

INVESTIGAÇÃO DO PROCESSAMENTO PARCIAL DE ENERGIA NOS CONVERSORES FLYBACK E FORWARD CONECTADOS COMO REGULADORES SÉRIE

JONATAN RAFAEL RAKOSKI ZIENTARSKI*, MÁRIO LÚCIO DA SILVA MARTINS†, JOSÉ RENES
PINHEIRO†, HÉLIO LEÃES HEY†

**Instituto Federal Catarinense (IFC) Campus Videira
Videira, SC, Brasil*

†*Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
Santa Maria, RS, Brasil*

Emails: jonatanrrz@gmail.com, mariolsm@gmail.com, jrenes@gepoc.ufsm.br,
heliohey@ufsm.br

Abstract— This paper discusses about the concept of partial power processing in series regulators with isolated topologies conducting a case study of flyback and forward. It is shown a procedure for calculating the nonactive power in these dc/dc converters in order to distinguish which ones are able or not to perform the partial power processing. It is demonstrated that the flyback series regulator processes the same power than an ordinary non-isolated converter, whereas the forward series regulator performs less power processing for a range of voltage gain depending on the transformer's turns ratio. Additionally, analytical models for nonactive power, and experimental results are presented in order to validate the proposed approach.

Keywords— Partial power processing, Partial active power processing, Flyback converter, Forward converter.

Resumo— Este trabalho discute o conceito do processamento parcial de energia em reguladores série que utilizam topologias originalmente isoladas e realiza um estudo de caso das topologias *flyback* e *forward*. É apresentada uma nova abordagem que considera a potência não-ativa nos conversores permitindo distinguir quais topologias são, ou não, capazes de realizar o processamento parcial de energia. Os resultados da análise e da validação experimental comprovam que o regulador série *forward* pode realizar o processamento parcial em uma faixa de ganho de tensão dependendo da relação de espiras utilizada no transformador, enquanto que o regulador série *flyback* processa a mesma quantidade de energia que um conversor convencional não isolado.

Palavras-chave— Processamento parcial de energia, Processamento parcial de potência ativa, Conversor *Flyback*, Conversor *Forward*.

1 Introdução

Nos últimos anos, o processamento parcial de energia (PPP, *partial power processing*) tem sido investigado como uma forma de melhorar a eficiência do processamento de energia em sistemas de geração fotovoltaica (Lee et al., 2008; Li et al., 2012). Seu conceito consiste em fazer com que o conversor estático manipule apenas uma pequena parcela da energia que é entregue à carga, enquanto que uma maior parcela flui diretamente da fonte de entrada para a saída sem perdas (i.e. com eficiência unitária) (Kasper et al., 2014), possibilitando o aumento do rendimento e da densidade de potência.

O processamento parcial de energia pode ser realizado com o uso de um conversor CC-CC cuja saída é conectada em série com sua fonte de alimentação, conforme ilustrado na figura 1 (Zhao et al., 2013; Lee et al., 2008). Neste tipo de regulador série, a tensão de saída do conversor (v_C) é a diferença entre a tensão de saída do sistema (v_{out}) e a tensão de entrada (v_{in}). Quanto menor essa diferença, menor será a potência ativa processada pelo conversor em relação à potência de saída do sistema (Zhou et al., 2015). Esta característica torna os reguladores série adequados para realizar o rastreamento do ponto de máxima potência

(MPP) em sistemas fotovoltaicos, uma vez que a tensão no MPP apresenta uma pequena faixa de variação em tensão, em torno de 20% (Zhou et al., 2015; Agamy et al., 2014). Desta forma, é possível utilizar um regulador série com baixa potência ativa nominal processando somente a quantidade de energia necessária para regular a tensão de saída e permitir o rastreamento do MPP.

Assim, a eficiência global do sistema se torna maior do que a eficiência medida nos terminais do conversor. Esta característica tem induzido alguns trabalhos à uma interpretação equivocada de que se a potência ativa no conversor série é menor, então a eficiência global do sistema será maior do que àquela em um conversor convencional (Agamy et al., 2014). Porém, a análise não pode ignorar o fato de que as perdas internas do conversor não são consequência somente da potência ativa manipulada pelo mesmo, mas também da circulação

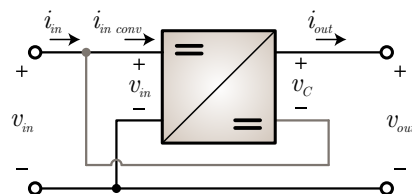


Figura 1: Conversor CC-CC como regulador série.

de energia não-ativa no conversor.

