

# PROJETO E ANÁLISE DE UM CONTROLADOR INTELIGENTE FUZZY APLICADO NO CONTROLE DE CONVERSOR CC-CC BIDIRECIONAL PARA CARGA E DESCARGA DE BATERIAS DE CHUMBO ÁCIDO

RENAN F. BASTOS, CASSIUS R. AGUIAR, RODOLPHO V. A. NEVES, AMILCAR F. Q. GONÇALVES, RICARDO Q. MACHADO.

1. *Laboratório de Fontes Alternativas e Processamento de Energia, Depto. de Eng. Elétrica e Computação, Universidade de São Paulo.*  
*Endereço para Correspondência*  
*E-mails: renan.bastos@usp.br*

**Abstract**—This work aims at the design and analysis of a fuzzy system for control of a bidirectional buck-boost converter used to manage the charge and discharge of lead-acid batteries, used in photovoltaic systems. The control system is responsible for controlling the current of the battery bank as well as protect the bank avoiding that high voltages appear at its terminals. The frequency analysis of fuzzy system will allow us to see more clearly the characteristics of the adaptive fuzzy controller, which alters the plant as the system reaches the steady state regime. Simulation results prove the efficiency of the controller, both for the current control and for voltage control of the bidirectional system.

**Keywords**—Fuzzy Controller, Fuzzy P+I, dc-dc converter, lead-acid battery.

**Resumo**— Este trabalho visa o projeto e análise de um sistema fuzzy para controle de um conversor buck-boost bidirecional usado no gerenciamento de carga e descarga de baterias de chumbo-ácido, aplicado em sistemas fotovoltaicos. O sistema de controle será responsável por controlar a corrente de carga e descarga de um banco de baterias de chumbo-ácido, assim como proteger o banco evitando dessa forma, que tensões elevadas apareçam nos seus terminais. A análise em frequência do sistema fuzzy nos permitira ver de maneira mais clara as características adaptativas do controlador fuzzy, que altera sua planta a medida que o sistema entra em regime. Resultados simulados comprovam a eficiência do controlador proposto, tanto para o controle de corrente quanto para controle de tensão em sistema bidirecionais.

**Palavras-chave**—Controlador Fuzzy, Fuzzy P+I, Conversor cc-cc bidirecional, Bateria de chumbo-ácido.

## 1 Introdução

Para aplicação de sistemas fotovoltaicos isolados da rede elétrica, dispositivos de armazenamento de energia se tornam imperativos devido à imprevisibilidade solar e da inexistência da rede para suprir demandas que excedam a produção de energia (CÂNDIDO, 2001), logo um sistema que controle e gerencie o fluxo de energia em baterias com baixo custo e de maneira eficiente, é de suma importância para a popularização destas aplicações. Para o controle do fluxo de energia em sistemas de armazenamento, é necessário o uso de conversores eletrônicos bidirecionais capazes de drenar ou entregar energia de maneira rápida e eficiente, sendo que um circuito bidirecional simples e amplamente difundido é o circuito buck-boost da Fig. 1, utilizado em (CÂNDIDO, 2001; WEI LI, JOOS, *et al.*, 2007; NORTHCOTT, FILIZADEH *et al.*, 2009). Este circuito apresenta a grande vantagem de utilizar poucos elementos armazenadores, como capacitores e indutores, o rendimento típico está entre 85% e 90% (WEI LI, JOOS, *et al.*, 2007), além de utilizar apenas duas chaves semicondutoras, tornando-o robusto e com baixo custo. Entretanto, como pode ser notado pela Fig. 2, o mesmo apresenta uma topologia diferente para cada modo de operação, logo cada modo apresenta uma planta de controle diferente, passando de boost para buck.

Devido a esta característica de alteração da planta durante a inversão do fluxo de energia, em sistemas

de controle clássico é necessário o chaveamento do controlador para que em cada modo de operação atue o compensador mais adaptado a planta, como foi utilizado em (CÂNDIDO, 2001). Entretanto com o intuito de simplificar a execução propõe-se um sistema do tipo fuzzy P+I adaptado aos dois modos de operação.

