



# FICE

8<sup>A</sup> A FEIRA DE INICIAÇÃO  
CIENTÍFICA E EXTENSÃO

05 E 06 DE SETEMBRO

## PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE CONVERSORES CC-CC BASEADOS EM PROCESSAMENTO PARCIAL DE ENERGIA APLICADOS A SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

*Eduardo Rossato<sup>1</sup> ; Bruno Borsatti Chagas<sup>2</sup> ; Lauana Cenci<sup>3</sup> ; Jonatan Zientarski<sup>4</sup>*

### RESUMO

A geração FV produz energia elétrica com características que devem ser adequadas aos mesmos níveis de tensão exigidos pelas cargas. Nesse contexto, os conversores CC-CC desempenham um papel importante para a integração do sistema. O objetivo principal deste trabalho foi estudar, realizar a modelagem matemática, projetar, construir um protótipo e realizar ensaios em uma topologia de conversor CC-CC baseado em processamento parcial e fluxo bidirecional de energia. O conversor *Forward/Backward* é uma topologia ainda em estudo, mas simulações mostram uma redução significativa no processamento de energia, o que pode resultar em maior eficiência. A partir do estudo das etapas de operação, os componentes do protótipo foram dimensionados enquanto que o transformador foi calculado utilizando o método AeAw. Durante os ensaios, ao medir a tensão entre dreno e *source* das chaves do primário, observou-se um pico de tensão superior aos limites toleráveis da chave, o que impossibilitou o ensaio em operação nominal. Para mitigar esse pico de tensão, foram feitas alterações de *layout* da placa que permitiram reduzir este pico. Esse resultado mostra que o pico de tensão provavelmente é causado por indutâncias parasitas ocasionadas por um problema de *layout* na placa. Apesar disso, os resultados obtidos foram considerados promissores, uma vez que, operando em potência reduzida, o conversor obteve uma eficiência máxima de 98,49%. Quando ocorriam os picos de tensão, a eficiência cai para aproximadamente 88%.

### INTRODUÇÃO

Com o propósito de atender à crescente demanda por energia elétrica com o menor impacto ambiental possível, tem-se incentivado nos últimos anos o uso de fontes renováveis. Dentre essas fontes, a geração fotovoltaica (FV) se destaca por sua versatilidade.

---

<sup>1</sup> Aluno de graduação em Engenharia Elétrica no Instituto Federal Catarinense – Campus Videira. E-mail: eduardo-rossato@hotmail.com

<sup>2</sup> Aluno de graduação em Engenharia Elétrica no Instituto Federal Catarinense – Campus Videira. E-mail: abschagas@hotmail.com

<sup>3</sup> Aluna de graduação em Engenharia Elétrica no Instituto Federal Catarinense – Campus Videira. E-mail: lauanacencii@gmail.com

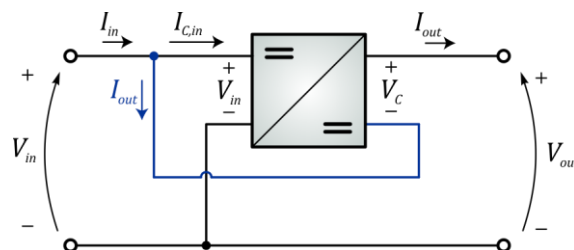
<sup>4</sup> Professor Orientador do Instituto Federal Catarinense – Campus Videira. E-mail: jonatan.zientarski@ifc.edu.br



A geração FV produz energia elétrica com características que devem ser adequadas aos mesmos níveis de tensão exigidos pelas cargas. Nesse contexto, os conversores CC-CC desempenham um papel importante para a integração do sistema.

Diversas topologias podem ser utilizadas na implementação destes conversores CC-CC. Os conversores convencionais não realizam processamento parcial de energia, por isso, cada conversor deve ser dimensionado para suportar toda a potência ativa da *string* ao qual é conectado. Entretanto, é possível substituir os conversores convencionais por conversores PPC com conexão série, conforme o diagrama de conexão apresentado na Figura 1 (AGAMY, 2014).

Figura 1 - Diagrama esquemático da conexão série em um PPC.