Além disso, existem algumas restrições contraditórias na literatura a respeito do processamento parcial de energia. Por exemplo, Zhao et al. (2013) afirmam que a topologia utilizada no regulador série deve ser isolada para que o PPP possa ser garantido. Entretanto, Agamy et al. (2014) violam esta restrição e utilizam uma topologia não-isolada alegando se tratar de um conversor PPP. Em (Zientarski et al., 2015) é demonstrado que a conexão série não é uma condição suficiente para garantir que o conversor opere como um verdadeiro conversor PPP, e assim, o termo “processamento parcial de potência ativa” (ou PAPP) foi introduzido para se referir a todos conversores conectados na configuração de regulador série, evitando confusão na terminologia. Desta forma, o termo PPP deve ser aplicado somente aos conversores que de fato processam menos energia em seus elementos.

Diante disso, o objetivo do presente trabalho é discutir e ampliar o conceito de processamento parcial de energia a fim de ser possível apontar, dentre diferentes topologias de conversores PAPP, quais permitem ou não o PPP. Para isso, são analisadas duas topologias originalmente isoladas sendo utilizadas na configuração PAPP, são elas a topologia *flyback* PAPP e *forward* PAPP.

2 Energia processada em conversores CC-CC

É sabido que o processamento de energia em um conversor não depende exclusivamente da potência ativa (Zientarski et al., 2015). Por isso, a potência não-ativa torna-se um importante indicador para avaliar se determinada topologia processa mais ou menos energia em seus elementos, mesmo que a potência ativa seja a mesma, revelando quais topologias de conversores permitem ou não o PPP.

Em um conversor, a comutação dos dispositivos semicondutores modifica a configuração do circuito em cada etapa de operação e disso resulta uma maior ou menor circulação de energia. Em circuitos de corrente contínua (CC), onde a frequência fundamental da tensão é zero, este fluxo de energia é chamado de potência não-ativa, de acordo com a definição dada pela norma IEEE Std. 1459 (2010), que introduz uma diferenciação entre os termos adotados para se referir à potência reativa e à não-ativa. A potência não-ativa (N) é o fluxo de energia que não resulta em potência ativa, em qualquer frequência, e sua unidade de medida é o volt-ampere reativo (VAr).

Considerando o conversor operando em regime permanente, pelo balanço volt-segundo nos indutores e o balanço de carga nos capacitores tem-se que a potência ativa nos elementos acumuladores é zero. Entretanto, a quantidade de

energia que é absorvida e liberada por estes elementos durante um período de comutação é diferente de zero e corresponde ao processamento de energia não-ativa. Assim, pode-se definir as variações da energia armazenada no indutor (ΔE_L) e no capacitor (ΔE_C), calculadas por (1) e (2).

$$\Delta E_L = \int_0^{dT_s} |v_L(t) i_L(t)| dt = \int_{dT_s}^{T_s} |v_L(t) i_L(t)| dt, \quad (1)$$

$$\Delta E_C = \int_0^{dT_s} |v_C(t) i_C(t)| dt = \int_{dT_s}^{T_s} |v_C(t) i_C(t)| dt. \quad (2)$$

2.1 Potência não-ativa interna no conversor

A potência não-ativa total processada internamente no conversor (N_{int}) é definida pela quantidade total de energia não-ativa processada durante um período de comutação, para n_L indutores e n_C capacitores, ou seja,

$$N_{int} = \left(\sum_{j=1}^{n_L} 2\Delta E_{Lj} + \sum_{k=1}^{n_C} 2\Delta E_{Ck} \right) / T_s. \quad (3)$$

2.2 Potência não-ativa de entrada e saída

Apesar de uma parcela da potência não-ativa gerada pelo conversor ser processada pelos filtros, é necessário considerar também a potência não-ativa na entrada (N_{in}) e na saída (N_{out}) do conversor, que podem ser calculadas por (4) e (5).

$$N_{in} = \sqrt{S_{in}^2 - P_{in}^2}, \quad (4)$$

$$N_{out} = \sqrt{S_{out}^2 - P_{out}^2}. \quad (5)$$

onde S_{in} e S_{out} são as potências aparentes, e, P_{in} e P_{out} são as potências ativas na entrada e na saída do conversor, respectivamente.