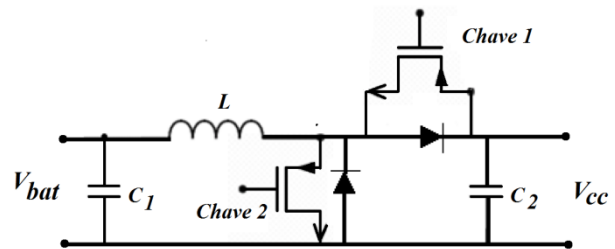


Figura 1. Circuito bidirecional buck-boost utilizado.

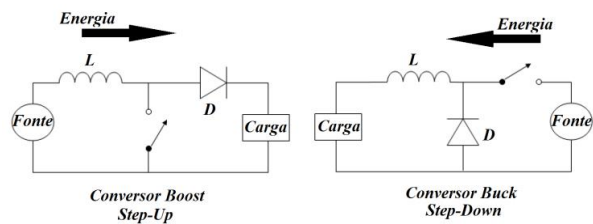


Figura 2. Modos de operação do conversor buck-boost.

Este trabalho tem como objetivo o projeto e análise de um controlador fuzzy P+I para o controle e

gerenciamento de carga e descarga de baterias de chumbo-ácido.

## 2 Controlador Fuzzy

Na literatura são encontradas algumas topologias para controle de conversores DC-DC, como as clássicas PI e PI+*Feedforward*, encontradas em (CÂNDIDO, 2001), além de topologias utilizando sistemas inteligentes fuzzy como em (HSU, CHUNG, *et al.*, 2009; HE, NELMS, 2005; GUMPTA, BOUDREAU, *et al.*, 1997) que utilizam uma estratégia do tipo fuzzy PD incremental, Fig. 3.

Em (LIPING, HUNG, *et al.*, 2009) os autores fazem uma comparação entre um controlador clássico PID e duas estruturas fuzzy, o PD incremental (Fig. 3) já citado e o PD + I mostrado na Fig. 4. Estas topologias foram usadas para controlar um conversor buck e um boost e os resultados foram comparados em termos de tempo de resposta transitória, estabilidade em regime permanente e robustez sob condições de funcionamento. De acordo com (LIPING, HUNG, *et al.*, 2009) os sistemas fuzzy foram superiores em todos os quesitos de desempenho, principalmente na topologia boost, que é uma topologia menos estável que o buck, no qual o desempenho das topologias fuzzy e PID foram semelhantes.

De acordo com (LIPING, HUNG, *et al.*, 2009) as topologias fuzzy possuem como vantagem de não ser necessário o conhecimento da planta em pequenos sinais para seu projeto, enquanto esta é necessária no projeto do PID. Entretanto, a sintonia do PID seria menos problemática e sua execução em hardware menos custosa.

Em (MATTAVELLI, ROSSETTO *et al.*, 1997) os autores utilizam uma topologia fuzzy P + fuzzy I, mostrada na Fig. 5, na qual se tem um sistema de regras fuzzy proporcional somado a um sistema fuzzy incremental. Este sistema da Fig. 5 pode ser entendido como uma alteração do sistema fuzzy P + I, cuja entrada do integrador é ponderada pelas regras do fuzzy I.

Os autores de (MATTAVELLI, ROSSETTO *et al.*, 1997) afirmam que com esta topologia da Fig. 5, e utilizando as informações de corrente e tensão como entradas, o sistema se torna mais robusto que a abordagem fuzzy PD nas quais são usadas como entrada: o erro da variável de controle e sua variação.

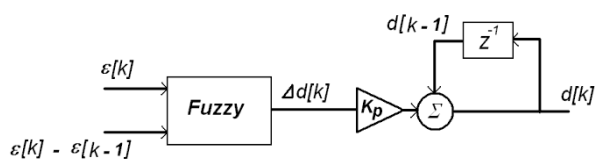


Figura 3. Estrutura fuzzy PD incremental utilizada em (HSU, CHUNG, *et al.*, 2009; HE, NELMS, 2005; GUMPTA, BOUDREAU, *et al.*, 1997).

