

MICROINVERSOR FLYBACK INTERLEAVE PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Fábio José Lima Freire – freirelce@gmail.com

Demercil de Souza Oliveira Júnior – demercil@dee.ufc.br

Paulo Peixoto Praça – paulopp@dee.ufc.br

Luan Carlos dos Santos Mazza – luanmazza@hotmail.com

Deivid Matias Freitas – deivid_ce@hotmail.com

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica

Raimundo Nonato Moura de Oliveira – nonato.matematica@gmail.com

Instituto Federal do Ceará, Departamento de Tecnologia em Mecatrônica

Resumo. A pesquisa desenvolve um microinversor monofásico de estágio único, obtido através da associação em paralelo de quatro conversores flybacks CC-CC operando no modo de condução descontínua. Esta topologia possui as quatro chaves do primário atuando com comutação SPWM em alta frequência, defasadas em cento e oitenta graus. As duas chaves do secundário são comandadas por PWM's complementares. Para validação do protótipo interliga-se um painel fotovoltaico com 200 W de potência em cargas resistivas com características senoidais, similar ao sistema Módulo Conversor Integrado interligado a rede elétrica. De acordo com os resultados obtidos em laboratório, a topologia desenvolvida proporciona redução no volume dos magnéticos quando comparado a outras topologias mais robustas. Bem como, diminuição nos esforços de correntes nos primários nos transformadores e minimiza as oscilações dos sinais gerados nos módulos fotovoltaicos. O rendimento do conversor atinge seu limiar máximo em 90%, sendo entregue a carga potência média de 180 W. A exigência de circuitos de amortecimentos (intrínseco a topologia flyback) nas chaves comprometem a eficiência do conversor, sendo observado elevadas dissipações de potências nos resistores snubbers dos primários. Dentre as principais vantagens observadas no conversor têm-se a facilidade na construção dos magnéticos e utilização de poucos componentes eletrônicos. Como características elétricas nos dispositivos utilizados na fabricação observa-se as formas de ondas de correntes e tensões sem grandes distorções ou elevados picos, além da frequência de saída concatenada com a rede elétrica em 60 Hz.

Palavras-chave: Associação em paralelo, Estágio único, Modo descontínuo

1. INTRODUÇÃO

O inversor de frequência, além do processamento de energia, realiza a inversão de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA) e efetua a conexão dos módulos fotovoltaicos em cargas alternadas ou na rede elétrica (Wisam et al., 2010). Classifica-se como microinversor, todo conversor CC-CA que a principal utilização desta configuração seja para Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes (SIGFI) na faixa de potência entre 50 W a 500 W (GREENPEACE, 2014).

Atualmente, no mercado de equipamentos fotovoltaicos, os microinversores utilizados no sistema módulo CA ou Módulo Conversor Integrado (MCI, do inglês *Module Integrated Converters*), disputam espaço com os inversores convencionais e apresentam algumas vantagens, tais como: a facilidade de instalação, menores perdas e a maximização da produção de energia em instalações residenciais sujeitas a sombras parciais, ou mesmo com módulos instalados em inclinações e orientações azimutais diversas (Graaf et al., 1994); (Sanchis et al., 2005).

Sendo assim, a eletrônica a cada dia desenvolve novos conversores de potência que permitem inserir as fontes de energia alternativa na matriz energética mundial, onde através dos sistemas renováveis, as necessidades emergenciais poderão ser minimizadas, além de reduzir a utilização de combustíveis fósseis ou a construção de grandes centrais hidroelétricas que são enormes barreiras à busca de soluções ecológicas que diminuam os impactos ao meio ambiente.

2. SISTEMA PROPOSTO

O sistema proposto nesta pesquisa é baseado nos microinversores para aplicações em sistemas fotovoltaicos de pequenas potências (< 500 W) utilizando o sistema MCI, onde a natureza da fonte é contínua, ou tenha características CC, e a carga possua propriedades CA. Este conceito é usualmente utilizado para pequenos números de painéis com potências inferiores a 500 W (Myrzik, 2003), onde através de associações, obtêm-se potências mais elevadas. Além disto, o sistema MCI possibilita o rastreamento da máxima potência fotovoltaica para módulos individuais ou para pequenos grupos de módulos, diferentemente dos sistemas baseados em inversores centrais, que maximizam apenas a potência do conjunto de módulos fotovoltaicos, tratando-os como um bloco único. Uma revisão bibliográfica sobre as topologias para sistemas MCI é apresentada em (Quan et al., 2008). A Fig. 1 mostra o sistema proposto interligando os sistemas fotovoltaicos à rede de distribuição CA (Willi et al., 1996).

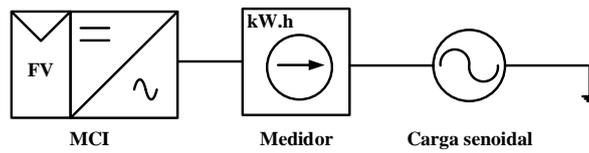


Figura 1 - Sistema MCI. Fonte: (Autorial).