2.3 Potência não-ativa total

A potência não-ativa total do conversor é definida como a soma da potência não-ativa interna do conversor e das potências não-ativas de entrada e saída, ou seja,

$$N_{total} = N_{in} + N_{int} + N_{out}. \quad (6)$$

3 Análise da potência não-ativa processada nos conversores

Com o objetivo de demonstrar a metodologia desenvolvida para avaliação do desempenho dos conversores no que diz respeito à potência não-ativa processada, nesta seção são analisadas as

topologias *flyback* PAPP e *forward* PAPP. As simulações numéricas utilizam os modelos matemáticos dos conversores e o procedimento de cálculo apresentado na seção anterior para um exemplo de projeto cujos parâmetros são apresentados na tabela 2, resultando nos valores de potência não-ativa processada no indutor (N_L), no capacitor de saída (N_C) e na entrada do conversor (N_{in}) para uma varredura de toda a faixa de tensão de entrada. A análise considera uma carga resistiva fixa para toda a faixa, e assim, a potência não-ativa de saída (N_{out}) nesta abordagem é zero.

3.1 Flyback PAPP

A topologia *flyback* PAPP, cujo diagrama esquemático é apresentado na figura 2, foi simulada para diferentes valores de projeto da relação de espiras (n) entre o primário e o secundário do indutor acoplado. Os resultados de simulação da potência não-ativa total em relação à variação da tensão de entrada para diferentes valores de n são apresentados no gráfico da figura 3.

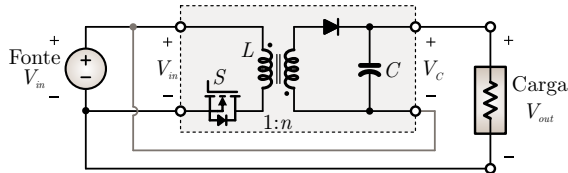


Figura 2: Topologia *flyback* PAPP.

O emprego de valores menores de n permite ao conversor operar com maior razão cíclica para o mesmo ganho de tensão, o que neste caso permite uma redução da corrente *rms* sobre a chave e em contrapartida um aumento da tensão aplicada sobre a mesma. Em relação à potência não-ativa, a redução no valor de n permite uma redução de N_{in} , porém causa um aumento em N_C , fazendo com a potência não-ativa total processada pelo conversor tenha pouca influência do valor de n , conforme observado na figura 3.

Para o caso em que N_{total} é menor ($n = 0,5$), o comportamento de N_{total} , N_L , N_C e N_{in} é apresentado na figura 4. Observa-se que a maior par-

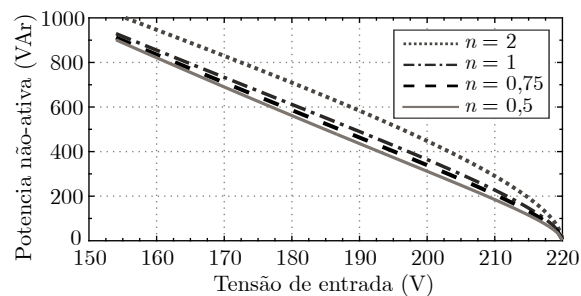


Figura 3: Potência não-ativa total no conversor *flyback* PAPP em função da tensão de entrada para diferentes valores de relação de espiras.

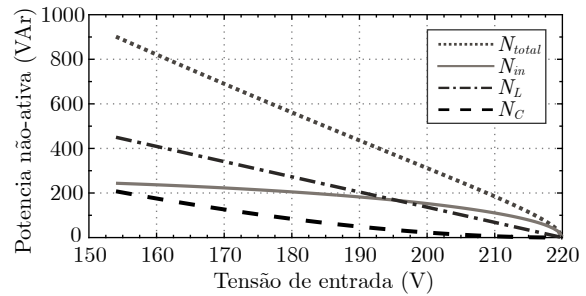


Figura 4: Potência não-ativa nos elementos do conversor *flyback* PAPP com $n = 0,5$.

cela de N é processada pelo indutor acoplado, seguida pela potência não-ativa da entrada, e pelo capacitor.

3.2 Forward PAPP

No caso da topologia *forward* PAPP, apresentada na figura 5, além do indutor de filtro na saída, há um transformador cuja função é transferir energia do lado primário para o secundário sem armazená-la, e cujo valor de relação de espiras (n) pode ser otimizado para se obter um melhor desempenho. A potência não-ativa total processada pelo conversor *forward* PAPP para diferentes valores de n é apresentada na figura 6.