Fonte: Agami et al. (2014)

Nesta configuração, a tensão de saída ( $V_{out}$ ) é igual à soma da tensão de entrada ( $V_{in}$ ) e a tensão sobre o capacitor de saída ( $V_C$ ). Assim, o conversor opera como um regulador série, onde 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 ( $V_{in}$ ).

A relação entre a potência ativa processada no conversor e a potência ativa total de saída pode ser calculada por (1), ou seja, o conversor processa somente uma parcela da potência entregue na saída.

$$\frac{P_C}{P_{out}} = \frac{V_C I_{out}}{V_{out} I_{out}} = \frac{V_C}{V_{in} + V_C} \quad (1)$$

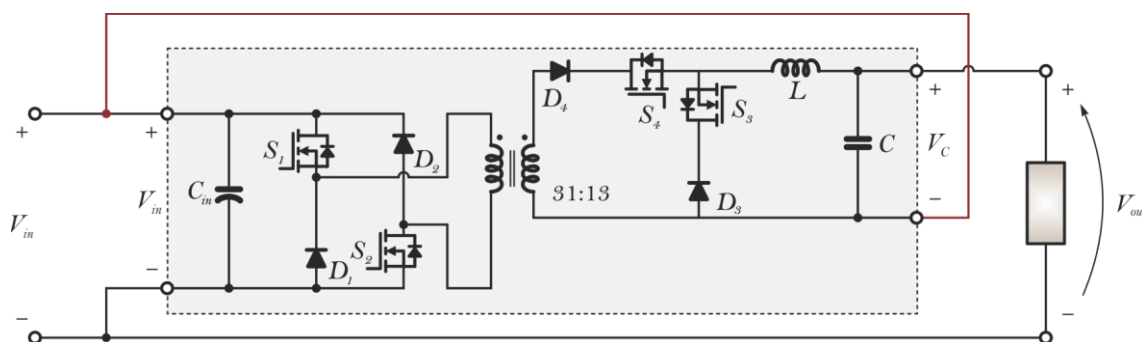
Esta característica torna os reguladores PPC conectados em série adequados para realizar a regulação individual da tensão nas *strings*, uma vez que a tensão do MPP dos painéis FV ( $V_{in}$ ) apresenta uma faixa de variação de apenas 15 a 20% da tensão de circuito aberto (ZHOU; ZHAO; HAN, 2015). Isto também pode permitir uma maior eficiência neste estágio de conversão, uma vez que o PPC processa menor potência ativa.



O principal objetivo deste projeto de pesquisa foi estudar, modelar matematicamente, projetar os componentes, construir um protótipo e realizar ensaios experimentais em uma topologia de conversor CC-CC baseado em processamento parcial e fluxo bidirecional de energia.

A topologia *Forward/Backward*, proposta por ZIENTARSKI (2017), é uma topologia nova, mas simulações indicam que esta topologia pode melhorar o aproveitamento da energia disponíveis nos painéis FV, uma vez que maior parte da energia elétrica é produzida em níveis de tensão em que o conversor opera com maior eficiência, devido ao processamento de energia ser reduzido nestes níveis de tensão de operação. A Figura 2 apresenta o diagrama esquemático do conversor.

Figura 2 – Diagrama esquemático da topologia *Forward/Backward*



O conversor possui dois modos de operação. No primeiro, chamado de modo *Forward*, o conversor se comporta como um elevador de tensão. A tensão de saída  $V_{out}$  será resultante da soma da tensão do capacitor  $V_C$  e da tensão de entrada  $V_{in}$ .

No segundo modo, chamado de modo *Backward*, o comportamento do conversor é de um abaixador de tensão, pois a tensão no capacitor será negativa, e assim,  $V_{out}$  será menor que  $V_{in}$ .

## PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O projeto foi realizado entre junho de 2018 e junho de 2019, no laboratório de práticas pedagógicas do IFC *Campus* Videira, e foi dividido em quatro etapas principais: revisão bibliográfica, projeto dos componentes, construção do protótipo e ensaios experimentais.