3. METODOLOGIA

Como a base fundamental do estudo é o desenvolvimento de um protótipo e visando reduzir os custos e minimizar os erros de fabricação, as etapas que foram utilizadas são baseadas no modelo em cascata, conforme visto na Fig. 2.

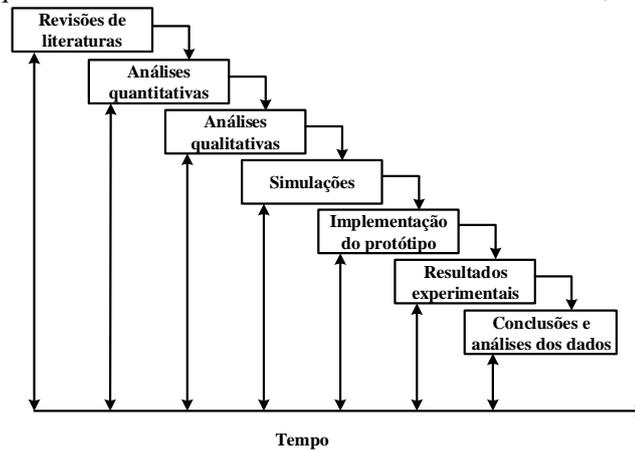


Figura 2 - Metodologia utilizada na fabricação do *flyback*. Fonte: Adaptado (Pressman, 2006).

A metodologia em cascata, também conhecida como sequencial, ou linear, se baseia em uma sucessão de etapas onde a etapa seguinte será iniciada após o término da anterior. Como observa-se na Fig. 2, o desenvolvimento flui da parte de cima com a revisão de literatura, em direção a conclusão e análise dos dados. Nessa metodologia, inicialmente procura-se compreender completamente o problema, a ser resolvido, seus requisitos e suas restrições; depois projeta-se soluções que atendam a todos os requisitos e restrições. Feito isto inicia-se a implementação do projeto e quando toda a etapa de implementação é concluída verifica-se junto a análise dos resultados se a solução atende aos requisitos estabelecidos pelas normas e recomendações dos regulamentadores dos sistemas elétricos nacionais. E por fim é efetuada a conclusão do protótipo (Kroll e Kruchten, 2003 apud Lourenço, 2011).

4. TOPOLOGIA PROPOSTA

O MIF (sigla de microinversor *flyback*), desenvolve a estrutura modular, conforme visto nos trabalhos de (Zhang et al., 2013); (Faust, 2014) e (Lai et al., 2014), que sugere a associação de conversores para minimizar as limitações nos processamentos de potências dos conversores *flybacks*. Neste contexto, o MIF consiste da associação de quatro conversores CC-CC organizados de forma a realizar o processamento de 200 W, visto na Fig. 3.

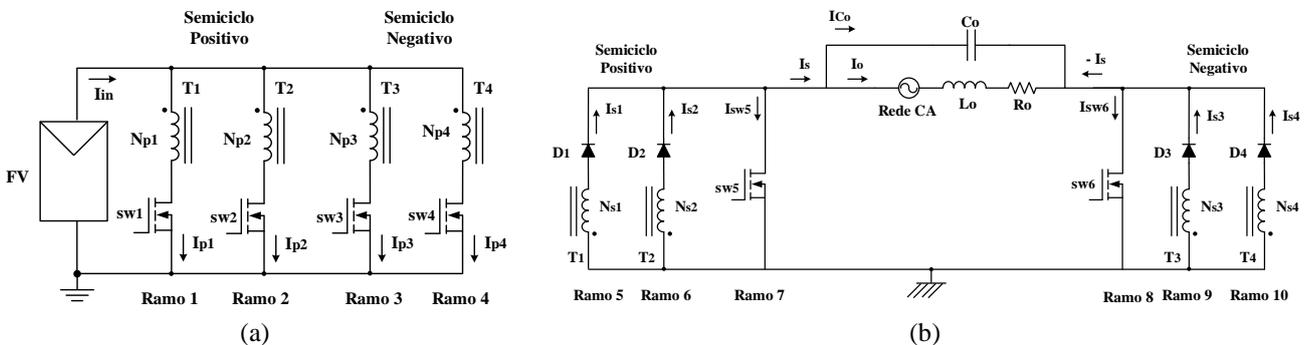


Figura 3 - Topologia do MIF: (a) Esquemático do primário; (b) Esquemático do secundário. Fonte: (Autorial).

5. ETAPAS DE OPERAÇÕES

O MIF possui três etapas de operações atuando no modo de condução descontínuo ou modo MCD. Na Fig.4 são representadas as etapas de operação de um *flyback*.