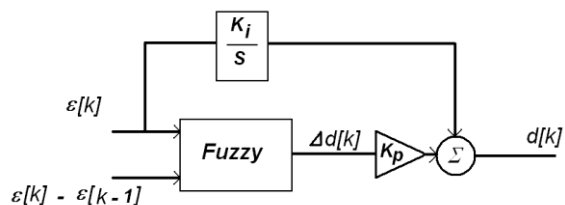


Figura 4. Estrutura fuzzy PD + I utilizada em (LIPING, HUNG, *et al.*, 2009).

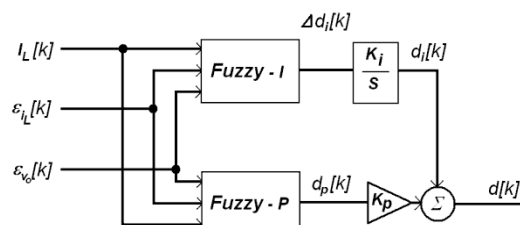


Figura 5. Estrutura fuzzy P + fuzzy I utilizada em (MATTAVELLI, ROSSETTO *et al.*, 1997).

Como foi descrito na introdução, o controle de um conversor DC-DC bidirecional exige um controle chaveado caso seja utilizado um controle clássico, entretanto (LIPING, HUNG, *et al.*, 2009) afirma que o controle fuzzy apresenta melhor desempenho para um conversor boost que um controle PID clássico e um desempenho semelhante ao PID para o controle do conversor buck. Logo para o conversor bidirecional buck-boost utilizado neste trabalho, espera-se um bom desempenho em ambos os modos de operação com a utilização de uma topologia fuzzy.

É de se notar que nenhum dos trabalhos citados faz uma análise da adaptabilidade e da não linearidade do sistema fuzzy em termos da resposta em frequência, deixando o entendimento destas topologias um pouco complicado e não ilustrando as suas vantagens.

### 2.1 Controlador fuzzy P+I proposto

A Fig. 6 mostra o sistema de controle fuzzy P + I proposto, sendo o modo de operação cambiável de buck para boost, para cada modo de operação tem-se um sentido de corrente no indutor e na bateria, além disso, a variável de controle também pode ser alterada de corrente para tensão sem que o controlador seja alterado, graças a normalização da variável de entrada do bloco fuzzy que é dividida pelo valor de referência.

O chaveamento da variável de controle se faz necessário durante a execução de alguns métodos de carga em baterias de chumbo-ácido, como o método a dois níveis de tensão, apresentado em (COELHO, 2001) e representado na Fig. 7. O método consiste em inserir uma corrente controlada ( $I_{Max}$ ) na bateria até que a tensão alcance os valores máximos definidos pelo fabricante ( $V_{st}$ ), neste ponto o sistema deve manter a tensão constante para que a corrente diminua, após o sistema alcançar a carga completa uma tensão constante de flutuação ( $V_f$ ) deve ser

mantida na bateria para evitar autodescarga. Logo, nota-se que uma alteração de variável de controle é necessária para que a bateria não se danifique quando o sistema se encontra no modo de carga, ou seja, modo buck (abaixador), uma vez que as baterias se encontram no lado de baixa tensão.

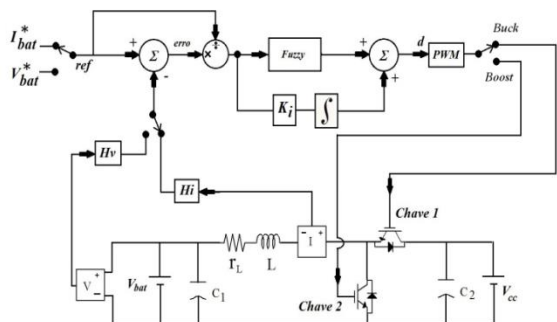


Figura 6. Sistema de controle para o sistema bidirecional buck-boost.