# FICE

8ª A FEIRA DE INICIAÇÃO  
CIENTÍFICA E EXTENSÃO

05 E 06 DE SETEMBRO

Na primeira etapa, focou-se no estudo de conceitos básicos de eletrônica de potência e no estudo mais aprofundado sobre conversores CC-CC, incluindo uma pesquisa sobre o conceito de processamento parcial da energia por meio de conversores séries e, por fim, o estudo de técnicas recentes que envolvem fluxo bidirecional de potência para melhorar o desempenho da etapa CC-CC em conversores aplicados aos sistemas fotovoltaicos.

Na segunda etapa, o protótipo foi projetado e construído. Para isso, os componentes foram dimensionados com o auxílio de simuladores de circuitos elétricos e *softwares* de cálculos numéricos. Para dimensionar o transformador, foi utilizado o método AeAw. Enquanto que capacitor e o indutor foram calculados a partir do estudos das formas de onda da corrente e da tensão dos componentes. Além disso, o desenho da placa de circuito impresso foi realizado no *software* Proteus.

Os ensaios experimentais foram realizados utilizando multímetros *True-RMS* para medir a corrente e as tensões necessárias e osciloscópios digitais para observar as formas de onda de tensão aplicadas sobre as chaves. Também foi utilizado o circuito desenvolvido utilizando o microcontrolador TMS320F28379D para gerar pulsos PWM necessários ao comando do conversor. Com esta configuração, a frequência de 70k Hz é mantida fixa e um potenciômetro é utilizado para ajustar a razão cíclica, seguindo as delimitações de projeto estabelecidas por *software*.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

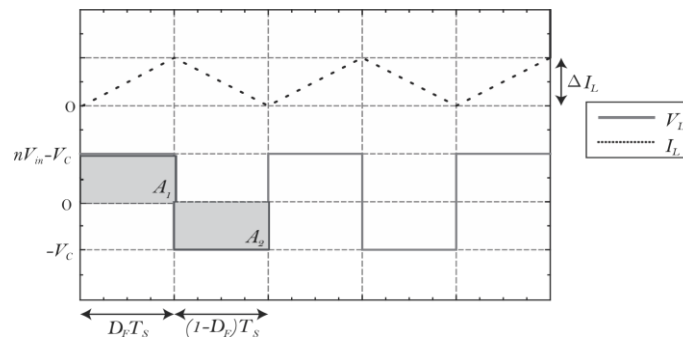
Através do estudo das formas de onda da tensão e corrente do indutor, mostradas na Figura 3 (a), na operação *Forward* e (b) na operação *Backward*, e igualando as áreas em destaque, encontra-se os valores para o indutor, nas equações (2) e (3), respectivamente.

$$L = \frac{V_C(1-D_F)}{\Delta I_L f_s} = 400,912 \mu H \quad (2)$$

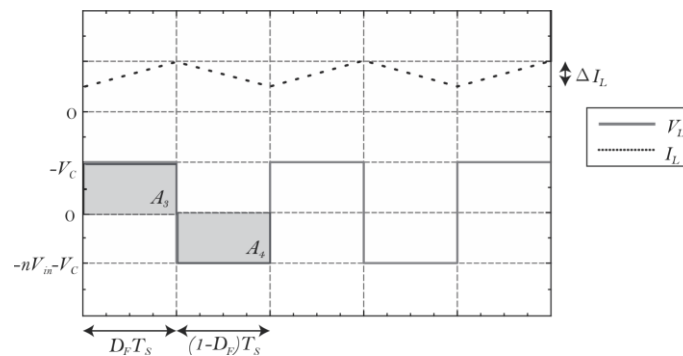
$$L = \frac{-V_C D_B}{\Delta I_L f_s} = 476,699 \mu H \quad (3)$$



Figura 3 - Formas de onda da tensão e corrente do indutor



(a)