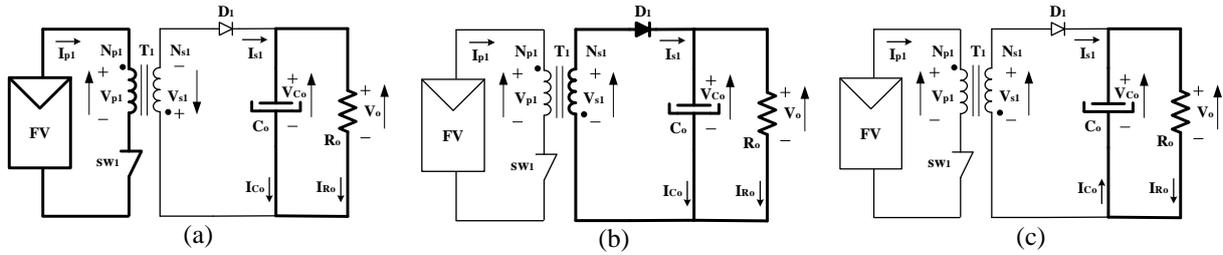


Figura 4 - (a) Primeira etapa; (b) Segunda Etapa; (c) Terceira etapa. Fonte: (Autorial).

Primeira etapa de operação [t₀-t₁] - Durante o intervalo em que o interruptor sw₁ se mantém em condução, a tensão de entrada é aplicada a indutância de magnetização L_{mp1} do primário do transformador T₁. A energia fica armazenada no enrolamento primário. O diodo D₁ se mantém bloqueado e sua corrente é nula. Neste instante, a carga é alimentada através do capacitor C_o de filtro de saída. O circuito da primeira etapa de operação é representado pela Fig. 4(a).

Segunda etapa de operação [t₁-t₂] - Nesta etapa de operação, a chave sw₁ deixa de conduzir permanecendo bloqueada, a polaridade do transformador se inverte, logo o diodo D₁ entra em condução e a energia previamente acumulada no campo magnético do primário L_{mp1} é transferida ao capacitor de filtragem C_o e a carga R_o. Esta, é finalizada quando a corrente através de L_{s1} se torna nula. A Fig. 4(b) mostra o comportamento da segunda etapa de operação.

Terceira etapa de operação [t₂-t₃] - Com o descarregamento total da energia no transformador T₁, o diodo D₁ volta ao estado de bloqueio. O interruptor sw₁ ainda permanece bloqueado e a carga é alimentada pelo o capacitor de filtro de saída C_o. A Fig. 4(c) apresenta o comportamento da terceira etapa de operação.

6. ANÁLISE QUANTITATIVA DO MICROINVERSOR FLYBACK (MIF)

Considerando o fator de potência unitário para os sinais de tensão e corrente gerados pelo inversor *flyback*, assim tem-se a Eq. (1).

$$p_o = \frac{1}{2} \cdot V_o \cdot I_o \cdot [1 - \cos(2 \cdot \omega_o \cdot t)] \quad (1)$$

Para dimensionamentos de todos os componentes foram adotados o modo de condução descontínua considerando os valores máximos de tensão e corrente. Assim como será usado apenas um braço para dimensionamento sendo repetido pelos os outros três braços do conversor.

Sabe-se que a potência do conversor será máxima quando:

$$P_{o(\max)} = v_{o(\max)} \cdot i_{o(\max)} \quad (2)$$

O cálculo da indutância dos primários L_{p1(max)} = L_{p2(max)} = L_{p3(max)} = L_{p4(max)} e a corrente de pico I_{Lp1(max)} estão em função da potência de saída P_{o(max)}, visto na Eq. (3) e Eq. (4).

$$L_{p1(\max)} = \frac{(D_{(\max)} \cdot V_{in(\min)})^2}{2 \cdot f_{sw} \cdot P_{o(\max)}} \quad (3)$$

Onde: D_(max) representa a razão cíclica máxima de operação do conversor *flyback*; f_{sw} a frequência de chaveamento e V_{in(min)} a tensão de entrada mínima fornecida pelos painéis fotovoltaicos.

$$i_{Lp1(\max)} = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{o(\max)}}{f_{sw} \cdot L_{p1(\max)}}} \quad (4)$$

Para o cálculo de L_{s1max} = L_{s2max} = L_{s3max} = L_{s4max} faz-se a relação de transformação da Eq. (5).

$$n < \frac{V_{in} \cdot D_{(\max)} \cdot \eta_{fly}}{(1 - D_{(\max)}) \cdot V_o} \quad (5)$$

A indutância do secundário, pode ser calculado pela Eq. (6).

$$L_{s1(\max)} = \left(\frac{1}{n}\right)^2 \cdot L_{p1(\max)} \quad (6)$$

O cálculo do capacitor de saída é mostrado na Eq. (7).

$$C_o = \frac{I_o \cdot D_{(\max)}}{f_{sw} \cdot \Delta V_{C_o}} \quad (7)$$

Onde ΔV_C, representa a tensão de *ripple* da saída do conversor; R_o a impedância de saída do conversor.