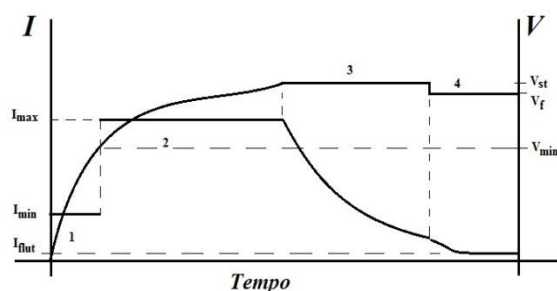


Figura 7. Método a dois níveis de tensão [9].

## 2.2 Determinação das regras fuzzy e análise em frequência do controlador

Diferentemente de (HSU, CHUNG, *et al.*, 2009; HE, NELMS, 2005; LIPING, HUNG, *et al.*, 2009) que utilizam mais de uma entrada no sistema fuzzy, neste trabalho será utilizado somente uma entrada, que é o erro, com o intuito de simplificar a implementação do sistema fuzzy, uma vez que a quantidade de entradas aumenta exponencialmente o custo computacional. A redução de entradas do sistema fuzzy não representa perda de informação ou desempenho, pois baterias são dispositivos de resposta lenta e estável do ponto de vista de controle, não sendo necessária grande quantidade de informação para ser controlada.

Para o projeto das regras e das funções de pertinência foram usados os conhecimentos heurísticos do funcionamento dos circuitos buck e boost, com operador de composição do tipo MAX-MIN, operador Mandani para implicação e MAX para agregação. As regras definidas estão mostradas na Tabela I, e as funções de pertinência que foram ajustadas empiricamente estão nas Fig. 8.

Para fazer a análise em frequência do controlador fuzzy P+I como se fosse um controlador clássico, o bloco fuzzy que nesta topologia (fuzzy P+I) representa o ganho proporcional é reescrito como um

ganho em função do erro de entrada,  $K_p(\text{erro})$ , Fig.9. A equação (1) mostra como  $K_p(\text{erro})$  é calculado a partir da resposta do controlador fuzzy, que é obtida pela defuzzificação usando o método do centro de área. Na Fig. 10 é apresentada a resposta do fuzzy juntamente com a curva de  $K_p(\text{erro})$  calculada pela equação (1), que como esperado para sistemas fuzzy apresenta um aspecto totalmente não linear.

$$K_p(\text{erro}) = \frac{\text{Saída fuzzy}(\text{erro})}{\text{erro}} \quad (1)$$

TABELA I. REGRAS DO SISTEMA FUZZY

Erro Positivo	Saída Positiva	Erro negativo	Saída negativa
Baixo positivo	Fraca positiva	Baixo negativo	Fraca negativa
Médio positivo	Moderada positiva	Médio Negativo	Moderada negativa
Alto positivo	Forte positiva	Alto negativo	Forte negativa

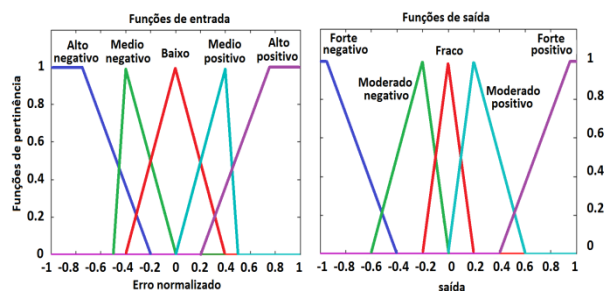


Figura 8. Funções de pertinência de entrada e saída, relacionadas pelas regras da Tabela I.

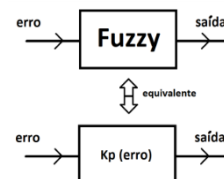


Figura 9. Equivalência entre bloco fuzzy e  $K_p(\text{erro})$ .

De posse da curva que representa  $K_p(\text{erro})$  pode-se gerar o diagrama de bode em malha fechada da planta do sistema (controlador mais planta do conversor) para diversos valores de  $K_p$  dentro do intervalo mostrado na Fig. 10, assim obtém-se a Fig. 11, que representa a mudança da planta a medida que o erro evolui. Nota-se pela Fig. 11 que, com o aumento de  $K_p(\text{erro})$  a frequência de corte do sistema também aumenta, fazendo por conseguinte elevar a velocidade de resposta e compensação. Fica claro pela Fig. 10 e Fig. 11 que o sistema se adapta, ajustando o ganho proporcional, que age diretamente na velocidade de resposta do sistema como um todo.