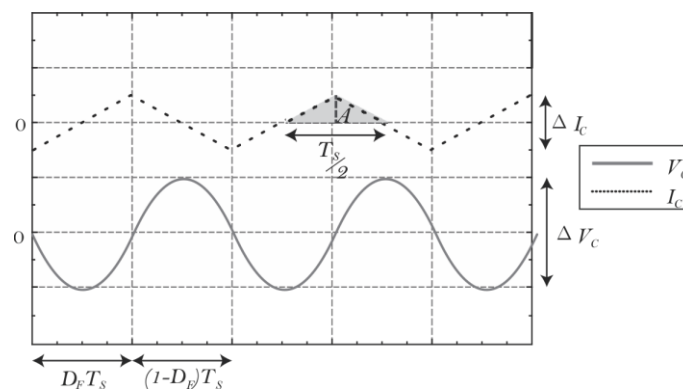


(b)

O cálculo foi feito utilizando os valores das razões cíclicas, tensões no capacitor, frequência utilizada e variação de corrente no indutor, sendo que será utilizado o maior valor encontrado para a construção do indutor.

Para o capacitor, a mesma metodologia é empregada, pelo estudo das formas de onda da Figura 4, é encontrado o valor do capacitor na equação (4).

Figura 4 - Formas de tensão e corrente do capacitor no circuito secundário.



$$C = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot \Delta V_C \cdot f_s} = 276,7119nF \quad (4)$$



O transformador foi dimensionado a partir do método  $A_e A_w$ , que leva em consideração área da seção transversal do núcleo e a área da janela para calcular o número de espiras. Para encontrar o  $A_e A_w$  utiliza-se a equação (5) e o número de espiras do primário é dado pela equação (6).

$$A_e A_w = \frac{V_{PRIM} \cdot i_{PRIM(RMS)} \cdot D_{F_{max}}}{\eta \Delta B_{max} \cdot f_s \cdot J \cdot K_p \cdot K_u} \quad (5)$$

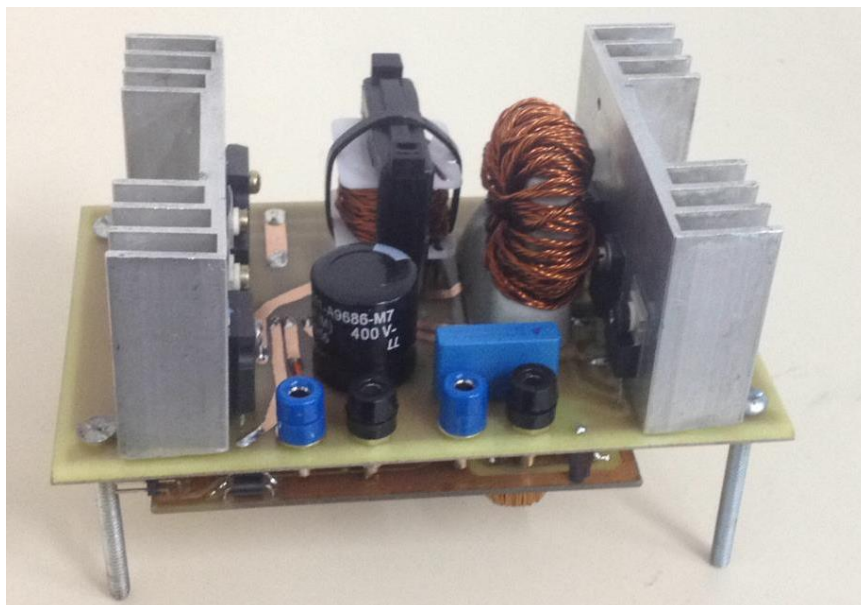
$$N_p = \frac{V_{in\_min} D_{max}}{A_e \Delta B f} = 28,31 \text{ espiras} \quad (6)$$

O valor de  $A_e A_w$  foi de  $0,8973 \text{ cm}^4$  e  $0,9409 \text{ cm}^4$  para o modo *Forward* e *Backward*, respectivamente. Desse modo, o núcleo de ferrite escolhido foi o NEE 40/17/12, o qual possui um  $A_e A_w$  de  $2,22 \text{ cm}^4$ .

Utilizando uma relação de espiras de 0,4, obteve-se um transformador com 29 espiras no primário e 13 espiras no secundário.