Para o cálculo da potência injetada na rede elétrica, têm-se a Eq. (8), mostrado na Fig. 5.

$$P_{o(\text{med})} = \frac{V_{in}^2 \cdot (D_{(\text{max})})^2}{2 \cdot f_{sw} \cdot L_{mp1}} \quad (8)$$

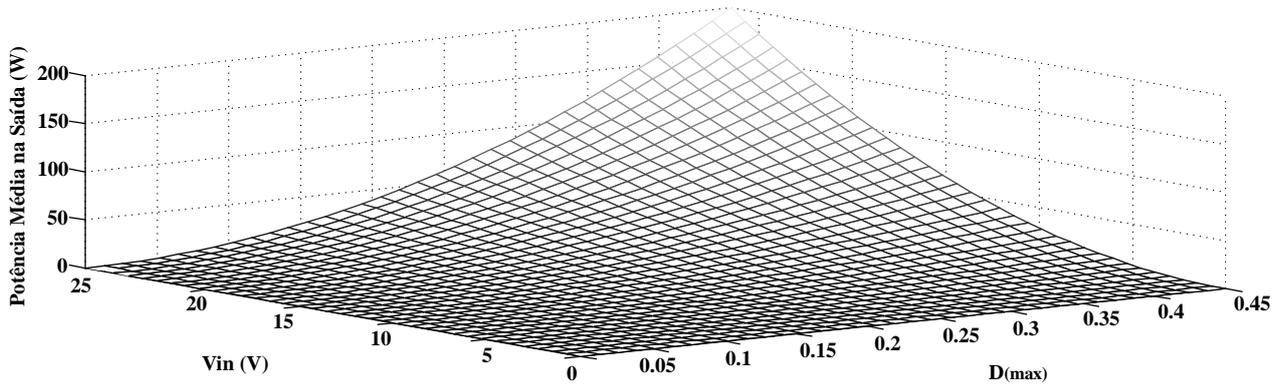


Figura 5 - Potência média na saída do conversor. Fonte: (Autorial).

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros utilizados para simulação do protótipo são mostrados na Tab. 1. Todas as simulações foram obtidas em dois períodos da rede ($0 - 4\pi$), sendo os intervalos de tempos de 0,05 a 0,10 segundos.

Tabela 1 - Parâmetros para simulação do MIF. Fonte: (Autorial).

PARÂMETROS	SÍMBOLOS	VALORES
Ciclo de trabalho máximo	$D_{(\text{max})}$	0,45
Frequência de comutação dos interruptores sw_1 a sw_4	f_{sw1} a f_{sw4}	50 kHz
Frequência de comutação dos interruptores sw_5 e sw_6	f_{sw5} e f_{sw6}	60 Hz
Indutâncias de magnetização dos enrolamentos primários	L_{mp1} a L_{mp4}	7,11 μ H
Indutâncias de magnetização dos enrolamentos secundários	L_{s1} a L_{s4}	1,4 mH
Potência de entrada do conversor <i>flyback</i>	$P_{in(\text{med})}$	200 W
Tensão de entrada nominal	$V_{in(\text{nom})}$	26,5 V
Tensão de saída nominal	$V_{o(\text{rms})}$	220 V
Índice de comutação	M_a	0,45
Ondulação de corrente no indutor	Δi_{Lf}	10%
Ondulação de tensão entrada	ΔV_{in}	2%
Ondulação de tensão na saída	ΔV_c	5%
Potência de entrada de cada <i>flyback</i>	P_{fly1} a P_{fly4}	50W
Potência de entrada do conversor <i>flyback</i>	$P_{in(\text{nom})}$	200W
Temperatura Ambiente	T_{amb}	27°C
Tensão CC de entrada nominal	$V_{in(\text{nom})}$	26,5V

A Fig. 6, apresenta a tensão e a corrente na carga. A pequena deformação das ondas de tensões e correntes, elevam a THD e o fator de potência. Também proporcionam elevados picos de correntes nas chaves do secundário e no capacitor de saída.

Sendo assim, os semicondutores devem suportar esses picos de correntes para não se danificar precocemente.