De forma diferente ao que acontece na topologia *flyback* PAPP, o uso de valores menores de n permite uma significativa redução na potência não-ativa processada no conversor *forward* PAPP. Entretanto, é importante destacar que apesar da utilização de um valor pequeno de n permitir a redução de N_{total} , o valor mínimo de n é limitado pelo ganho de tensão desejado para o conversor. No caso de um conversor utilizado para realizar o rastreamento do MPP em um sistema fotovoltaico, verifica-se o emprego de valores de $n = 0,75$ e $n = 0,5$ não permite ao conversor rastrear a tensão de entrada em toda faixa de operação especificada, conforme destacado na figura 6, e assim, o menor valor de n adequado ao projeto é $n = 1$.

A análise da potência não-ativa no conversor *forward* PAPP também deve considerar o fato de que um transformador real possui uma indutância de magnetização finita, e isso provoca a circulação indesejada de uma corrente de magnetização (i_{Lm}) normalmente entre 10 e 20% da corrente do primário (Cathell, 2011), a qual resulta em uma

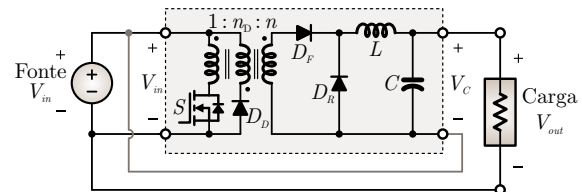


Figura 5: Topologia *forward* PAPP.

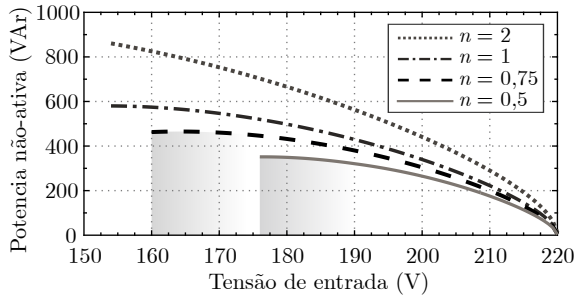


Figura 6: Potência não-ativa total no conversor *forward* PAPP para diferentes valores de n .

transferência de energia não-ativa para o transformador durante a condução da chave, e que é devolvida para a fonte pelo enrolamento de desmagnetização (n_D) durante a etapa de roda-livre. A figura 7 apresenta N_{total} , N_{in} , N_L e N_C para o conversor *forward* PAPP com $n = 1$, onde se destaca a faixa de N_{in} e N_{total} para o valor estimado da corrente de magnetização do transformador.

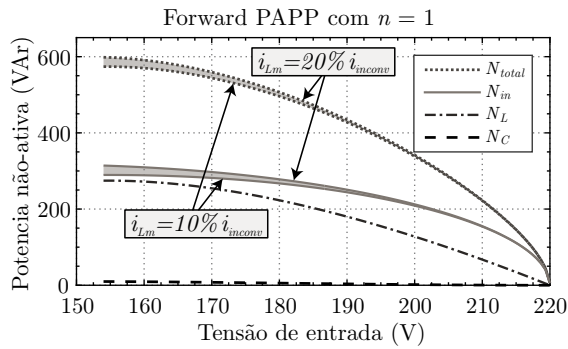


Figura 7: Potência não-ativa no conversor *forward* PAPP com $n = 1$ em função da tensão de entrada.

3.3 Verificação do processamento parcial de energia nos conversores

Para indicar se uma topologia realiza ou não o PPP, utiliza-se como referência a energia processada pela topologia *boost* convencional, que é escolhida como referência por ser a topologia básica mais utilizada para realizar o rastreamento individual do MPP em sistemas fotovoltaicos *multi-string*. Assim, para que uma determinada topologia PAPP possa ser considerada uma topologia com PPP, ela deve processar menos potência não-ativa do que a topologia de referência.

A figura 8 apresenta a potência não-ativa total processada pelos dois conversores em comparação ao conversor de referência, todos operando com a mesma potência ativa na carga e as mesmas especificações de projeto. Observa-se que a potência não-ativa processada pelo conversor *forward* PAPP é menor em relação à referência quando a tensão de entrada é menor do que 190 V.