Com os valores dos componentes encontrados e construídos, utilizou-se o *software* Proteus para desenhar o *layout* da placa de circuito impresso, cujo protótipo é mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Protótipo Forward/Backward

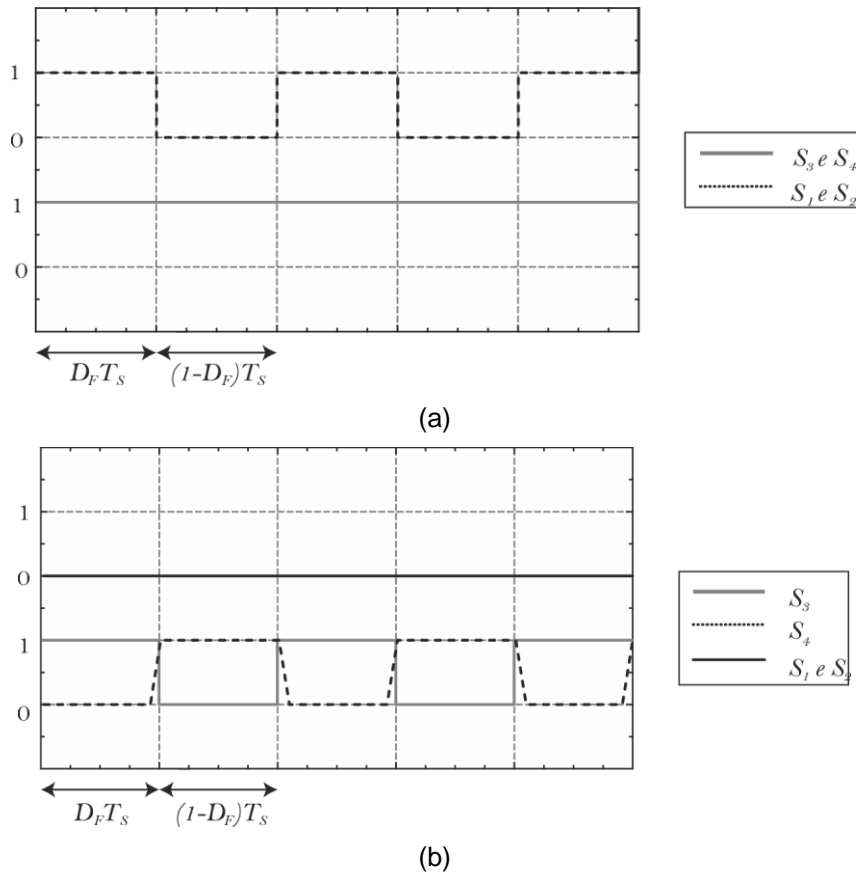






O funcionamento das chaves, mostrados na Figura 6 (a) no modo *Forward* e (b) no modo *Backward*, mostram que no modo *Backward* há um tempo vivo entre as chaves  $S_3$  e  $S_4$ .

Figura 6 – Funcionamentos das chaves no (a) modo *Forward* e (b) no modo *Backward*.



Durante os ensaios do protótipo *Forward/Backward*, a tensão foi sendo elevada gradativamente, começando em aproximadamente 10 V CC de entrada, entretanto, ao passar dos 100 V de tensão de entrada, a corrente foi subitamente a zero, indicando que algum componente queimou.

Durante uma avaliação da falha, as chaves do primário e do secundário foram trocadas e o conversor voltou a operar. Para evitar que o ocorrido se repetisse, as chaves do secundário foram curto-circuitadas.

A medição com o osciloscópio foi feita no dreno-*source* das chaves do circuito primário, sendo que a chave  $S_1$  apresentava um pico de tensão de aproximadamente 300V, conforme mostrado na Figura 7 (a). A tensão se tornava