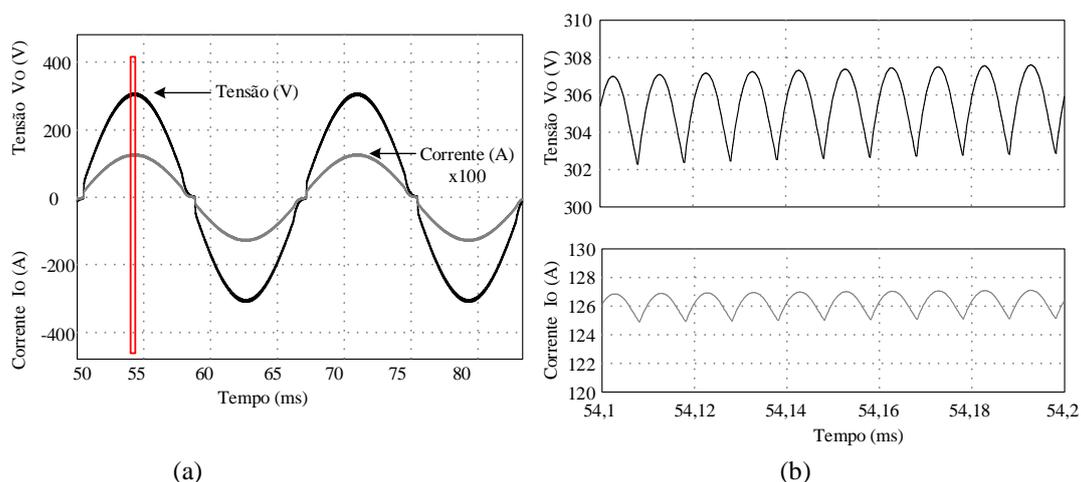


Figura 6 - Tensão e corrente entregue a carga: (a) Forma de onda simulada; (b) Detalhe. Fonte: (Autoral).

7.3 Potência na Saída do MIF

A Fig. 7, apresenta a potência instantânea entregue pelo conversor *flyback* a carga. Percebe-se ausência de grandes deformações e distorções, validando o equilíbrio do processamento de energia do MIF.

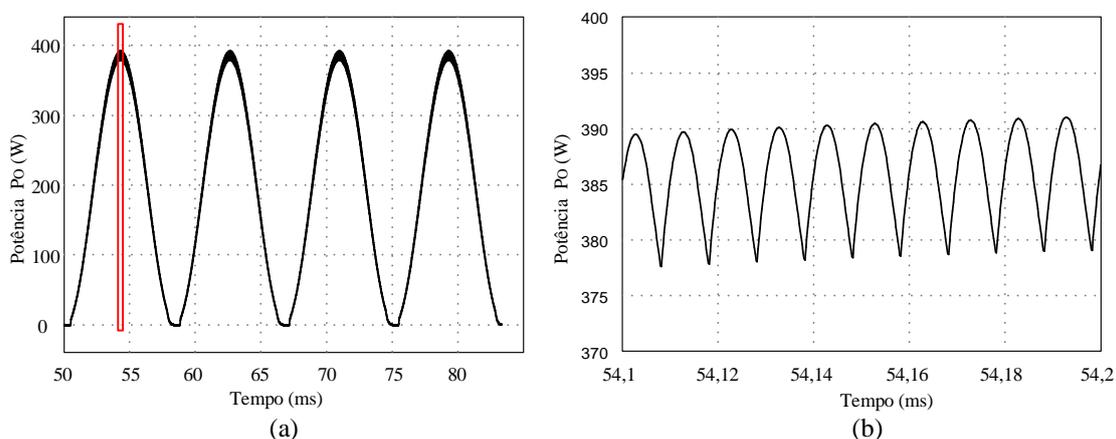


Figura 7 - Potência na carga: (a) Forma de onda simulada; (b) Detalhe. Fonte: (Autoral).

A simulação mostra o comportamento do MIF operando em malha aberta submetido a carga linear na saída. Como visto na simulação, as ondas estão em fase, favorecendo ao MIF ser conectado na RE. Além disso, o conversor obteve fator de potência de 0,99 e THD de aproximadamente 1%. Entretanto, para conexão à rede faz-se necessário estudo mais específico relativo ao MIF, para que este seja colocado em sincronismo com a rede. A Fig. 8, mostra o resultado experimental da corrente na entrada do MIF, onde é perceptível a atuação dos dois *flybacks* em cada semiciclo reduzindo os períodos do sinal de corrente a π . Observa-se, também, redução nas oscilações do sinal devido à atuação dos *flybacks* de cada semiciclo, além do filtro capacitivo inserido na entrada.