Como representação do conversor boost para obter a FT em malha fechada e a Fig. 11, foi utilizada uma planta em pequenos sinais linearizada em torno do ponto de operação na forma da equação (2) (BASTOS, 2013).

$$G(s) = \frac{i_L(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{K_1 s + K_2}{K_3 s^2 + K_4 s + K_5} \quad (2)$$

$K_1 = 11738$	$K_2 = 235160$	$K_3 = 1$	$K_4 = 27$	$K_5 = 9170$
---------------	----------------	-----------	------------	--------------

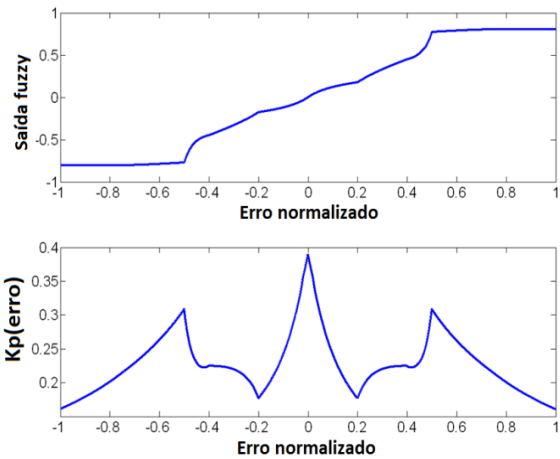


Figura 10. Saída do bloco fuzzy e  $K_p(\text{erro})$  calculado pela equação 1.

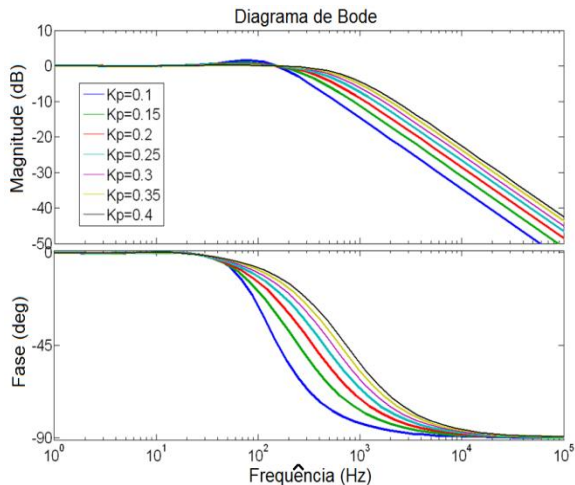


Figura 11. Diagrama de bode da planta em malha fechada do sistema para vários valores de  $K_p$  dentro do intervalo da Figura 10.

### 3 Simulação

Nesta seção o sistema de controle fuzzy P + I é simulado para comprovar seu funcionamento e sua eficiência em ajustar a corrente ou tensão na bateria. A Fig. 12 mostra o modelo Simulink® construído. A constante integral  $K_i$  presente no controlador fuzzy P+I é ajustada pelo valor sintonizado para o controlador PI clássico utilizando o modelo do conversor boost da equação (2), compensado em malha fechada.

No lado de baixa tensão será usado um modelo de bateria de chumbo-ácido presente na biblioteca do Simulink®, com uma tensão de 36 V e 36 Ah, enquanto no lado de alta tensão foi inserida uma fonte ideal capaz de fornecer e drenar energia, com uma tensão de 120 V,  $L = 10$  mH,  $R_L = 0.1 \Omega$  e  $C = 1 \mu\text{C}$  e com uma frequência de chaveamento de 5 kHz.