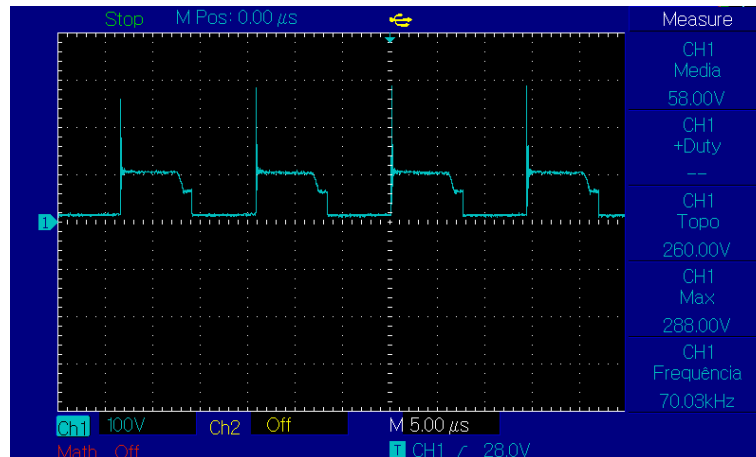
# FICE

8ª A FEIRA DE INICIAÇÃO  
CIENTÍFICA E EXTENSÃO

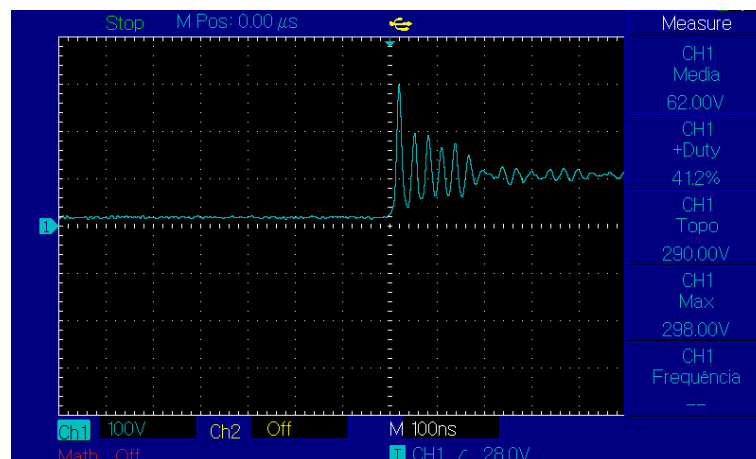
05 E 06 DE SETEMBRO

maior quando a razão cíclica estava próxima de 46%, o pico aumentava exponencialmente quando a tensão de entrada era elevada. Um recorte do pico de tensão é mostrado na Figura 7 (b).

Figura 7 - Pico de tensão medido na chave  $S_1$



(a)



(b)

As chaves  $S_1$  e  $S_2$  são de mesmo modelo, o IRFP360LC, que suportam uma tensão dreno-source de 400 V, portanto, como o conversor foi projetado para operar entre 187 V e 253 V, esse pico de tensão excederia o limite da chave, fazendo o componente queimar.

O diodo da chave possui uma recuperação reversa, segundo o *datasheet*, de 4 V/ns, logo, seria necessário 25 ns para ir de 100 V a 0 V. Entretanto, caso exista uma indutância parasita grande o suficiente, esse tempo é aumentado consideravelmente. Como mostrado na Figura 7 (b), o tempo de recuperação da tensão é 4 vezes maior que o esperado.