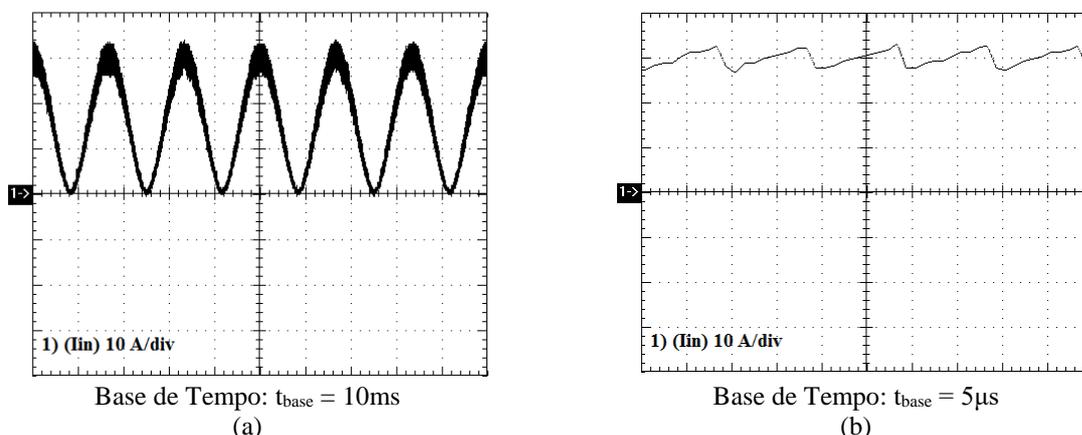


Figura 8 - Corrente na Entrada (I_{in}): (a) Forma de onda experimental; (b) Detalhe. Fonte: (Autoral).

A Fig. 9 mostra os resultados experimentais da corrente nos primários L_{mp1} e L_{mp2} dos transformadores T_1 e T_2 . Como visto, a corrente na entrada de cada *flyback* encontra-se defasada em cento e vinte graus em relação à corrente na entrada do segundo *flyback*. Embora este sinal apresente distorções, ele é perfeitamente aceitável devido não afetar as formas de ondas na saída do MIF.

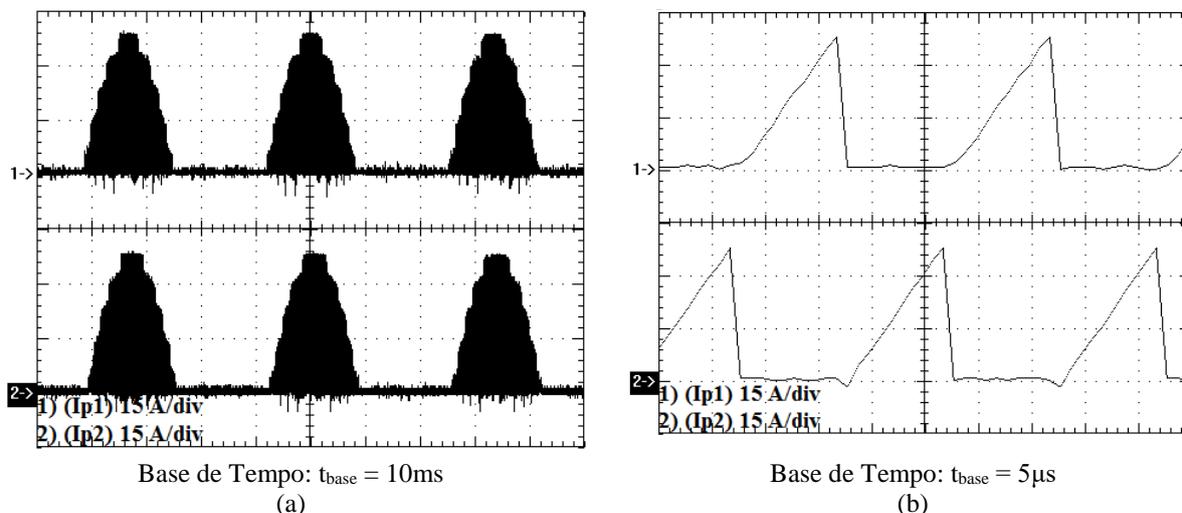


Figura 9 - Correntes I_{p1} e I_{p2} nas entradas nos primários L_{mp1} e L_{mp2} dos transformadores T_1 e T_2 : (a) Forma de onda experimental; (b) Detalhe. Fonte: (Autoral).

A Fig. 10(a), apresenta os resultados experimentais da tensão ($V_{o(max)} = 311,1\text{ V}$) e da corrente ($I_{o(max)} = 1,15\text{ A}$) disponível pelo MIF para alimentar a carga. Observando as duas formas de ondas na saída do MIF, verifica-se que as frequências da tensão e corrente são iguais a frequência da rede local ($f = 60\text{Hz}$), formato senoidal nos dois sinais e baixa distorção.

Sendo assim, as formas de ondas obtidas em simulação são bem próximas as obtidas nos resultados experimentais, validando a implementação deste protótipo.

Na Fig. 10(b) é mostrada a curva de rendimento em função da potência de saída e da tensão de entrada. Nesta curva, estão consideradas todas as perdas no circuito de potência necessárias ao funcionamento do MIF. Para determinar a curva de rendimento, adota-se uma carga linear puramente resistiva conectada na saída do MIF de forma a garantir uma tensão eficaz de 220 V .