A diferença percentual de N_{total} entre o con-

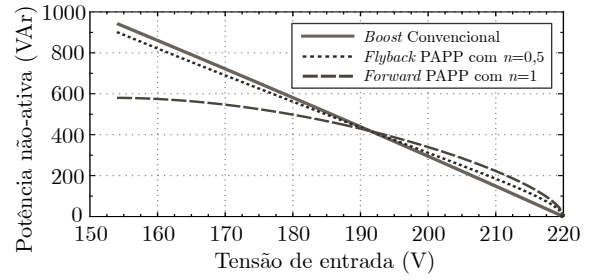


Figura 8: Comparação da potência não-ativa total nos conversores *flyback* PAPP e *forward* PAPP em relação ao conversor *boost* convencional.

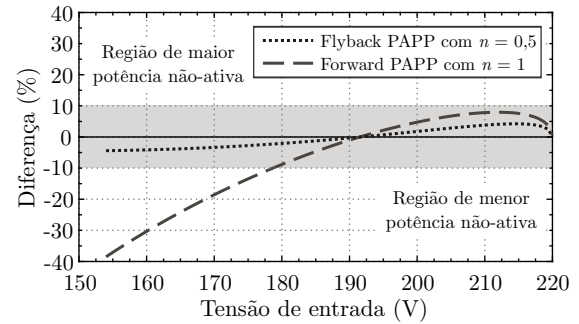


Figura 9: Diferença da potência não-ativa processada pelos conversores PAPP em relação ao conversor *boost*.

versor de referência e os conversores *flyback* PAPP e *forward* PAPP é apresentada na figura 9, onde a faixa de $\pm 10\%$ em destaque representa uma região onde o processamento de energia pode ser considerado semelhante. Acima desta faixa, a energia processada pelo o conversor analisado é maior do que no conversor de referência, e abaixo dela significa que o conversor processa menos energia do que o conversor de referência.

Observa-se que a diferença percentual do conversor *flyback* PAPP em relação ao conversor de referência fica dentro da região dos $\pm 10\%$ para toda a faixa de operação. Isso significa que mesmo utilizando uma pequena relação de espiras no indutor, a topologia *flyback* PAPP tem um processamento de energia similar ao *boost* convencional, e por isso, não pode ser considerada uma topologia que permite o PPP.

No caso da topologia *forward* PAPP com $n = 1$, observa-se que para uma tensão de entrada menor de 178 V, o processamento de energia é consideravelmente menor do que no conversor de referência. Isso significa que nesta faixa de tensão o conversor realiza o processamento parcial de energia ou PPP, ou seja, pode-se afirmar que a topologia *forward* PAPP é capaz de realizar o PPP. Além disso, de forma diferente ao que acontece na topologia *flyback* PAPP, a redução de n permite reduzir a energia não-ativa processada, o que significa que o valor de n pode ser otimizado para cada aplicação em função da faixa ganho de tensão desejada.

4 Modelo analítico da potência não-ativa

Para simplificar a análise do processamento de energia sem a necessidade de realizar simulações numéricas, as equações apresentadas na seção 2 foram resolvidas também de forma analítica por meio de aproximações que desprezam pequenas ondulações, resultando nas equações apresentadas na tabela 1.

Tabela 1: Comparação da potência não-ativa processada pelos elementos dos conversores.

	<i>Flyback</i> PAPP	<i>Forward</i> PAPP
N_L	$2P_{in} \frac{nd(1-d)}{nd+1}$	$2P_{in} \frac{nd(1-d)}{nd+1}$
N_C	$2P_{in} \frac{nd^2}{nd-d+1}$	$\cong 0$
N_{in}	$2P_{in} \frac{nd}{\frac{nd}{(1-d)} + 1}$	$2P_{in} \frac{nd(1-d)}{nd+1}$
N_{out}	$= 0$	$= 0$
N_{total}	$4P_{in} \frac{nd}{nd-d+1}$	$4P_{in} \frac{nd(1-d)}{nd+1}$

Essas equações permitem estimar a potência não-ativa processada pelo conversor em função de n , P_{in} e da razão cíclica (d), independente do tamanho dos filtros utilizados. Entretanto, devido às simplificações realizadas, estas equações se tornam pouco precisas quando valores maiores de ondulação de corrente no indutor (Δi_L) e tensão no capacitor (Δv_C) são utilizados.