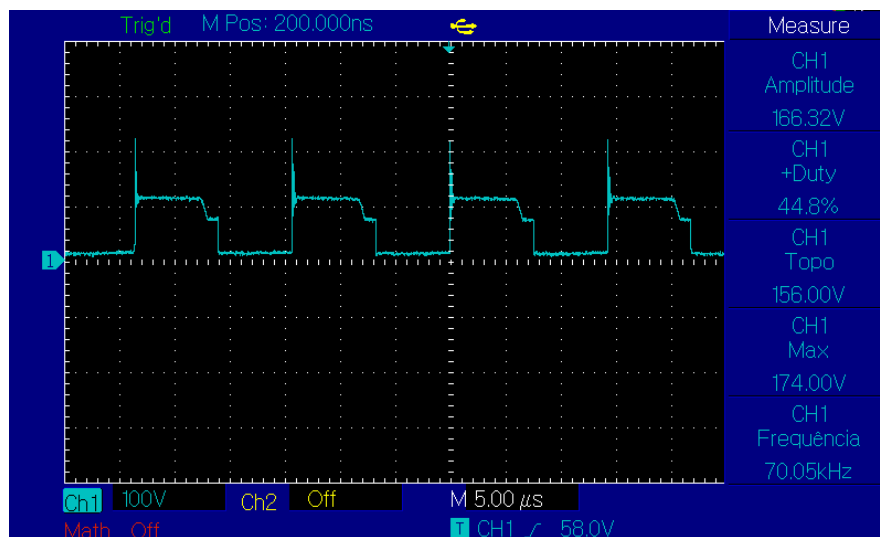
# FICE

8ª A FEIRA DE INICIAÇÃO  
CIENTÍFICA E EXTENSÃO

05 E 06 DE SETEMBRO

Para solucionar o problema, foram feitas conexões utilizando jumpers com o objetivo de diminuir as trilhas, e colocou-se um capacitor de 1  $\mu\text{F}$  em paralelo com a chave e o diodo do primário. Estas modificações influenciaram no pico de tensão que estava ocorrendo. Em uma tensão de entrada de 110V, a chave  $S_1$  mostrava um pico de aproximadamente 220 V, como observa-se na Figura 8.

Figura 8 - Forma de onda na chave  $S_1$



Esse resultado mostra que o problema ocorreu na construção do protótipo, onde as trilhas de potência muito grandes resultaram em uma indutância parasita na placa, influenciando diretamente no funcionamento e na eficiência do conversor.

Devido a esse pico de tensão, a eficiência que estava em 98% quando a razão cíclica era máxima, teve uma queda para 88%. Apesar disso, estes resultados de eficiência obtidos em baixa potência comprovam que esta topologia pode obter bons níveis de eficiência na ausência dos problemas obtidos no protótipo construído.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou o projeto de construção de um conversor CC-CC baseado em processamento parcial de energia com topologia *Forward/Backward*, o



# FICE

8<sup>A</sup> A FEIRA DE INICIAÇÃO  
CIENTÍFICA E EXTENSÃO

05 E 06 DE SETEMBRO

qual pode permitir melhor eficiência em sistemas FV em comparação aos conversores convencionais.

Os resultados obtidos por meio de ensaios no protótipo mostraram que apesar de alguns problemas encontrados, a eficiência desta topologia pode ser superior à dos conversores convencionais. Apesar disso, não foi possível ensaiar o protótipo em condições nominais devido à problemas no projeto da placa de circuito impresso. Desse modo, é necessário que a placa seja redesenhada e um novo protótipo seja construído de modo a garantir que o ensaio seja realizado na potência nominal de operação do conversor. Espera-se que no novo protótipo os resultados sejam ainda melhores do que os obtidos pelo protótipo apresentado neste artigo.

Nas próximas etapas da pesquisa, será realizada uma comparação criteriosa de diversos parâmetros de projeto para atestar que a topologia estudada é superior às topologias convencionais em termos de eficiência e densidade de potência.

## REFERÊNCIAS

AGAMY, M. et al. **An efficient partial power processing dc/dc converter for distributed PV architectures.** IEEE Transactions on Power Electronics, v. 29, n. 2, p. 674–686, 2014.

KASPER, M.; BORTIS, D.; KOLAR, J. **Classification and comparative evaluation of PV panel-integrated DC-DC converter concepts.** IEEE Transactions on Power Electronics, v. 29, n. 5, p. 2511–2526, 2014.

KJAER, S. B.; PEDERSEN, J. K.; BLAABJERG, F. **A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules.** IEEE Transactions on Industry Applications, v. 41, n. 5, p. 1292–1306, 2005.

MIN, B.-D. et al. **A new topology with high efficiency throughout all load range for photovoltaic PCS.** IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 56, n. 11, p. 4427–4435, 2009.

ZIENTARSKI, J. R. R.; MARTINS, M. L. da S.; PINHEIRO, J. R.; HEY, H. L.; **Series-Connected Partial-Power Converters Applied to PV Systems: A Design Approach Based on Step-up/down Voltage Regulation Range.** IEEE Transactions on Power Electronics, v. PP, n. 99, 2017.

ZHOU, H.; ZHAO, J.; HAN, Y. PV balancers: Concept, architectures, and realization. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 30, n. 7, p. 3479–3487, 2015.