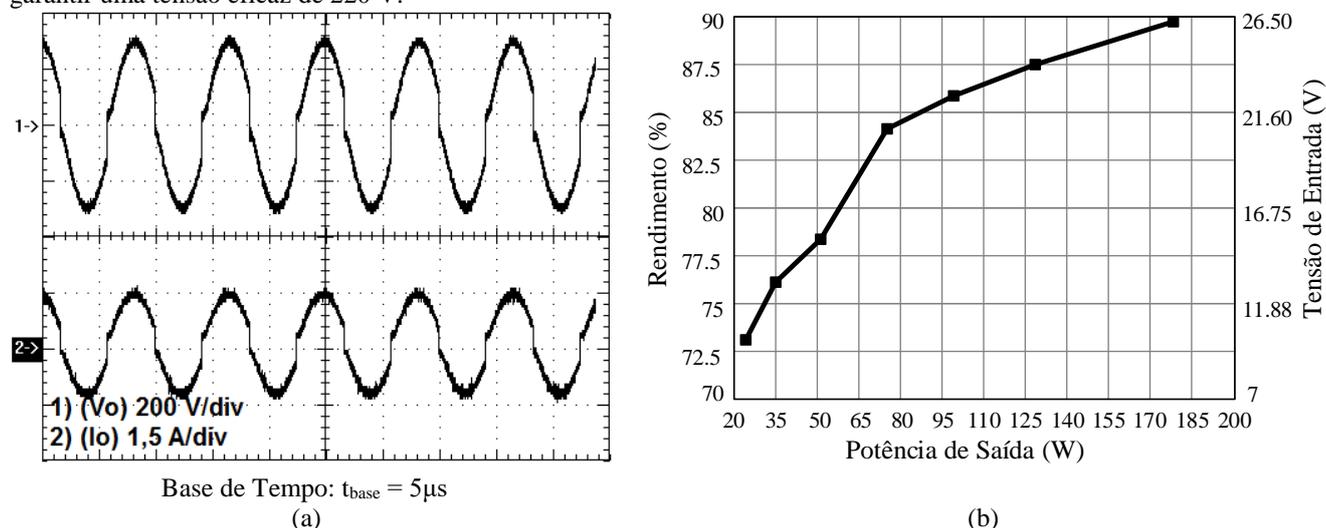


Figura 10 – Parâmetros de saída: (a) Tensão e corrente na carga; (b) Rendimento. Fonte: (Autoral).

8. PROTÓTIPO DESENVOLVIDO

A Fig. 12 mostra o protótipo desenvolvido em laboratório em regime permanente quando interligado em cargas lineares, onde são observados as características e os parâmetros elétricos que validaram o funcionamento do conversor.

Os elementos que compõem a topologia são facilmente encontrados em distribuidores de componentes eletrônicos (mosfet's, diodos, capacitores e elementos magnéticos). Para realização da modulação das chaves utiliza-se o dispositivo FPGA (*Field programmable gate array*, em português, Arranjo de Portas Programável em Campo) baseado na linguagem VHDL (*Very High Speed Integrated Circuits Hardware Description Language* – Linguagem de

Descrição de Hardware). O código fonte em VHDL inserido no FPGA é o responsável por realizar os processos de comutações SPWM e PWM das chaves dos primários e dos secundários, respectivamente.

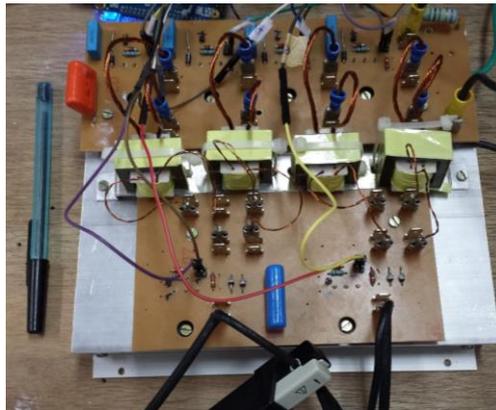


Figura 12 – Protótipo desenvolvido. Fonte: (Autoral).

9. CONCLUSÕES

Sendo o conversor *flyback* CC-CC a célula base deste estudo, pode-se concluir que o microinversor interleave quando atuando no modo de condução descontínuo, possui três etapas de operação no semiciclo positivo e três no negativo. A associação dos *flybacks* em módulos paralelos e a comutação em alta frequência, reduzem os esforços de correntes nos interruptores sw_1 , sw_2 , sw_3 e sw_4 , bem como, permitem fabricar transformadores com volumes magnéticos menores, quando comparados as outras topologias que usam apenas um único magnético para obtenção do processamento de energia. Outra característica do MIF é reduzir as oscilações no módulo fotovoltaico, que por sua vez provoca na saída sinais de tensões e correntes com pequenas distorções e menores ondulações.

Baseado nos resultados calculados, simulados e experimentados percebe-se que o projeto foi validado, uma vez que, as formas de ondas de tensões (311,1V) e correntes (1,15A) máximas coletadas na saída são senoidais, obtendo pequenas distorções, bem como observa-se a convergência ao valor da frequência na rede elétrica (60 Hz).