A figura 10 apresenta o erro percentual na potência não-ativa total obtida por meio do modelo analítico em relação às simulações numéricas para diferentes valores de projeto de Δi_L e Δv_C nas duas topologias analisadas. Observa-se que o erro é menor para valores menores de Δi_L e Δv_C , e quando V_{in} tende ao valor de V_{out} , o erro percentual tende a 100%. Na topologia *flyback* PAPP o erro é considerado pequeno (menor do que 10%) quando $V_{in} < 195$ V, enquanto que na topologia *forward* PAPP o erro é pequeno somente para a faixa onde $V_{in} < 170$ V.

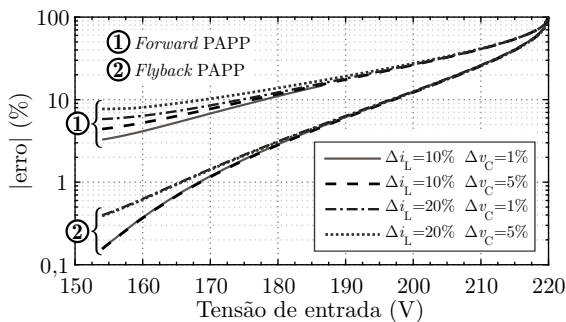


Figura 10: Erro percentual do modelo analítico em relação à simulação numérica.

5 Resultados experimentais

Para comprovar a análise teórica desenvolvida, um protótipo com topologia *flyback* PAPP com $n = 0,5$ e um protótipo com topologia *forward* PAPP com $n = 1$, ambos com os parâmetros apresentados na tabela 2, foram implementados e submetidos à ensaios.

As formas de onda de tensão e corrente nos elementos acumuladores do conversor *forward* PAPP operando com $V_{in} = 154$ V são apresentadas na figura 11. A partir destes dados, obtém-se a potência não-ativa processada nestes elementos deste conversor. O mesmo procedimento é adotado para o conversor *flyback* PAPP.

Tabela 2: Especificações do protótipo montado.

Parâmetro	Valor
Tensão de entrada (V_{in})	de 154 a 220 V
Tensão de saída (V_{out})	220 V
Carga de saída $P_{out}@R_{load}$	750 W @ 64,53 Ω
Chave (<i>MOSFET</i>)	IRFP460
Diodos (<i>SiC</i>)	SDT12S60
Freq. de Comutação (f_s)	70 kHz
Ondulação de corrente no indutor (Δi_L)	10 %
Ondulação de tensão no capacitor ($\Delta v_{C_{out}}$)	1 %

O resultado da potência não-ativa total processada nos dois conversores para vários pontos de tensão de entrada é apresentado na figura 12, onde as linhas correspondem aos valores simulados e os marcadores correspondem aos dados obtidos experimentalmente. Para toda faixa da tensão de entrada, a tensão de saída é regulada em 220 V e a potência de saída é fixa de 750 W. Observa-se que os valores obtidos experimentalmente condizem com os resultados da simulação numérica, validando a análise proposta e comprovando que o

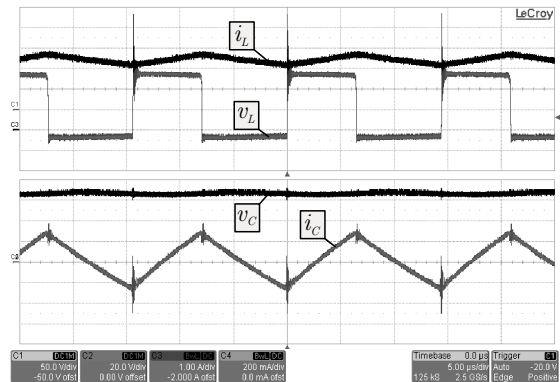


Figura 11: Formas de onda no conversor *forward* PAPP: tensão no indutor (50 V/div), corrente no indutor (1 A/div), tensão no capacitor (20 V/div), corrente no capacitor (200 mA/div).

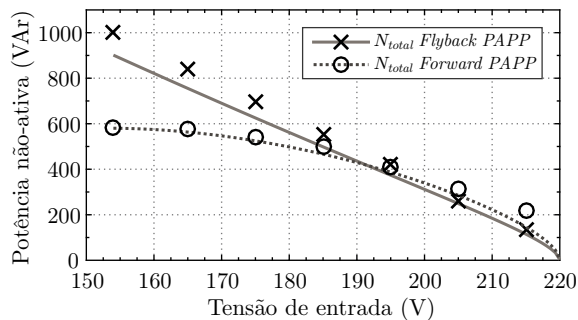


Figura 12: Potência não-ativa total medida experimentalmente nos conversores *flyback* e *forward* PAPP (marcadores) em comparação aos valores simulados (linhas).

conversor *forward* PAPP realiza o processamento parcial de energia.

