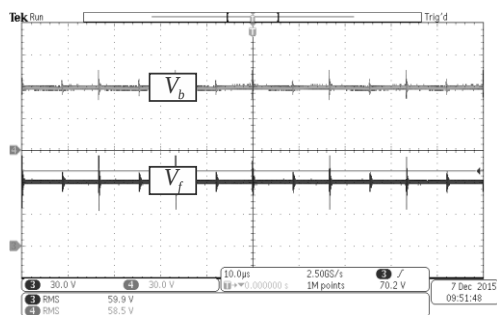


Figura 6. Composição da tensão de saída (V_b e V_f).

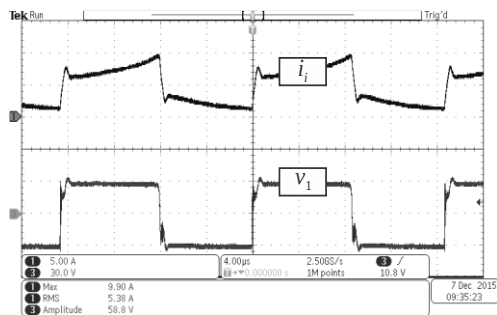


Figura 8. Tensão do primário e corrente de entrada.

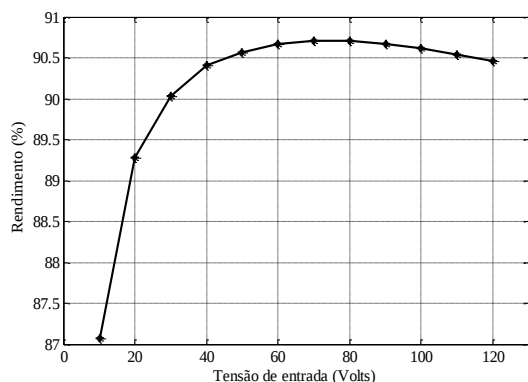


Figura 10. Rendimento experimental do conversor Boost-Forward.

zação do transformador. Uma análise da topologia e de suas etapas de operação foi apresentada, assim como uma comparação com os conversores CC-CC clássicos. Por fim, resultados experimentais demonstraram o desempenho do conversor proposto.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a “Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)” pelo suporte fornecido.

Referências Bibliográficas

Abramovitz, A., Zhao, B., Smedley, K. M. (2016). High-Gain Single-Stage Boosting Inverter for Photovoltaic Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 31, No. 5, pp. 3550-3558.

Andrade, A. M. S. S., Dreher, J. R., Martins, M. L. S. (2013). High Step-up Integrated DC-DC Converters: Methodology of Synthesis and Analysis. In *Proc. COBEP 2013*, pp. 50-57.

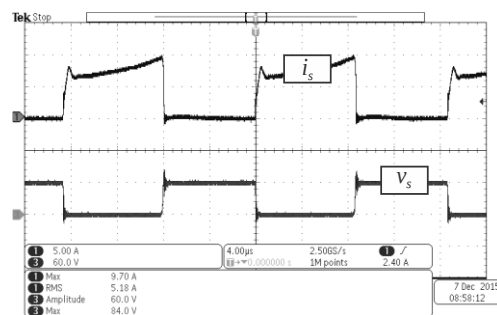


Figura 7. Tensão e corrente no interruptor.

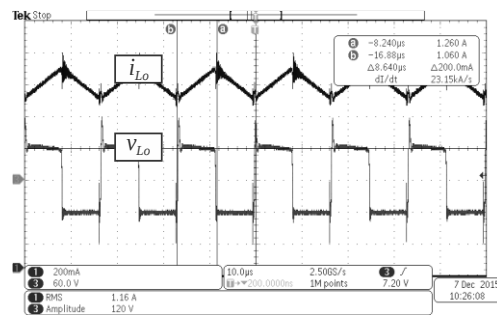


Figura 9. Tensão e corrente no indutor L_o .

Brito, F. J. B., Torrico-Bascopé, R. P., S. Daher, G. V. Torrico-Bascopé. (2012). Comparative Analysis of Three DC-DC Non-isolated Buck Converters. In *Proc. IEEE INDUSCON 2012*, pp. 1-8.

Cabral, J. B. R. F. S., Oliveira, V. G., Novaes, Y. R. (2013). Conversor CC.-CC. Boost Quadrático para Aplicação em Fontes Alternativas. *Eletrôn. Potên.*, Vol. 18, No. 3, pp. 1064-1072.

Cha, W. J., Cho, Y. W., Kwon, J. M., Kwon, B. H. (2015). Highly Efficient Microinverter With Soft-Switching Step-Up Converter and Single-Switch-Modulation Inverter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 62, No. 6, pp. 3516-3523.

Dreher, J. R., Marangoni, F., Ortiz, J. L. R., Rech, C., Martins, M. L. S., Camara, H. T., Flora, L. D. (2012). High Step-up DC/DC Integrated Flyback Topologies. In *Proc. CBA 2012*, pp. 3672-3677.

Hu, X. G., Wang, L., Gong, C. (2016). A Three-State Switching Boost Converter Mixed With Magnetic Coupling and Voltage Multiplier Techniques for High Gain Conversion. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 31, No. 4, pp. 2991-3001.

Kazimierczuk, M. K. (2008). *Pulse-width Modulated DC-DC Power Converters*. Wiley & Sons, Ohio, USA.

Shafiei, N., Ordonez, M., Craciun, M., Botting, C., Edington, M. (2016). Burst Mode Elimination in High-Power LLC Resonant Battery Charger for Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 31, No. 2, pp. 1173-1188.

Tofoli, F. L., Pereira, D. C., Paula W. J., Oliveira Júnior, D. S. (2015). Survey on Non-isolated High-voltage Step-up DC-DC Topologies Based on the Boost Converter. *IET Power Electronics*, Vol. 8, No. 10, pp. 2044-2057.