A eficiência do conversor implementado foi satisfatória obtendo em laboratório rendimentos próximos a 90% com 180 W entregue a carga resistiva. Por fim, através do MIF será possível (utilizando uma topologia simples, com facilidade na aquisição dos semicondutores, dos magnéticos e baixo custo) realizar a conversão CC-CA em painéis fotovoltaicos com 200 W conectados em cargas lineares ou mesmo interligados a rede elétrica (por meio da construção de PLL).

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Grupo de Processamento de Energia e Controle (GPEC) do Departamento de Sistemas Elétricos da Universidade Federal do Ceará (UFC), pela disponibilidade dos laboratórios, equipamentos e materiais.

REFERÊNCIAS

- Faust, R. G. Conversor Flyback Modular Conectado em Série na Entrada e Série na Saída Operando no Modo Descontínuo com Pulso Único de Comando. Dissertação de Mestrado. Florianópolis: 2014, pp. 176.
- GREENPEAC – REVOLUÇÃO ENERGÉTICA. O CAMINHO DO DESENVOLVIMENTO LIMPO. CONSELHO INTERNACIONAL DE ENERGIA EÓLICA (GWEC), 2013. Disponível em: http://www.greenpeace.org/brasil/Global/brasil/image/2013/Agosto/Revolucao_Energetica.pdf. 23 de fevereiro de 2015.
- Graaf, L.E.; Van Der, T.C.J. Characteristics and performance of a PV-system consisting of 20 AC modules. IEEE World Conf. Photovoltaic Energy Conversion, Waikoloa, Hawaii, pp. 921–924, 1994.
- Lai, C. M.; Yang, M.; Liu, W. C. Parallel-Operated Single-Stage Flyback-Type Single-Phase Solar Micro-Inverter, IEEE – Conference Publications, pp. 1-5, 2014.
- Lourenço, M. Obtendo Qualidade de Software com o RUP. Disponível em: < <http://qualidade-de-software.blogspot.com/2010/03/obtendo-qualidade-de-software-com-o-rup.html> > Acessado em 05 mar. 2011.
- Sanchis, P.; Ursua, A.; Gubia, E.; Marroyo, L. Design and experimental operation of a control strategy for the buck-boost DC-AC inverter, IEE Proc., Electr. Power Appl., vol.152, no.3, pp. 660–668, 2005.
- Myrzik, J. M. A.; Calais, M. String and Module Integrated Inverters for Single-Phase Grid Connected Photovoltaic Systems - A Review. Bologna Power Tech Conference, Bologna, Italia, Junho de 2003.
- Pressman, Roger S. Engenharia de Software: 6 ed. São Paulo: McGraw Hill/Nacional, 2006.
- Quan, L.; Wolfs, P. A Review of the Single Phase Photovoltaic Module Integrated Converter Topologies with Three Different DC Link Configurations, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 23, pp. 1320-1333, 2008.

- Willi, R. H.; Hall, F. E.; STRONG, S. I.; WOHLGEMOUTH, J. H. The AC Photovoltaic Module, IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp.1231-1234, 1996.
- Wisam, A.; Haibing, H.; Nasser, K.; Issa, B. Efficiency Improvement of Grid-tied Inverters at Low Input Power Using Pulse Skipping Control Strategy, IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 25, no.12, pp.3129-3138, Dec. 2010.
- Zhang, Y.; HE, X. F.; Zhang, Z. Liu, Y. F. A Hybrid Control Method for Photovoltaic Grid- Connected Interleaved Flyback Micro-Inverter to Achieve High Efficiency in Wide Load Range, IEEE – Conference Publications, pp.751-756, 2013.

MICROINVERTER FLYBACK INTERLEAVED FOR SYSTEMS PHOTOVOLTAIC

Abstract. *The research develops a micro-phase inverter of single stage, obtained through the association in parallel from four CC-CC flybacks converters operating in discontinuous conduction mode. This topology has the four keys of the primary working with SPWM switching at high frequency, lagged in one hundred and eighty degrees. The two keys of the secondary are controlled by complementary PWM. For prototype validation, it is interconnected a photovoltaic panel with 200 W of power for resistive loads with sinusoidal characteristics, similar to Module Integrated Converter system connected to the electrical network. According to the results obtained in the laboratory, the developed topology provides a reduction in the volume of the magnetic compared to other topologies more robust. As well as reduction of current efforts in the primaries in transformers and minimizes the fluctuations of the signals generated in photovoltaic modules. The converter reaches its maximum ceiling at 90%, being delivered the load average power of 180 W. The requirement of damping circuits (intrinsic to flyback topology) in keys compromises the converter efficiency, being observed high power dissipation of snubber resistors of primaries. Among the main advantages observed in the converter, there is the facility to construct the magnetic and use of a few electronic components. As electrical characteristics, it is observed forms of currents and voltages waves without major distortions or high peaks in the devices used in manufacturing, besides the output frequency is concatenated with the electrical network at 60 Hz.*

Key words: *Association in Parallel, Discontinuous Mode, Single Stage*