O rendimento global (medido entre a entrada e a saída do sistema) para toda faixa de tensão de entrada nos dois conversores é apresentado na figura 13. No ponto de maior ganho de tensão ($V_{in} = 154$ V) o rendimento global foi 94,8 % no conversor *flyback* PAPP e 97,7 % no *forward* PAPP, enquanto que com $V_{in} = 215$ V, o rendimento global foi 98,6 % nos dois conversores. Estes valores foram medidos utilizando o equipamento *Yokogawa* WT1800.

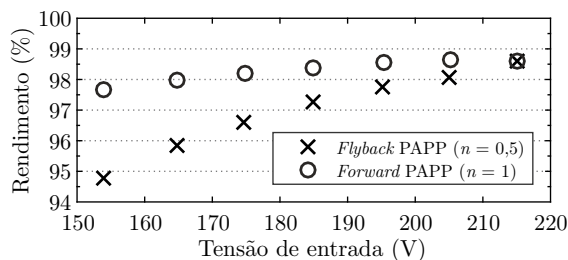


Figura 13: Rendimentos globais nos conversores *flyback* e *forward* PAPP para toda faixa de tensão de entrada e com potência de saída fixa de 750 W.

6 Conclusões

Este trabalho discute o processamento parcial de energia em conversores CC-CC chaveados e analisa os conversores *flyback* e *forward* na configuração série (PAPP). Demonstra-se que embora ambos sejam baseados em topologias isoladas na configuração PAPP, a topologia *flyback* PAPP não pode ser considerada PPP, pois seu processamento de energia é similar ao de um conversor *boost* convencional, mesmo utilizando diferentes valores de n no indutor acoplado. No caso da topologia *forward* PAPP, a análise revela que para uma faixa de tensão de entrada o conversor realiza o PPP, e que o uso adequado do valor de n pode permitir minimizar o processamento de energia.

O artigo também apresenta um modelo analítico simplificado para estimar a potência não-ativa nestas topologias, o qual apresenta resultados ad-

missíveis somente em algumas faixas de tensão.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq proc. 309214/2013-0) pelo apoio financeiro.

Referências

- Agamy, M., Harfman-Todorovic, M., Elasser, A., Chi, S., Steigerwald, R., Sabate, J., McCann, A., Zhang, L. and Mueller, F. (2014). An efficient partial power processing dc/dc converter for distributed pv architectures, *IEEE Transactions on Power Electronics* **29**(2): 674–686.
- Cathell, F. (2011). A simple 12 vout, 22 w, off-line forward converter using on semiconductor's ncp1027/1028 monolithic switcher, *Technical Report AND8488/D*, ON Semiconductor, Denver, USA.
- Kasper, M., Bortis, D. and Kolar, J. (2014). Classification and comparative evaluation of pv panel-integrated dc-dc converter concepts, *IEEE Transactions on Power Electronics* **29**(5): 2511–2526.
- Lee, J. P., Min, B. D., Kim, T. J., Yoo, D. W. and Yoo, J. Y. (2008). A novel topology for photovoltaic dc/dc full-bridge converter with flat efficiency under wide pv module voltage and load range, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **55**(7): 2655–2663.
- Li, W., Li, W., He, X., Xu, D. and Wu, B. (2012). General derivation law of nonisolated high-step-up interleaved converters with built-in transformer, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **59**(3): 1650–1661.
- Zhao, J., Yeates, K. and Han, Y. (2013). Analysis of high efficiency dc/dc converter processing partial input/output power, *IEEE 14th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, pp. 1–8.
- Zhou, H., Zhao, J. and Han, Y. (2015). Pv balancers: Concept, architectures, and realization, *IEEE Transactions on Power Electronics* **30**(7): 3479–3487.
- Zientarski, J. R. R., Pinheiro, J. R., d. S. Martins, M. L. and Hey, H. L. (2015). Understanding the partial power processing concept: A case-study of buck-boost dc/dc series regulator, *2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, pp. 1–6.