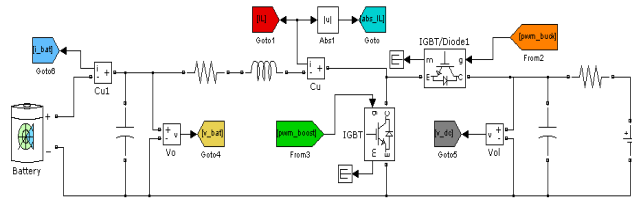


Figura 12. Modelo do sistema simulado no Matlab.

A Fig. 13 mostra a inversão da corrente na bateria em 0,3 s, passando do modo de carga para o modo de descarga, ou seja, passa do modo buck para o modo Boost. Nota-se que a corrente se estabiliza em menos de 0,005 s em ambos os modos de operação.

A Fig. 14 mostra a resposta do controlador fuzzy P + I à inicialização do sistema, além da resposta do controlador a inversão de corrente. Nota-se que tanto a resposta transitória quanto a de regime permanente são estáveis sem a presença de sobre sinal devido a característica do controlador, no qual bloco fuzzy atua no transitório, enquanto o bloco integral atua no regime permanente.

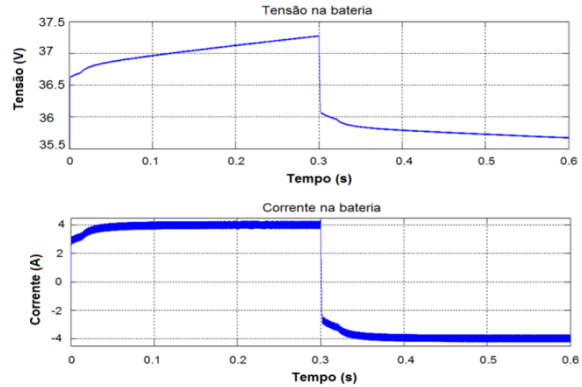


Figura 13. Inversão da corrente na bateria em 0,3 s.

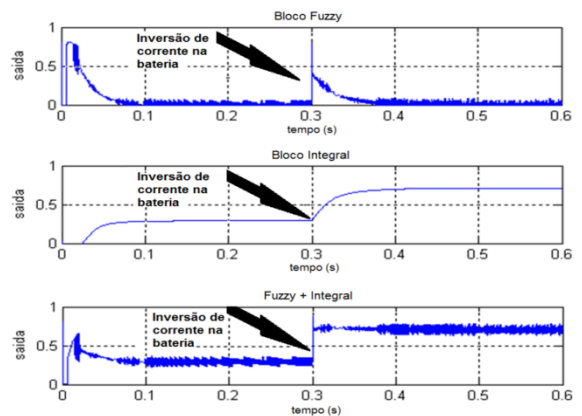


Figura 14. Resposta do controlador fuzzy P + I durante inversão de corrente.

A Fig. 15 mostra a tensão e a corrente da bateria, inicialmente em modo de carga com corrente constante, mas assim que a tensão da bateria alcança o valor limite, definido pelo operador ( $V_{st}$ ), o sistema de controle chaveia seu modo de operação passando a controlar a tensão da bateria, o que ocasiona um decaimento da corrente de carga como definido pelo método de carga a dois níveis de tensão, Fig.7. Em 0,4 s o sentido da corrente é invertido novamente,

logo independente do modo de controle a corrente pode ser invertida. Diferentemente da Fig. 13 onde apenas o modo de controle de corrente é ativado, na Fig. 15 a corrente é controlada somente até que a tensão alcance o seu valor limite ( em 0,25 s), neste momento o controle de tensão é ativado.

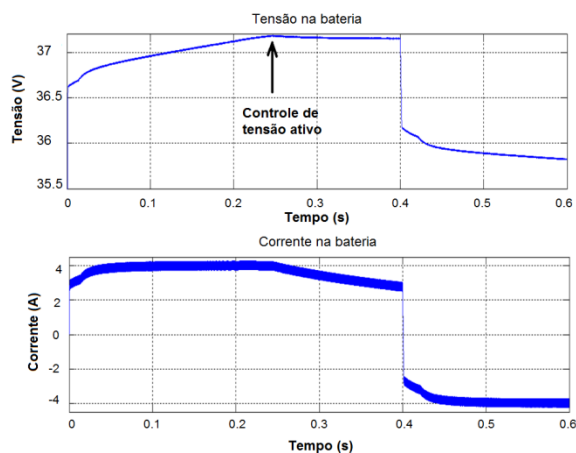


Figura 15. Tensão e corrente durante mudança da variável de controle.

#### 4 Conclusões

Este trabalho descreveu o projeto, análise e execução de um sistema de controle fuzzy P + I para o controle de um conversor bidirecional DC-DC utilizado na carga e descarga de baterias de chumbo-ácido. Utilizando poucas regras e poucas funções de pertinência triangulares, foi possível projetar um sistema de controle fuzzy P+I eficiente tanto no controle de tensão quanto de corrente de um banco de baterias.

A análise em frequência realizada para o controlador fuzzy nos permitiu enxergar melhor as características adaptativas do controlador, que altera a planta do sistema, alterando também os tempos de resposta e compensação.

No sistema simulado tanto o controle de corrente quanto de tensão foram eficientes, tendo uma baixa ondulação de corrente (menos de 0,4 A), podendo ser reduzido com o aumento da frequência de chaveamento ou com o aumento da indutância do circuito.

Durante a execução da carga e descarga o circuito bidirecional buck-boost apresentou bom desempenho em ambos os modos de operação, apresentando rendimento médio de 85 %, o que é esperado para este tipo de circuito. O circuito se provou eficiente também na inversão de corrente, podendo mudar o sentido da corrente em alguns milissegundos, sem apresentar sobre sinal.

Bastos, R. F. "Sistema de Gerenciamento para Carga e Descarga de Baterias (Chumbo-Ácido) e para Busca do Ponto de Máxima Potência Gerada em Painéis Fotovoltaicos Empregados em Sistemas

de Geração Distribuída) Dissertação de mestrado, EESC-USP, 2013.

Cândido, B. D. "Desenvolvimento de Sistemas Estáticos Distribuídos – "Multi String" Para Aplicação em Sistemas Fotovoltaicos Autônomos" Dissertação de Mestrado, UFSM 2010.

Coelho, K. D. "Estudo de uma Fonte Ininterrupta de Corrente Contínua de Baixa Potência Gerenciada por um Microcontrolador" Dissertação de Mestrado, PPGEE- UFSC, 2001.

Gupta, T.; Boudreaux, R.R.; Nelms, R.M.; Hung, J. Y, "Implementation of a fuzzy controller for DC-DC converters using an inexpensive 8 bits microcontroller", Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 1997, Volume: 44, Issue: 5, Page(s): 661-669.

He, D.; Nelms, R. M. "Fuzzy logic average current-mode control for DC-DC converters using an inexpensive 8 bits microcontroller" Industry Applications, IEEE Transactions on, Volume: 41, 2005, Page(s): 1531 – 1538.

Hsu, C; Chung, I; Lin, C; Hsu, C "Self-regulating fuzzy control for forward DC-DC converters using an 8 bits microcontroller" Power Electronics, IET Volume: 2, 2009, Page(s): 1-12.

Liping Guo; Hung, J.Y.; Nelms, R.M., "Evaluation of DSP-Based PID and Fuzzy Controllers for DC-DC Converters", Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2009, Volume:56, Issue:6, Page(s):2237-2248

Mattavelli, P.; Rossetto, L.; Spiazzi, G.; Tenti, P., "General-purpose fuzzy controller for DC-DC converters", Power Electronics, IEEE Transactions on, 1997, Volume:12, Issue: 1, Page(s): 79-86

Northcott, D.R.; Filizadeh, S.; Chevrefils, A.R. "Design of a Bidirectional Buck-Boost DC/DC Converter for a Series Hybrid Electric Vehicle Using PSCAD/EMTDC" Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09. IEEE. Publication Year: 2009 , Page(s): 1561 – 1566.

Wei Li; Joos, G.; Abbey, C. "A Parallel Bidirectional DC/DC Converter Topology for Energy Storage Systems in Wind Applications" Industry Applications Conference, 2007. 42nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007, 2007 , Page(s): 179 – 185.